

UrbanITA: Un modelo de referencia de servicios IoT abiertos dirigidos a estrategias de eficiencia energética de edificios públicos inteligentes

Financiado por la Dirección General de Investigación y Transferencia del Conocimiento de la Junta de Andalucía a través de la Convocatoria de Subvenciones a proyectos de I+D+i en universidades y entidades públicas de investigación con referencia P20_00809

Investigador principal: Dr. Luis Iribarne

Informe técnico 1:

Estado del arte sobre la implementación de tecnologías y análisis de soluciones TIC innovadoras para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes

Autores:

**Javier Criado Rodríguez, UAL
Nicolás Padilla Soriano, UAL**

Fecha:

Septiembre de 2022

Tabla de contenidos

1	Resumen del informe	3
2	Introducción	4
3	Estudio sistemático de los trabajos existentes	7
4	Soluciones innovadoras existentes	12
4.1	Energía.....	12
4.2	Indicadores.....	13
4.3	IoT	14
4.4	Inteligencia Artificial.....	16
4.5	Arquitecturas	18
4.6	Servicios Web	23
4.7	Surveys	29
5	Conclusiones	31
6	Referencias.....	34
7	Anexo: Lista publicaciones seleccionadas	39

1 Resumen del informe

Se ha llevado a cabo la elaboración de un informe técnico que describe los resultados obtenidos a partir del análisis del estado del arte sobre la implementación de tecnologías para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes, además del análisis de soluciones TIC existentes en la gestión de edificios públicos. Dicho informe técnico ha sido elaborado mediante la realización de un estudio sistemático de revisión de trabajos existentes en la literatura.

Como resultados destacados de esta actividad, se ha podido observar que los ámbitos de actuación de las soluciones existentes relacionadas con edificios inteligentes ofrecen aproximaciones centradas en control de iluminación, climatización, gestión de consumo energético, apertura de puertas y ventanas, o control de presencia. Sin embargo, no existe un gran número de trabajos de investigación que profundicen en la vinculación de soluciones TIC con el concepto del indicador SRI (Smart Readiness Indicator), que ha sido recientemente adoptado como el esquema de referencia para la categorización de edificios inteligentes.

Adicionalmente, tampoco existe un gran número de trabajos centrados en el desarrollo de servicios para la gestión de los dispositivos que forman parte de este tipo de edificios. Estos resultados han confirmado la necesidad que trata de resolver el proyecto en lo relativo a la creación de servicios IoT abiertos para la implementación de estrategias de eficiencia energética en edificios inteligentes. Por otro lado, no se han identificado trabajos relevantes en la literatura que estén enfocados en edificios públicos, en general, ni en edificios públicos del ámbito educativo, en particular.

2 Introducción

En el contexto de los Edificios de Energía Casi Nula (EECN), la implementación de tecnologías y el análisis de soluciones TIC (Tecnologías de la Información y Comunicación) innovadoras desempeñan un papel fundamental en la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes. Estas tecnologías y soluciones permiten optimizar el consumo de energía, mejorar la eficiencia operativa y brindar una mayor comodidad y un mayor nivel de seguridad a los ocupantes.

Algunas implicaciones importantes de la implementación de tecnologías y soluciones TIC innovadoras en la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes son:

- **Monitorización y control:** La implementación de sensores y sistemas de monitorización permite recopilar datos en tiempo real sobre el consumo de energía, la calidad del aire, la iluminación, entre otros parámetros. Estos datos se utilizan para analizar el rendimiento del edificio y ajustar los sistemas de forma eficiente. Los sistemas de control inteligente permiten regular la temperatura, la iluminación y otros aspectos para adaptarse a las necesidades de los ocupantes y maximizar la eficiencia energética.
- **Gestión energética:** Las soluciones TIC permiten la gestión avanzada de la energía en los edificios inteligentes. Se pueden implementar sistemas de gestión energética que optimicen el consumo mediante el análisis de datos históricos y en tiempo real. Estos sistemas permiten identificar áreas de mejora, controlar el rendimiento de los equipos y realizar ajustes para minimizar el consumo energético y los costos asociados.
- **Integración de sistemas:** Las soluciones TIC facilitan la integración de diferentes sistemas y equipos en el edificio, como sistemas de climatización, iluminación, seguridad, gestión de residuos, entre otros. Mediante el uso de plataformas de gestión centralizada, se pueden controlar y supervisar estos sistemas de manera eficiente, lo que permite una mayor coordinación y optimización de las operaciones del edificio.
- **Interconectividad y comunicación:** La implementación de soluciones TIC permite la interconexión de los diferentes dispositivos y sistemas en el edificio a través de redes de comunicación. Esto facilita la transmisión de datos, la comunicación entre los sistemas y la toma de decisiones basada en información actualizada. Además, la interconectividad puede permitir la participación de los edificios en redes inteligentes o sistemas de gestión energética a nivel de vecindario o ciudad, lo que contribuye a la optimización global de la energía.
- **Experiencia del usuario:** Los edificios inteligentes proporcionan una mejor experiencia para los ocupantes. Las soluciones TIC pueden permitir la personalización de las condiciones de confort en función de las preferencias individuales, como la regulación de la temperatura, la iluminación o la calidad del aire. Además, se pueden implementar aplicaciones móviles o interfaces de usuario intuitivas que permitan a los ocupantes interactuar con el edificio y acceder a información relevante en tiempo real.

En resumen, la implementación de tecnologías y soluciones TIC innovadoras en la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes implica aprovechar el potencial de la monitorización, el control, la gestión energética, la interconectividad y la mejora de la experiencia del usuario. Estas soluciones contribuyen a mejorar la eficiencia energética, reducir los costos operativos y proporcionar entornos más cómodos y sostenibles para los ocupantes.

La implementación de tecnologías y soluciones TIC innovadoras en la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes está estrechamente relacionada con el espacio europeo debido a las políticas y objetivos establecidos por la Unión Europea (UE) en términos de eficiencia energética y sostenibilidad.

En el marco de la UE, se ha promovido la transición hacia los Edificios de Energía Casi Nula (EECN) como parte de la Estrategia Europea 2020 y el Pacto Verde Europeo (Green Deal). Los EECN son edificios altamente eficientes que cubren la mayor parte de sus necesidades energéticas a partir de fuentes renovables o de energía local, y reducen al máximo su consumo energético.

La Directiva 2010/31/UE sobre la eficiencia energética de los edificios establece los requisitos para los EECN y obliga a los Estados miembros a adoptar medidas para lograr la transición hacia estos edificios. Los Estados miembros de la UE están trabajando en la implementación de esta directiva a nivel nacional, estableciendo regulaciones y estándares específicos para promover la eficiencia energética en los edificios.

Además, la UE ha establecido programas de financiamiento y apoyo para fomentar la renovación de edificios existentes y promover la adopción de tecnologías y soluciones TIC innovadoras. El programa Horizonte Europa y el Mecanismo Conectar Europa (CEF) son dos ejemplos de iniciativas europeas que brindan fondos y apoyo a proyectos relacionados con la eficiencia energética y la transformación digital de los edificios.

La implementación de tecnologías y soluciones TIC en los edificios inteligentes no solo contribuye al cumplimiento de los objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad de la UE, sino que también impulsa la innovación y el desarrollo económico en el espacio europeo. La promoción de soluciones tecnológicas avanzadas en el sector de la construcción y la mejora de la eficiencia energética en los edificios son áreas prioritarias para la UE en su búsqueda de una transición hacia una economía baja en carbono y más sostenible.

En este sentido, la relación entre la implementación de tecnologías y soluciones TIC innovadoras en la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes y el espacio europeo radica en el cumplimiento de los objetivos de eficiencia energética y sostenibilidad establecidos por la UE, así como en los programas de financiamiento y apoyo que se ofrecen para promover estas iniciativas en el ámbito europeo.

Por todo lo descrito anteriormente, es necesario e importante implementar tecnologías y análisis de soluciones TIC innovadoras para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes por varias razones. Las tecnologías y soluciones TIC permiten monitorear y controlar el consumo de energía en los edificios, lo que facilita la identificación de áreas de mejora y la implementación de medidas para reducir el consumo energético. Esto es crucial en un contexto de creciente conciencia sobre la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático. Además, la implementación de tecnologías y soluciones TIC en los edificios inteligentes ayuda a

optimizar el uso de recursos naturales, como la energía y el agua. La gestión inteligente de estos recursos contribuye a la sostenibilidad ambiental y al desarrollo de edificios más respetuosos con el medio ambiente.

Por otro lado, gracias a las soluciones TIC, los edificios inteligentes pueden adaptarse a las necesidades y preferencias individuales de los ocupantes. Esto se traduce en un mayor confort, mayor control sobre el entorno y una experiencia de usuario mejorada en términos de iluminación, temperatura, seguridad y comodidad en general. Adicionalmente, las soluciones TIC permiten una gestión más eficiente de los edificios, facilitando tareas como la monitorización remota, la detección temprana de fallos en los sistemas y el mantenimiento predictivo. Esto ayuda a reducir los costos operativos y a optimizar la planificación de actividades de mantenimiento. La implementación de tecnologías y soluciones TIC innovadoras en los edificios inteligentes también implica estar a la vanguardia de la transformación digital en el sector de la construcción. Esto puede proporcionar ventajas competitivas a los propietarios de los edificios, promover la innovación tecnológica y estimular el desarrollo económico en el ámbito de la construcción sostenible.

El presente informe técnico se enmarca en los objetivos 1 y 3 del proyecto UrbanITA, siendo los alcances los siguientes:

- **Objetivo 1: Estado del arte sobre la implementación de tecnologías para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes.** Se ha llevado a cabo un análisis del estado del arte sobre la implementación de tecnologías para la transformación de edificios en edificios inteligentes mediante la realización de un estudio sistemático de los trabajos existentes en la literatura.
- **Objetivo 3: Análisis de soluciones TIC innovadoras en la gestión energética de edificios públicos existentes en el ámbito educacional.** A partir del estudio realizado, se ha llevado a cabo un análisis de las soluciones TIC existentes que están enfocadas en la gestión de edificios públicos. En particular, se trataba de centrar el análisis en el ámbito educacional pero, debido al reducido número de trabajos en este ámbito, se optó por analizar las soluciones innovadoras que, teniendo una relación directa con la gestión de edificios públicos, pudieran tener algún tipo de relación indirecta con el ámbito educativo.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera. El Capítulo 3 describe el estudio sistemático que ha sido llevado a cabo, describiendo las etapas acometidas para la extracción del conjunto final de publicaciones seleccionadas. Seguidamente, en el Capítulo 4 se realiza un análisis de un subconjunto de las publicaciones seleccionadas en el estudio, teniendo en cuenta la importancia de sus contribuciones y las características más relevantes en lo que se refiere a las categorías establecidas en el estudio. Finalmente, en el Capítulo 5 se establecen un conjunto de conclusiones derivadas del estudio realizado.

3 Estudio sistemático de los trabajos existentes

La revisión sistemática de la literatura se abordó considerando algunas de las metodologías existentes en ingeniería de software (Kuhrmann et al., 2017; Petersen et al., 2008, 2015). La revisión sistemática es un paso a paso bien organizado procedimiento que consiste en estudiar la literatura actual en un área para estructurar y analizar el estado de la investigación, identificando sus limitaciones y vacíos que den lugar a nuevas líneas de trabajo. El procedimiento de revisión bibliográfica se centró en determinar un plan de búsqueda de los artículos científicos más relevantes en la base de datos Web of Science, considerando los siguientes aspectos:

- (a) **Palabras clave:** conjunto de términos utilizado para elaborar las consultas sobre las bases de datos de publicaciones.
- (b) **Consultas:** lista de consultas creadas para recopilar un conjunto de resultados útil para el estudio.
- (c) **Colección:** conjunto de resultados extraído a partir de la ejecución de las consultas sobre los repositorios utilizados y teniendo en cuenta una serie de criterios específicos para el filtrado de los resultados obtenidos.
- (d) **Extracción:** información específica obtenida a partir de los trabajos seleccionados

En primer lugar, se determinó el conjunto de **palabras clave** que sería utilizado para la construcción de las consultas. En una primera aproximación, se identificaron las siguientes posibles categorías de interés:

- Smart Readiness Indicator (SRI), Key Performance Indicators (KPI)
- Building Energy Management Systems (BEMS), nearly Zero Energy Building (nZEB), Building Management Systems (BMS)
- Energy Efficiency, Energy Consumption
- IoT architectures, IoT frameworks
- Energy Management (Architectures, Interfaces, etc.) for Buildings
- Smart building services

Sin embargo, el uso de este conjunto de términos no permitía la colección de un conjunto de resultados suficiente para poder realizar un estudio amplio sobre los trabajos existentes en la literatura. Por este motivo, se adoptó la decisión de simplificar las palabras clave a conceptos más genéricos, para poder ampliar así la colección de resultados y conseguir recopilar un mayor número de trabajos. El conjunto de palabras clave utilizadas fue el que se lista a continuación:

- IoT, Internet of Things
- WoT, Web of Things
- OpenAPI, Open Application Programming Interface
- RESTful services, REST web services
- BMS, Building Management Systems
- BEM, Building Energy Management
- BEMS, Building Energy Management Systems
- UBEM, Urban Building Energy Modelling, Urban Building Energy Modeling

A partir de las palabras clave seleccionadas, se creó un conjunto de **consultas** mediante (1) la combinación de los términos y (2) la aplicación de diferentes criterios para el refinamiento o el filtrado de los resultados obtenidos. En la siguiente lista se muestran las consultas realizadas, junto con el número de resultados que se obtuvo de su ejecución:

- (TS=(IoT OR "Internet of Things")) AND (TS=(BMS OR "Building Management Systems" OR BEM OR "Building Energy Management" OR BEMS OR "Building Energy Management Systems" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modelling" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modeling")) → 184 resultados.
 - Categoría "Engineering Electrical Electronic": **86 resultados (C1)**.
 - Categoría "Telecommunications": **39 resultados (C2)**.
 - Categoría "Green Sustainable Science Technology": **26 resultados (C3)**.
 - Categoría "Computer Science": **78 resultados (C4)**.
- TS=API AND TS=(REST OR RESTful) AND TS=building AND TS=services → 112 resultados.
 - Categoría "Engineering Electrical Electronic": **24 resultados (C5)**.
 - Categoría "Telecommunications": **16 resultados (C6)**.
 - Categoría "Computer Science": **81 resultados (C7)**.
- (TS=(WoT OR "Web of Things")) AND (TS=(BMS OR "Building Management Systems" OR BEM OR "Building Energy Management" OR BEMS OR "Building Energy Management Systems" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modelling" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modeling")) → **2 resultados (C8)**.
- TS=(REST OR RESTful) AND TS=("building service" OR "building management") → **4 resultados (C9)**.
- TS=(REST OR RESTful) AND TS="smart building" AND TS=(service OR management) → **2 resultados (C10)**.
- (TS=OpenAPI) AND (TS=(BMS OR "Building Management Systems" OR BEM OR "Building Energy Management" OR BEMS OR "Building Energy Management Systems" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modelling" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modeling")) → 0 resultados.
- (TS=(OpenAPI OR "Open Application Programming Interface")) AND (TS=(BMS OR "Building Management Systems" OR BEM OR "Building Energy Management" OR BEMS OR "Building Energy Management Systems" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modelling" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modeling")) → 0 resultados.
- (TS=("RESTful services" OR "REST web services")) AND (TS=(BMS OR "Building Management Systems" OR BEM OR "Building Energy Management" OR BEMS OR "Building Energy Management Systems" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modelling" OR UBEM OR "Urban Building Energy Modeling")) → 0 resultados.

Las consultas fueron realizadas sobre las bases de datos "Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)" y "Conference Proceedings Citation Index – Science (CPCI-S)" de Web of Science. Se adoptaron las decisiones de (1) incluir la base de datos de conferencias internacionales y (2) incluir categorías adicionales a "Computer Science" debido a que los resultados obtenidos incluyendo solo artículos de revistas internacionales pertenecientes a la categoría mencionada no eran suficientes para llevar a cabo un estudio del estado del arte sobre los trabajos existentes.

Como resultado de la ejecución de las consultas anteriores, se obtuvo una **colección** compuesta por un total de 304 trabajos. Se puede observar en el listado anterior que, los

valores globales que aparecen en las consultas que han sido divididas para especificar la categoría de la Web of Science no vienen por la suma de los resultados correspondientes a cada una de estas categorías especificadas. Esto es así puesto que hay trabajos que se encuentran en más de una de las categorías.

Para poder realizar un proceso de análisis más detallado sobre los resultados de la colección obtenida, los trabajos fueron agrupados en diez conjuntos (**CN**) a partir de las consultas y las categorías mostradas en el listado anterior. Cada conjunto fue revisado de forma independiente, analizando los trabajos para determinar su adecuación para el estudio del estado del arte sobre la implementación de tecnologías y análisis de soluciones TIC innovadoras para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes. Para la selección de un trabajo, se tuvo en cuenta el resumen de la publicación, así como una revisión rápida del artículo en aquellos casos en los que la lectura del resumen no era suficiente poder determinar su adecuación al estudio.

De los 86 resultados del conjunto **C1**, se seleccionaron **53** trabajos; de los 39 resultados del conjunto **C2**, se seleccionaron **19** trabajos; de los 26 resultados del conjunto **C3**, se seleccionaron **16** trabajos; de los 78 resultados del conjunto **C4**, se seleccionaron **57** trabajos; de los 24 resultados del conjunto **C5**, se seleccionaron **3** trabajos; de los 16 resultados del conjunto **C6**, no se seleccionó ningún trabajo; de los 81 resultados del conjunto **C7**, se seleccionó únicamente **1** trabajo; de los 2 resultados del conjunto **C8**, se seleccionaron los **2** trabajos; de los 4 resultados del conjunto **C9**, se seleccionaron los **4** trabajos; de los 2 resultados del conjunto **C10**, se seleccionaron los **2** trabajos. Posteriormente, a partir del subtotal de **157 trabajos seleccionados** de los diez conjuntos, se llevó a cabo un último proceso de filtrado.

En dicho proceso, se tuvo en cuenta la categoría (o las categorías) relacionada con el dominio del presente estudio en la que podía incluirse cada uno de los trabajos. Tras una revisión de los 157 trabajos, se determinaron las siguientes categorías:

- **Energía:** trabajos que se centran en soluciones relacionadas con la eficiencia energética, con el consumo, con el concepto de edificio energía cero o nZEB, etc.
- **Indicadores:** trabajos cuya contribución principal está directamente relacionada con indicadores del tipo SRI (Smart Readiness Indicator), KPI (Key Performance Indicator), etc., sobre edificios inteligentes.
- **IoT:** trabajos que están enfocados en soluciones, tecnologías y dispositivos del Internet de las Cosas para la construcción de soluciones de edificios inteligentes.
- **Inteligencia Artificial:** trabajos en los que se aplican técnicas de inteligencia artificial para la construcción de soluciones de edificios inteligentes.
- **Arquitecturas:** trabajos que están enfocados en el desarrollo o en la propuesta de arquitecturas software para la construcción de soluciones de edificios inteligentes.
- **Servicios web:** trabajos cuya contribución principal está relacionada con el desarrollo o la aplicación de tecnologías de servicios web para la construcción de soluciones de edificios inteligentes.
- **Surveys:** trabajos que describen un estudio o una revisión del estado del arte sobre soluciones de edificios inteligentes.

Tras revisar la categoría podía más adecuada para cada trabajo, eliminando aquellos que no pertenecían a ninguna de las ellas, y filtrando aquellas entradas duplicadas que se referían a un mismo trabajo, se obtuvo un **resultado final de 94 trabajos** (ver Figura 1).

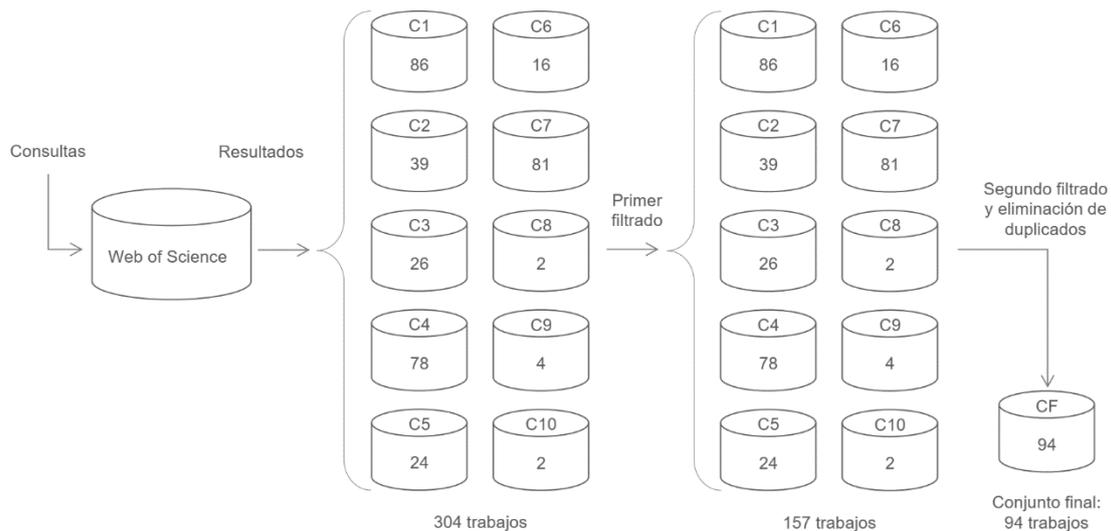


Figura 1. Estructura del procedimiento utilizado para la revisión sistemática de la literatura.

Teniendo en cuenta las categorías descritas anteriormente, se llevó a cabo una clasificación del conjunto final de 94 trabajos. Aunque algunos de los trabajos incluyen características que se corresponden con más de una categoría, se escogió como categoría principal aquella que identifica mejor al trabajo realizado teniendo en cuenta el carácter diferenciador con respecto al resto de trabajos existentes en la literatura.

Según esta clasificación, la Figura 2 muestra una distribución del número y el porcentaje de artículos en relación con cada una de las categorías. Como se puede observar, predominan las publicaciones en las que las contribuciones están más relacionadas con el paradigma de IoT (25 publicaciones, 27%), seguidas de aquellas publicaciones centradas en la descripción de una arquitectura o una solución software vinculada al dominio del estudio (18 publicaciones, 19%). En tercer lugar, se encuentra la categoría de estudios y surveys (14 publicaciones, 15%), seguida de las categorías de energía y de inteligencia artificial (ambas con 13 publicaciones, 14%). La categoría de servicios web engloba a un menor número de trabajos (9 publicaciones, 9%) y, por último, se encuentra la categoría de indicadores (2 publicaciones, 2%).

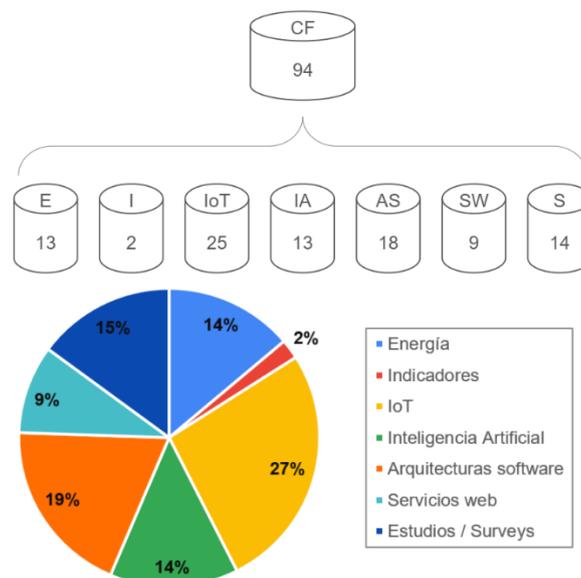


Figura 2. Distribución por categorías de las publicaciones seleccionadas en el estudio.

La lista completa de las publicaciones seleccionadas se encuentra disponible al final de este documento en la sección “Anexo: Lista publicaciones seleccionadas”.

En el caso técnicas de análisis de datos (data analytics) puede considerarse como una forma de inteligencia artificial (IA). La inteligencia artificial es un campo amplio que abarca diferentes tecnologías y enfoques para replicar o simular la inteligencia humana en las máquinas. El análisis de datos implica el procesamiento y la interpretación de grandes conjuntos de datos para descubrir patrones, extraer información relevante y tomar decisiones basadas en evidencia.

Dentro de la inteligencia artificial, el análisis de datos se considera una técnica clave para obtener conocimientos y generar modelos predictivos. Los métodos de análisis de datos pueden incluir técnicas estadísticas, aprendizaje automático (machine learning), minería de datos (data mining) y otras herramientas para procesar datos y obtener información útil. Estas técnicas a menudo se basan en algoritmos y modelos matemáticos que permiten extraer información significativa de los datos y automatizar tareas de toma de decisiones.

En resumen, el análisis de datos utiliza técnicas y algoritmos para procesar y extraer conocimientos de grandes volúmenes de datos, y se considera una forma de inteligencia artificial debido a su capacidad para automatizar y mejorar los procesos de toma de decisiones basados en datos.

En la Sección 4 se lleva a cabo una extracción de la información más relevante de los resultados obtenidos. Seguidamente, en la Sección 5 se realiza un análisis sobre los principales resultados del estudio, tratando de identificar las oportunidades que ofrece el dominio relativo a la implementación de técnicas y soluciones TIC innovadoras para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes.

4 Soluciones innovadoras existentes

En esta sección, se presentan las principales contribuciones relacionadas con la implementación de tecnologías y con el desarrollo de soluciones TIC innovadoras en el ámbito de edificios inteligentes que han sido extraídas a partir del estudio. El conjunto final de 94 artículos revisados se ha estructurado en las principales categorías identificadas en la Sección 3, i.e., energía, indicadores, IoT, inteligencia artificial, arquitecturas, y servicios web. Adicionalmente, se ha hecho uso de la categoría surveys para incluir aquellos trabajos que, aun estando relacionados con una o varias de las categorías anteriores, sigue un enfoque de estudio sistemático de revisión de los trabajos existentes en la literatura.

4.1 Energía

Debido al dominio del estudio, 84 de las 94 publicaciones seleccionadas tienen una relación principal (P) o secundaria (S) con el ámbito de la energía. Esta categoría incluye las 13 publicaciones que se centran en el uso o en la optimización de la energía en la gestión de edificios inteligentes. De esos trabajos, 2 son publicaciones en revistas internacionales y 11 corresponden a comunicaciones en actas de congresos internacionales. A continuación, se revisan los aspectos importantes de las publicaciones más relevantes.

El estudio realizado en (Moreno et al., 2014) se enfoca en identificar los factores clave que deben tenerse en cuenta al gestionar el consumo de energía en los edificios. El objetivo es ayudar a los diseñadores a seleccionar los parámetros más relevantes para controlar el consumo de energía de los edificios según su contexto, utilizándolos como datos de entrada en el sistema de gestión. Para llevar a cabo el estudio, se seleccionaron tres edificios inteligentes de referencia con diferentes características y se implementó una plataforma de automatización para monitorear el consumo de energía en ellos. Se realizaron experimentos en estos edificios para analizar la influencia de los parámetros identificados como relevantes en su consumo de energía. Además, se aplicaron estrategias de control diferentes en dos de los edificios (ver Figura 3) para ahorrar energía eléctrica. En las etapas iniciales de la evaluación, se logró un ahorro de energía de aproximadamente el 23% en un escenario real. En resumen, este estudio se enfoca en identificar los factores clave para la gestión del consumo de energía en los edificios y luego demuestra, a través de experimentos, cómo diferentes estrategias de control pueden ayudar a reducir dicho consumo.



Figura 3. Mejora energética en un edificio público del tipo smart campus (Moreno et al., 2014).

Los autores en (Sembroiz et al., 2019) estudian la optimización energética de un edificio inteligente. Primero, abordan la implementación óptima de una WSN dentro de un edificio. Para ello, se presenta un modelo capaz de identificar las mejores ubicaciones posibles para diferentes tipos de sensores y gateways, optimizando el consumo de energía mientras se cumplen las restricciones de conectividad, recursos, protección y cobertura de agrupamiento. En segundo lugar, se trata de resolver el problema del funcionamiento real del edificio según el comportamiento de sus ocupantes. En particular, el objetivo es desarrollar un sistema de gestión de edificios (BMS) capaz de gestionar eficientemente y automáticamente los elementos del edificio utilizando modelos de comportamiento humano y, por lo tanto, tratar de reducir el consumo total de energía del edificio manteniendo niveles aceptables de confort. Esto se puede lograr, por ejemplo, evitando escenarios como dejar las luces encendidas cuando las habitaciones están vacías o gestionando los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) de manera más eficiente para ofrecer una comodidad térmica adecuada a la ocupación real del edificio.

En la comunicación a congreso presentada en (Petrie et al., 2018), se revisan dos estrategias avanzadas de control de HVAC que ajustan automáticamente las ganancias del controlador en función de la estimación de parámetros y el modelo del sistema. Para analizar las propiedades de estas estrategias avanzadas de control, se hace uso de un edificio operativo en el campus de la Universidad de Texas Tech como escenario de prueba con fines de demostración. Se llevan a cabo comparaciones entre métodos tradicionales y métodos avanzados, y se observa una reducción significativa en el calentamiento y enfriamiento simultáneos cuando se utilizan los métodos más avanzados.

4.2 Indicadores

Aunque en una primera revisión de los artículos consultados durante el estudio parecía que existía un mayor número de trabajos relacionados con esta categoría, finalmente solo se incluyeron 2 publicaciones en revistas internacionales cuyas principales contribuciones se centran en la construcción de indicadores relacionados con la transformación o gestión de edificios inteligentes.

El artículo descrito en (Kumar et al., 2022) presenta un enfoque metodológico basado en emergía (emergy) para evaluar la efectividad de integrar sistemas de detección basados en IoT en edificios inteligentes. La emergía es una medida de la energía en un recurso o flujo de energía que tiene en cuenta la cantidad de energía solar directa e indirecta utilizada en su producción. En un diagrama de emergía, las entradas y salidas se representan mediante flechas que muestran la cantidad de emergía asociada con cada flujo. Las entradas de emergía suelen incluir recursos naturales, como la energía solar, el agua, los combustibles fósiles, etc., así como energía humana y energía incorporada en productos y servicios. Las salidas de emergía pueden incluir la producción de bienes y servicios, así como los residuos y emisiones generados (ver Figura 4). El artículo señala que, aunque estos sistemas de detección tienen como objetivo reducir el consumo de energía y los impactos ambientales de los edificios, rara vez se han considerado los costos ambientales reales de su integración al informar sobre su huella de sostenibilidad general. El método propuesto utiliza tres índices de neutralidad emergética (ENIs, Emergy Neutrality Indices): la relación Emergía del Sistema de Detección al Emergía del Edificio (SBEm), la Puntuación de Neutralidad Emergética (EmN) y el Tiempo de Recuperación Emergética (EmPBT). Se utiliza como ejemplo el Solar House en Gainesville, Florida, que ha sido equipado con un sistema de detección basado en IoT, para calcular estos índices. Se crea un Modelo de

Energía del Edificio (BEM) utilizando el motor de simulación EnergyPlus™ disponible en DesignBuilder V7 para determinar la Emergía operativa del edificio. Se utiliza un sensor de CO2 personalizado para recopilar datos de ocupación en tiempo real y se incorporan al BEM.

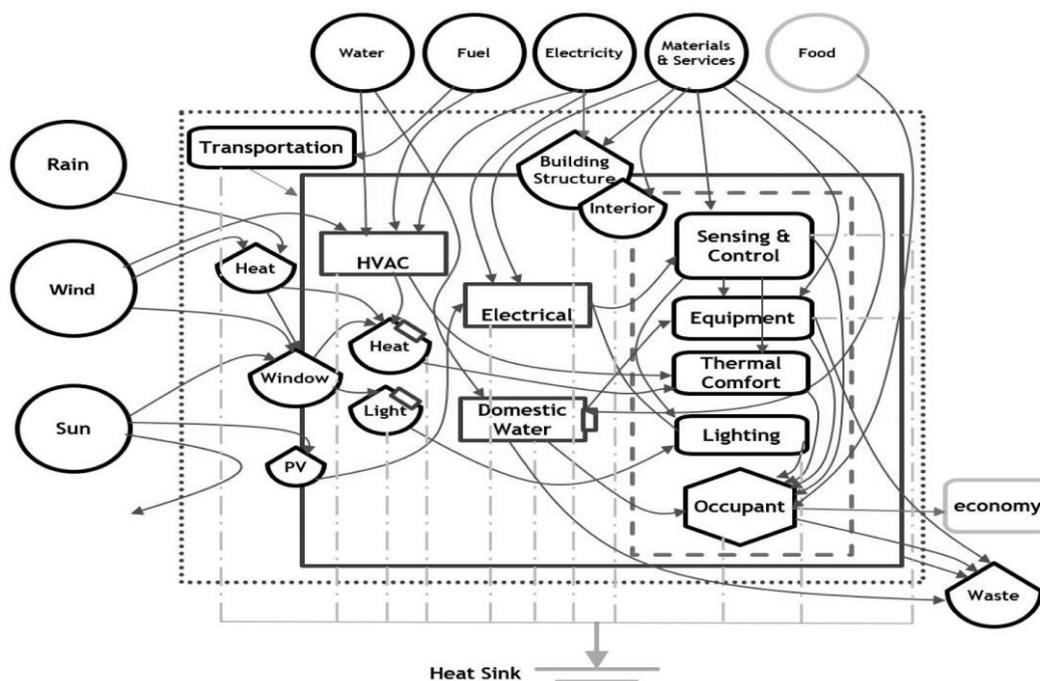


Figura 4. Diagrama de energía para evaluar la efectividad de integrar sistemas de detección basados en IoT en edificios inteligentes (Kumar et al., 2022).

En (Gupta & Phillips, 2020) se presenta una aplicación de Q-Analysis, un enfoque topológico computacionalmente sencillo que permite resumir conjuntos de datos de sensores grandes y revelar relaciones útiles entre diferentes variables. Mediante Q-Analysis, es posible extraer características estructurales novedosas denominadas vectores Q. Estos vectores Q resultan muy efectivos para proporcionar información sobre comportamientos a gran escala, específicamente sobre cómo se comportan los diferentes pisos de un edificio en este caso. Los resultados han demostrado que los pisos de un edificio muestran comportamientos distintos que dependen de cómo se distribuyen los puntos de ajuste, pero son independientes del tiempo y de la estación del año. Este enfoque de Q-Analysis permite obtener información valiosa sobre el consumo de energía en edificios antiguos adaptados, ayudando a comprender mejor sus patrones y comportamientos.

4.3 IoT

Esta categoría incluye aquellas publicaciones que están enfocadas en soluciones, tecnologías y dispositivos del Internet de las Cosas para la construcción de soluciones de edificios inteligentes. En contraposición con los trabajos incluidos en la categoría de “arquitecturas” o “arquitecturas software”, esta categoría se centra en la descripción de propuestas que tienen un mayor peso en las contribuciones vinculadas con niveles más cercanos al hardware de los dispositivos ciberfísicos. Por la dependencia de esta categoría con el dominio vinculado al estudio, la lista de publicaciones seleccionadas tiene a esta categoría como principal (P) en 25 trabajos y como secundaria (S) en 52 trabajos; esto resulta 77 trabajos de los 94 trabajos de la lista de publicaciones seleccionadas. A continuación, se revisan los aspectos importantes de las publicaciones más relevantes.

En (Zhang et al., 2020) se propone un marco de aprendizaje de modelos térmicos de construcción pragmáticos y alternativos basado en dispositivos de IoT de bajo coste. Está diseñado para identificar y aprender automáticamente un modelo térmico de construcción que describa los comportamientos térmicos de un edificio en diferentes entornos y control.

El trabajo descrito en (Jin et al., 2022) propone un sistema IoT centrado en una pasarela (*gateway*) para permitir el funcionamiento inteligente y autónomo de dispositivos de IoT mediante el apoyo a la toma de decisiones basada en múltiples servicios inteligentes en soluciones de *edge computing*.

De forma relacionada con la categoría de “servicios web” (pero haciendo uso de servicios RESTful solo como solución de la API software), en (Nugur et al., 2018) los autores (Nugur et al., 2018) presentan el diseño y desarrollo de una pasarela (*gateway*) de IoT a escala comercial, dirigida a la integración de protocolos heredados junto con una API RESTful en una arquitectura de software BEM basada en la nube. Este dispositivo actúa como un dispositivo maestro que consulta los dispositivos de la red que no están basados en la nube, y envía los datos recibidos al software BEM basado en la nube. La arquitectura de la pasarela IoT desarrollada es escalable en términos del número de protocolos admitidos; además, es compatible con cualquier software BEM basado en la nube que pueda alojar un servidor para el uso de comunicaciones basadas en *web sockets*.

En (Karthick et al., 2021) se propone un nuevo sistema de gestión de energía de edificios comerciales (Commercial Building Energy Management System, CBEMS) que utiliza un medidor de energía compacto inteligente (Smart Compact Energy Meter, SCEM) basado en IoT para monitorear y controlar el consumo de energía y los problemas de calidad de energía. Además, se propone la gestión del lado de la demanda (DSM, Demand Side Management) para un edificio comercial utilizando IoT.

Los autores en (Shen et al., 2019) desarrollaron una arquitectura IoT incorporando un nuevo esquema de comunicación de datos horizontal (Fog-to-Fog) potenciado por los principios de las redes centradas en la información (Information-Centric Networking, ICN), y proponen una plataforma colaborativa Fog centrada en la información (Information-Centric Collaborative Fog, ICCF) para BEMSs (Building Energy Management Systems). ICCF combina las ventajas tanto de la computación Fog como de ICN: aprovecha las redes IoT que soportan la computación Fog para un procesamiento eficiente de datos distribuidos.

En (J. Yu et al., 2016) se propone un edificio inteligente basado en la tecnología IoT y en la nube que puede realizar colaboración y operaciones eficientes con diversos dispositivos de detección. El sistema propuesto selecciona un subconjunto óptimo de características de dispositivo de los recursos informáticos y de almacenamiento mediante un servidor centralizado de monitoreo y gestión de edificios en la nube (Building Monitoring and Management Center, BMMC). El rendimiento del sistema propuesto fue evaluado a través de experimentos que verifican que las medidas realizadas son satisfactorias.

El artículo publicado en (Medina-Gracia et al., 2019) presenta la primera aproximación de un sensor de calidad de energía incorporado (Embedded Power Quality Sensor, EPQS) que tiene como objetivo proporcionar información relacionada con la calidad de energía y el consumo de energía de los electrodomésticos inteligentes dentro de una instalación. El sensor y la solución de software de monitoreo propuesta permiten integrar el sistema en la nube. Esto permitirá un análisis adecuado de los patrones de los parámetros operativos, así como el conocimiento de las condiciones de suministro de energía y carga de los múltiples

electrodomésticos. Estos datos serán útiles para el mantenimiento y soporte del producto y, en última instancia, para el servicio al cliente.

En la comunicación a congreso presentada en (Aybar-Mejía et al., 2022) se describe un caso de estudio que demuestra las ventajas de aplicar un sistema IoT para la gestión energética en edificios gubernamentales. En el caso propuesto, se presenta como un sistema integrado en edificios gubernamentales que puede utilizarse para registrar información sobre el estado de la calidad energética y las condiciones ambientales. Las mediciones mostraron la importancia de utilizar sistemas EMS en edificios gubernamentales, ya que permiten a los administradores y responsables del mantenimiento del edificio detectar áreas donde se deben proponer mejoras en la infraestructura energética.

4.4 Inteligencia Artificial

En este caso, 13 de las 94 publicaciones seleccionadas tienen una relación principal (P) y 12 tienen una vinculación secundaria (S) con el ámbito de la inteligencia artificial. De los 13 trabajos pertenecientes a esta categoría, 9 son publicaciones en revistas internacionales y 4 son comunicaciones en actas de congresos internacionales. A continuación, se revisan los aspectos importantes de las publicaciones más relevantes.

A través de los datos energéticos recopilados mediante medidores de energía inteligentes basados en IoT, el estudio descrito en (Lee et al., 2021) tuvo como objetivo desarrollar una plataforma escalable para investigar las características espaciales específicas del patrón de consumo energético temporal y el potencial de ahorro energético relevante mediante la instalación eléctrica (i.e., iluminación, electrodomésticos, sistemas de calefacción y refrigeración) en un edificio. El estudio se llevó a cabo en cuatro etapas: recolección de datos en tiempo real, desarrollo de un panel de control, análisis del patrón de consumo energético y evaluación del potencial de ahorro energético. Los resultados principales mostraron que más del 50% del consumo energético en áreas principales, como las aulas, se debió a los sistemas de calefacción y refrigeración (ver Figura 5). Además, se estimó que la aplicación de ciertas mejoras podría conseguir un ahorro energético del 11.50%. La plataforma propuesta tiene como objetivo ayudar a comprender cómo se utiliza la energía en diferentes áreas de un edificio y cómo los ocupantes pueden modificar sus comportamientos para ahorrar energía, considerando las características específicas de cada espacio y los patrones de ocupación.

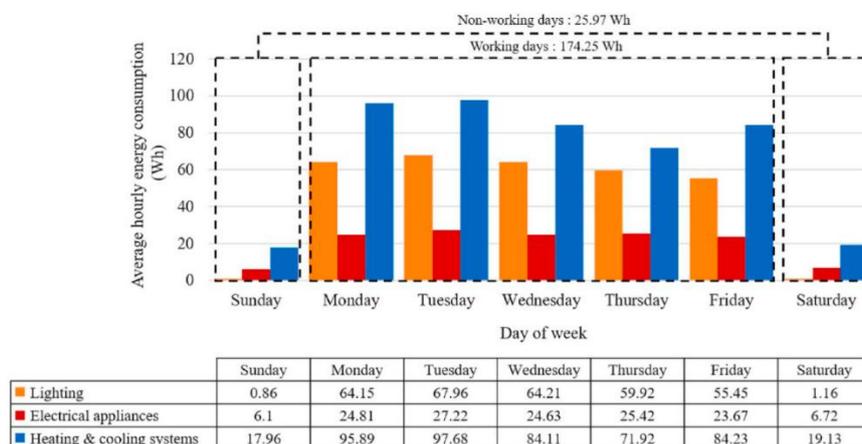


Figura 5. Consumo medio semanal en las principales estancias de un edificio público con aulas destinado al uso como guardería (Lee et al., 2021).

La predicción de carga para los sistemas de gestión energética se ha convertido en una tarea muy desafiante, ya que requiere una alta precisión y condiciones operativas estables. En (Bui et al., 2021), se propone un nuevo modelo basado en LSTM que combina diferentes enfoques de pronóstico, incluyendo modelos a largo plazo, a corto plazo y características semanales. Este modelo utiliza una técnica llamada "bottleneck feature" para mejorar su rendimiento en la gestión energética de edificios (ver Figura 6). Comparado con el modelo LSTM convencional de un solo enfoque, el modelo propuesto muestra un mejor rendimiento y una excelente capacidad para responder a situaciones inesperadas en la gestión energética de edificios.

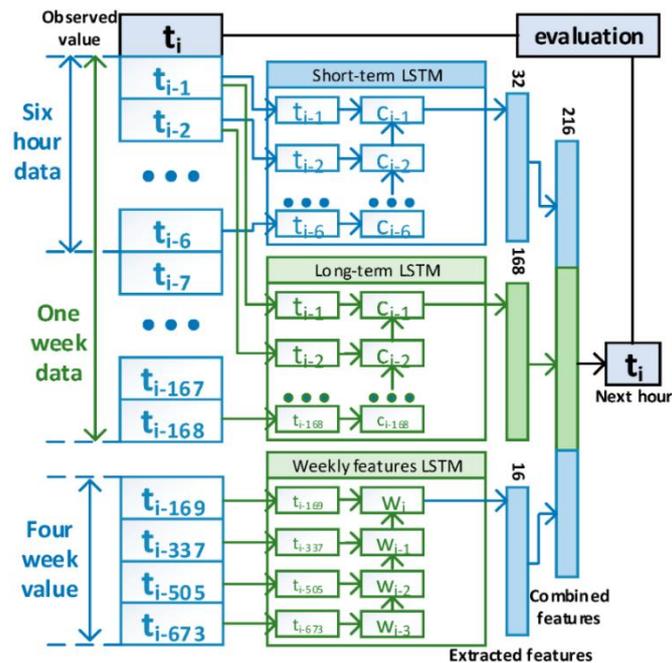


Figura 6. Arquitectura del modelo propuesto basado en LSTM para mejorar el rendimiento en la gestión energética (Bui et al., 2021).

En la comunicación presentada en (Vinnarasi & Sangeetha, 2021) se propone un sistema basado en IoT para la implementación del método de control predictivo por modelo (Model Predictive Control, MPC) para HVAC en aplicaciones de edificios inteligentes automatizados. El dispositivo consta de una serie de dispositivos de detección inteligentes, un navegador, una base de datos de servidor, un módulo de control con una interfaz gráfica de usuario (GUI) y una interfaz fácil de usar conectada a Internet.

En (Javed et al., 2017) los autores implementaron un controlador inteligente que integra IoT con la computación en la nube. En dicha propuesta, los parámetros del entorno interior del edificio, los parámetros del aire de entrada de HVAC y los parámetros de control para HVAC se cargan en un portal web. La WSN se ha implementado con una placa Moteino de baja potencia que tiene memoria y potencia de procesamiento limitadas. En este trabajo, se propone una arquitectura descentralizada del controlador inteligente en la que los algoritmos de control se implementan parcialmente en la estación base y el nodo del sensor de monitoreo ambiental ubicado en cada zona. El nodo sensor para monitorear el ambiente interior de la habitación incorpora un estimador de ocupación híbrido basado en RNN. Los modelos RNN para el controlador inteligente se entrenan con el algoritmo de entrenamiento híbrido PSO-SQP en la plataforma en la nube, y los modelos RNN entrenados se integran en la estación base y el nodo del sensor de monitoreo ambiental.

En el estudio realizado en (Luo et al., 2019), se propone una plataforma de big data basada en IoT para la predicción diaria de las demandas de calefacción y refrigeración del edificio. La plataforma consta principalmente de cuatro capas: capa de sensorización, capa de almacenamiento, capa de soporte analítico y capa de servicio. utilizando la medición de los sensores IoT instalados en varias ubicaciones del edificio y el último pronóstico del tiempo, se puede obtener la predicción diaria de las demandas de calefacción y refrigeración a través del modelo predictivo basado en el aprendizaje automático híbrido propuesto.

En (Park et al., 2020) se presenta un BEMS basado en el aprendizaje de refuerzo para la optimización del uso de energía. Este estudio implementa sensores inteligentes de IoT en un banco de pruebas de un hotel real. Los datos de temperatura, humedad, detección de movimiento y energía se transmiten desde la habitación en tiempo real, y es posible monitorear y simular los datos en el centro de datos.

Los autores en (Iddianozie & Palmes, 2020) llevan a cabo un estudio que investiga la viabilidad y el rendimiento de diferentes métodos de aprendizaje supervisado para inferir la semántica de dispositivos IoT en edificios inteligentes. En particular, se destaca el potencial de las series de tiempo codificadas por imágenes (Image Encoded Time Series, IETS) como una alternativa a las funciones de estadísticas descriptivas. Se demuestra que, usando solo una fracción de los datos en un archivo de serie temporal, esta codificación puede producir características que compiten con los métodos estadísticos tradicionales basados en características.

En el trabajo presentado en (Elkhoukhi et al., 2022) se propone una arquitectura que integra una plataforma IoT (Thingsboard) para recopilar datos de flujo de sensores y algoritmos de aprendizaje automático para su aplicación en los flujos de datos y en datos no estacionarios. Además, estos algoritmos se implementaron y utilizaron para predecir el número de ocupantes en una sala de oficina. Se evaluaron y compararon tres algoritmos (árbol de Hoeffding, naïve Bayes y SAM KNN) en términos de precisión, costo del modelo (cuántos GBs se puede usar por hora) y tiempo de ejecución (tiempo de uso de CPU). Los resultados experimentales indican la utilidad de los algoritmos propuestos en comparación con los algoritmos que solo adoptan configuración de procesamiento por lotes.

4.5 Arquitecturas

Para la categoría de arquitecturas, 18 de las 94 publicaciones seleccionadas tienen una relación principal (P) y 24 tienen una vinculación secundaria (S) con dicho ámbito. De los 18 trabajos pertenecientes a esta categoría, 9 son publicaciones en revistas internacionales y 9 son comunicaciones en actas de congresos internacionales. A continuación, se revisan los aspectos importantes de aquellas publicaciones más relevantes.

El artículo descrito en (Teixeira et al., 2022) propone un sistema de gestión energética para comunidades energéticas, que permite la participación directa de los dispositivos IoT en programas de respuesta a la demanda a nivel comunitario (ver Figura 7). Esta solución se basa en un marco de sistema de gestión energética de edificios que utiliza tokens firmados para preservar la privacidad de los datos de los usuarios finales y controlar el acceso a los mismos. Además, esta solución puede planificar eventos futuros de respuesta a la demanda para equilibrar el consumo y la generación de energía, aprovechando la flexibilidad de los dispositivos IoT.

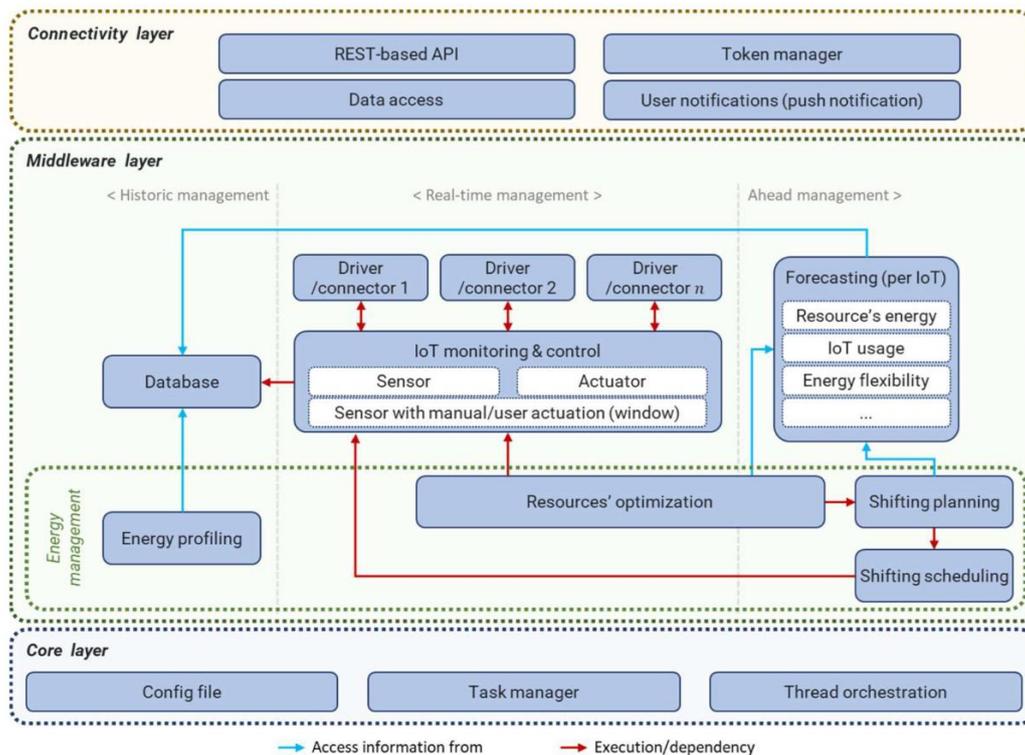


Figura 7. Arquitectura software propuesta para la gestión energética en programas de respuesta bajo demanda (Teixeira et al., 2022).

En (Sharma et al., 2021) se presenta un sistema software de gestión de energía para edificios (BEMS) que tiene una estructura modular y jerárquica. El objetivo principal es controlar el consumo de energía en edificios que cuentan con sensores. Además, se resalta la importancia de este tipo de solución al mostrar las tendencias globales en el uso de energía térmica en edificios y los problemas relacionados con la demanda máxima de energía. El sistema propuesto es capaz de centralizar, mediante una aproximación basada en la agregación (ver Figura 8), el control de todos los recursos controlables en un edificio para aprovechar su capacidad de adaptación en términos de consumo de energía. Lo más innovador de esta solución es su capacidad para manejar la diversidad de los dispositivos de hardware instalados y adaptarse a los cambios en la red de carga a lo largo del tiempo, lo que reduce la necesidad de mantenimiento después de su implementación. Este sistema abre nuevas posibilidades para estimar la energía almacenada en los edificios en forma de calor o temperatura, y permite utilizar los edificios como baterías temporales cuando hay restricciones o excedentes en el suministro eléctrico.

En el artículo descrito en (Lork et al., 2019) se presenta un *framework* basado en ontologías para administrar la energía en edificios (ver Figura 9). Se divide la estructura funcional de un sistema de gestión energética de un edificio en tres módulos interconectados: el sistema de gestión del edificio (BMS), la comparación (BMK) y la evaluación y control (ENC). Además, se discute una metodología para diseñar ontologías adecuadas y reglas de inferencia para los diferentes módulos. Para demostrar la aplicación y ventajas del marco propuesto, se lleva a cabo un estudio de caso utilizando datos reales obtenidos de tres habitaciones en un edificio comercial en Singapur. Mediante la mitigación de las causas adecuadas de la ineficiencia energética anormal, se logran ahorros energéticos del 5,7%, 11,8% y 8,7% en tres tipos de habitaciones, respectivamente, minimizando las molestias para los usuarios.

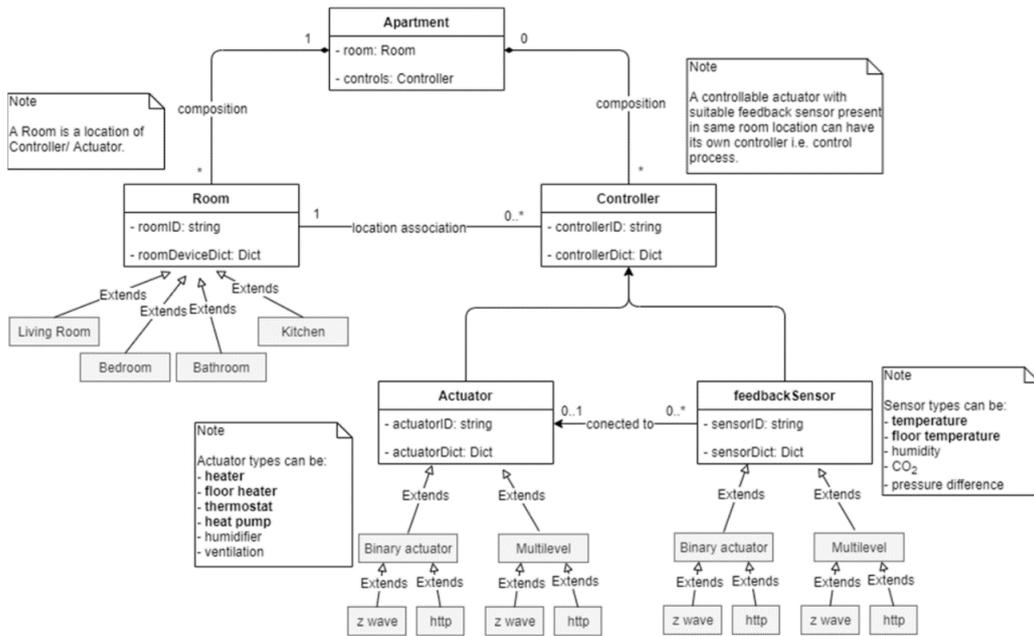


Figura 8. Agregación para un control centralizado del consumo (Sharma et al., 2021).

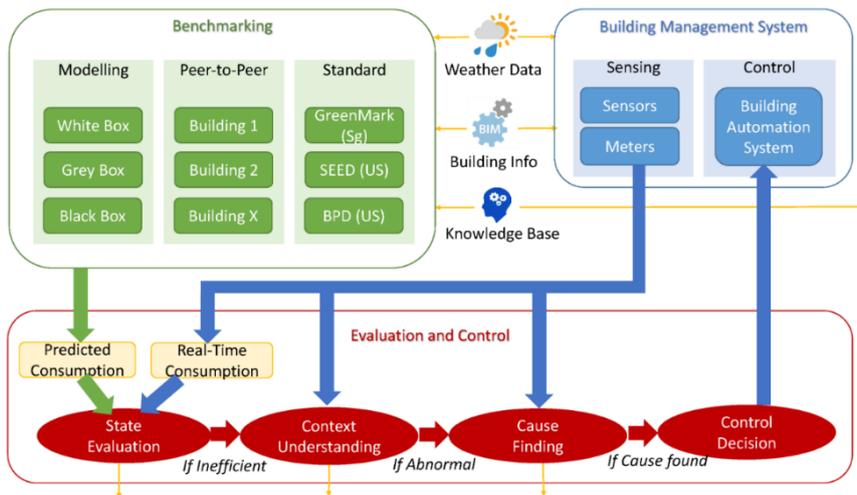


Figura 9. Arquitectura del *framework* propuesto basado en ontologías para la gestión de energía en un edificio inteligente (Lork et al., 2019).

En (Ke et al., 2020) se propone una estrategia de control de optimización de energía basada en datos aplicando una aproximación LSBoost mejorada bajo un marco IoT de energía de edificios en capas, que mejora la comodidad de los ocupantes y reduce el consumo de energía (ver Figura 10). Se valida el esquema de control propuesto mediante simulación numérica con dos tipos de edificios: edificio residencial y edificio de oficinas.

El artículo descrito en (Park et al., 2016) presenta un método para la producción rentable de dispositivos de IoT que aborda la gran escala del paradigma IoT a través de un sistema inteligente basado en la personalización. Este artículo sugiere un método para la aplicación de servicios a través de un sistema IoT basado en la personalización masiva mediante análisis de tres niveles (entorno, servicio y funcional). Se trata de facilitar la resolución de problemas de sistemas IoT existentes que incurren en altos costos al diseñar y fabricar sensores y dispositivos IoT debido a una infraestructura distribuida en un BEMS (Figura 11).



Figura 10. Sistema de gestión de la energía en edificios propuesto en (Ke et al., 2020).

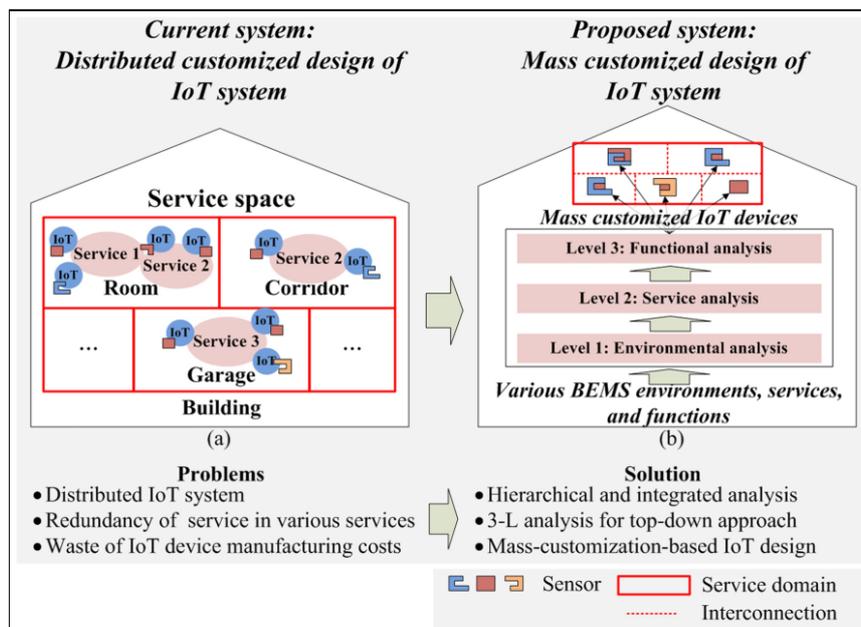


Figura 11. Diferencias entre un sistema IoT típico y la solución de BEMS propuesto en (Park et al., 2016).

En (Mugarza et al., 2019) se propone una arquitectura de software de criticidad mixta para aplicaciones inteligentes de alta disponibilidad de energía. Se presenta el diseño de software de un controlador integrado de energía para edificios (Building Energy Controller, BEC), en el que se definen ocho componentes de aplicación críticos mixtos. Para garantizar un completo aislamiento entre los componentes necesarios en dichos sistemas, se ha propuesto un esquema de partición basado en Integrity RTOS. El diseño presentado se basa en el marco de tiempo de ejecución de Cetratus, que permite la actualización dinámica de dichos componentes de la aplicación (ver Figura 12).

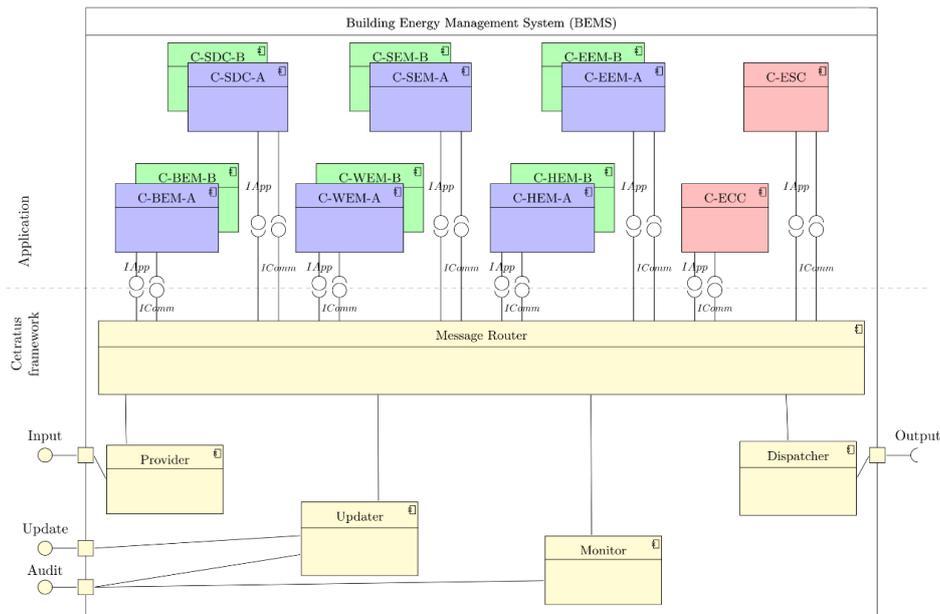


Figura 12. Arquitectura software del BEMS propuesto en (Mugarza et al., 2019).

Los autores en (Na & Lee, 2020) proponen un Fog BEMS que aplica el concepto de computación en la niebla a un BEMS. En lugar de utilizar servidores en la nube centralizados, la computación en la niebla coloca pequeños recursos informáticos (*fog nodes*) en las zonas frontera (*edge*) de una red donde los dispositivos finales están a una distancia de un salto. Al establecerlos junto a los dispositivos finales, los nodos pueden procesar los datos del usuario en tiempo real y utilizar información contextual local. Los recursos informáticos se distribuyen, por lo que un BEMS se vuelve escalable, pudiendo incluir un gran número de dispositivos finales de forma rápida y activa. En esta propuesta, se construyó un banco de pruebas del mundo real en un campus para demostrar la viabilidad del sistema.

El artículo en (Ibaseta et al., 2021) tiene como objetivo demostrar la viabilidad de las propuestas WoT del W3C como una solución para una integración efectiva de dispositivos heterogéneos IoT en un BEMS (Figura 13). El contexto de este trabajo es el proyecto HEART, cuyo objetivo fue diseñar una herramienta para integrar múltiples componentes de un edificio, permitiendo una rehabilitación inteligente. Las recomendaciones WoT ofrecen un mecanismo que se puede utilizar como base para diseñar e implementar una red de sensores, actuadores y otros dispositivos para la modernización inteligente de edificios. Además, la eficiencia de la gestión energética se mejora tanto a través de elementos pasivos (p. ej., aislamiento y uso de materiales de alto rendimiento) como activos (p. ej., control predictivo del aire acondicionado, o monitoreo de la temperatura del agua). El enfoque propuesto en este artículo se puede aplicar no solo a los edificios nuevos, sino también a los existentes, integrando la solución en los dispositivos de la instalación actual.

En (J. Yu et al., 2018) se propone una aproximación WoO (Web of Objects) basado en una arquitectura de dispositivos y objetos para proporcionar servicios y aplicaciones de IoT basados en la Web. Se introducen varios conceptos de red de superposición de servicios para proporcionar *mashups* por federación y composición de servicios. Se describe la arquitectura de implementación de servicios sobre la arquitectura IoT de hogar inteligente en un entorno de *fog computing*. Además, se propone una arquitectura para seleccionar objetos o *things* óptimos a partir de metadatos, recursos y perfiles obtenidos mediante la predicción de energía de edificios inteligentes basada en WoO (ver Figura 14).

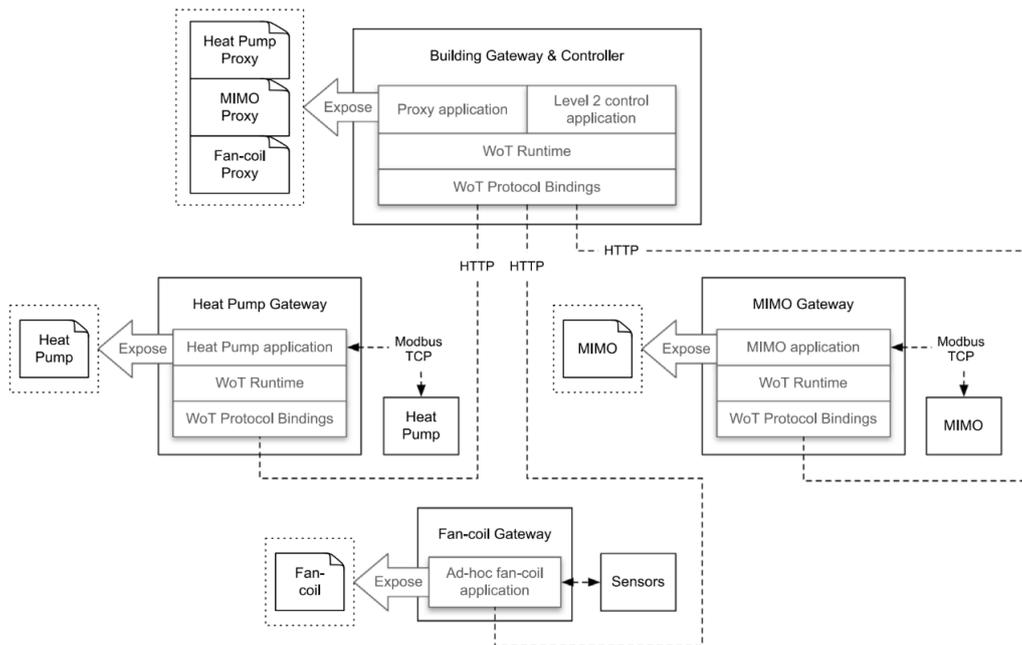


Figura 13. Arquitectura WoT propuesta en (Ibaseta et al., 2021) para la gestión de un BEMS.

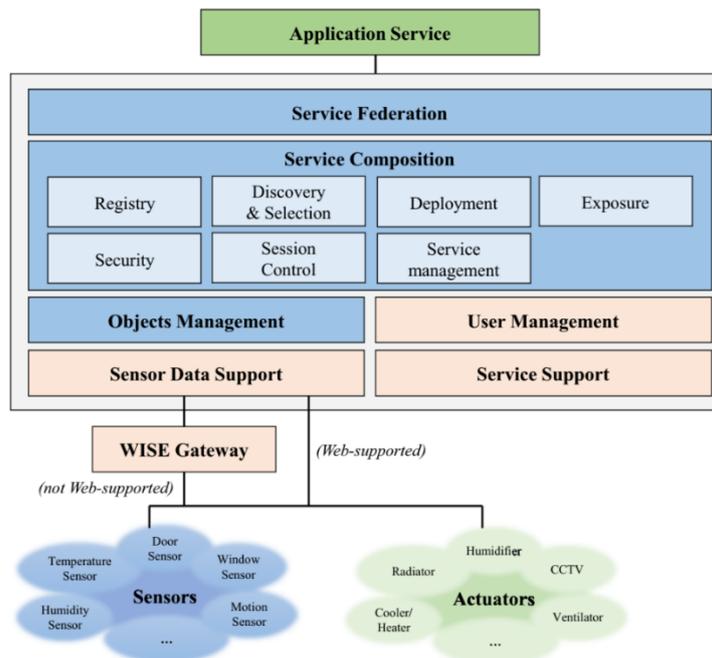


Figura 14. Arquitectura WoO para la gestión de servicios en edificios inteligentes (J. Yu et al., 2018).

4.6 Servicios Web

Para esta categoría, 9 de las 94 publicaciones seleccionadas tienen una relación principal (P) y 7 tienen una vinculación secundaria (S) con el ámbito de servicios web. De los 9 trabajos pertenecientes a la categoría, 3 son publicaciones en revistas internacionales y 6 son comunicaciones en actas de congresos internacionales. A continuación, se revisan los aspectos importantes de aquellas publicaciones consideradas más relevantes.

En (Silva et al., 2020) se propone una arquitectura de ciudades inteligentes con análisis de Big Data incorporado, que se integra con la web a través de una puerta de enlace inteligente. La integración con la web proporciona una plataforma de comunicación universal para superar las incompatibilidades de plataformas de los dispositivos inteligentes. Introdujimos el análisis de Big Data para mejorar la velocidad de procesamiento de datos. En el artículo se evalúan varios conjuntos de datos para determinar los valores de umbral para la toma de decisiones inteligente y para presentar la mejora de rendimiento obtenida en el procesamiento de datos. La arquitectura de integración propuesta (ver Figura 15) hace uso de servicios web RESTful y de la WoT para analizar las mejoras de rendimiento en cuanto al uso de la red y la gestión energética de los edificios inteligentes.

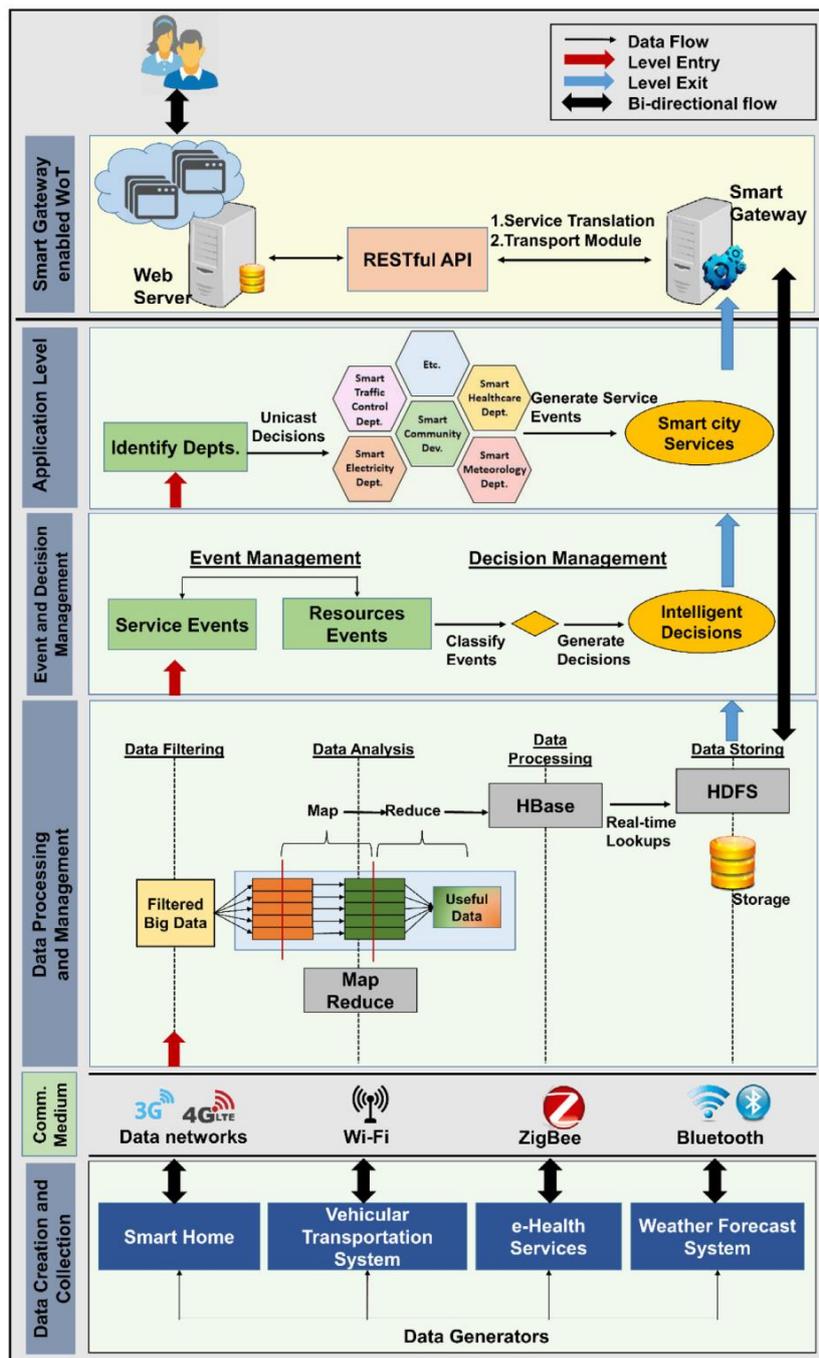


Figura 15. Arquitectura de integración para aproximaciones BigData haciendo uso de la WoT y de servicios web RESTful (Silva et al., 2020).

En (Thielemans et al., 2017) se evalúan los esfuerzos necesarios para integrar la iluminación inteligente con otros sistemas de control basados en sensores/actuadores. En dicho artículo, se revisan y analizan trabajos publicados en este campo, con especial atención a la infraestructura inteligente basada en corriente continua (CC) llamada EDISON, que se dedica principalmente a la iluminación, pero también se aplica a la automatización de edificios en general. La "PowerLAN" de EDISON consiste en una infraestructura basada en CC que ofrece capacidades de telecomunicación y se puede aplicar a escenarios de modernización de iluminación en edificios. Su infraestructura permite la alimentación sencilla y eficiente de dispositivos de CC, como lámparas LED, sensores y microcontroladores, al tiempo que ofrece un canal de comunicación por cable. Para la arquitectura propuesta basada en línea serial de EDISON, se ha desarrollado un servicio web RESTful sobre un contenedor web Java que se ejecuta en una Raspberry Pi, actuando como una puerta de aplicación entre el protocolo de línea serial propietario y HTTP (ver Figura 16). En este artículo, se destaca que los servicios web son bastante intensivos en recursos, generalmente operando en microprocesadores completos con un sistema operativo. Por el contrario, los protocolos MQTT (Message Queue Telemetry Transport) y CoAP (Constrained Application Protocol) son más adecuados para microcontroladores pequeños, ya que están diseñados para dispositivos con recursos limitados. Ambos tipos de aproximaciones para la comunicación son compatibles con el sistema operativo ligero de código abierto Contiki y se pueden utilizar junto con las soluciones basadas en IP de EDISON (inalámbricas y PLC).

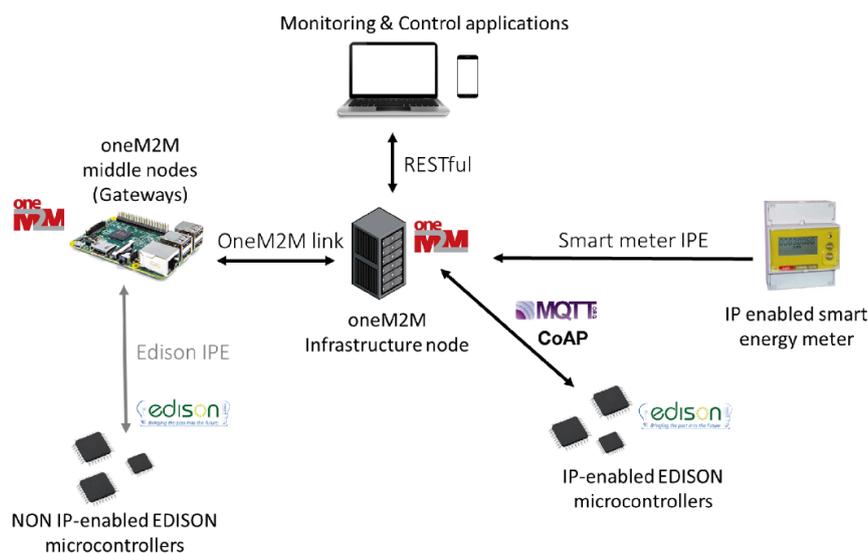


Figura 16. Solución EDISON haciendo uso de oneM2M y servicios RESTful (Thielemans et al., 2017).

En (Bovet & Hennebert, 2014) se describe el creciente uso de sistemas de gestión de edificios (BMS, Building Management System) en oficinas, fábricas o viviendas, con el objetivo de aumentar la comodidad y reducir los costos energéticos. El problema existente es que muchos de los BMS actuales se basan en tecnologías y protocolos propietarios, lo que dificulta su interoperabilidad y evolución. Se observa la aparición de nuevas aplicaciones basadas en el análisis inteligente de datos, capaces de generar modelos más complejos sobre el uso de los edificios. Estas aplicaciones dependen de conjuntos heterogéneos de sensores, datos web, retroalimentación de los usuarios y algoritmos de aprendizaje automático. En este trabajo, se discute el papel de las tecnologías web para estandarizar la capa de aplicación y proporcionar un marco para el desarrollo de aplicaciones avanzadas de gestión de edificios. Se presenta la visión de TASSo, un modelo web en capas que aborda los desafíos actuales y futuros de los sistemas de gestión de edificios (ver Figura 17).

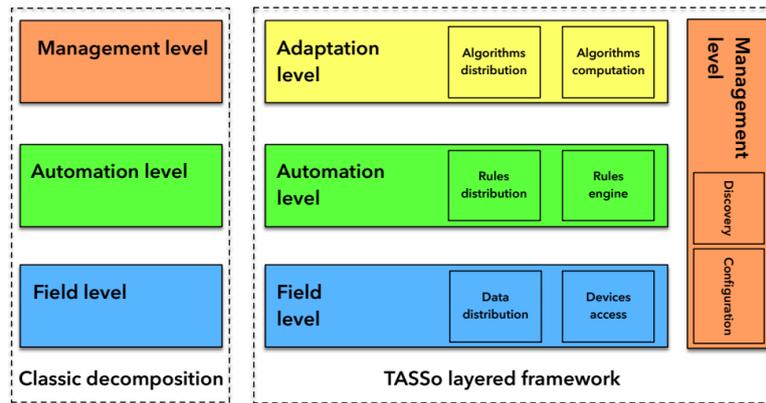


Figura 17. Propuesta de arquitectura TASSo para la gestión de edificios (Bovet & Hennebert, 2014).

En la comunicación descrita en (Bao et al., 2016) se presentan los desafíos y problemas en edificios inteligentes y la Internet de las Cosas (IoT) identificados a través de años de investigación en edificios reales. Para abordar estos desafíos, se ha implementado una arquitectura descentralizada basada en servicios y orientada a mensajes (ver Figura 18). Esta arquitectura utiliza un bus de mensajes IoT transparente en la red y permite componer aplicaciones a partir de servicios auxiliares que facilitan la abstracción de dispositivos, la adaptación de protocolos, la modularidad y la mantenibilidad. Con esta solución, se demuestra la flexibilidad de esta arquitectura mediante la integración y operación simultánea de tres aplicaciones distintas en un laboratorio de edificios inteligentes reales. Estas aplicaciones incluyen visualización de datos energéticos con mejora de privacidad, gestión automatizada de energía en edificios y una interfaz de usuario genérica. Se comparan las ventajas de esta arquitectura con las arquitecturas convencionales y se proporciona una solución de mejores prácticas la gestión de energía en edificios inteligentes usando IoT.

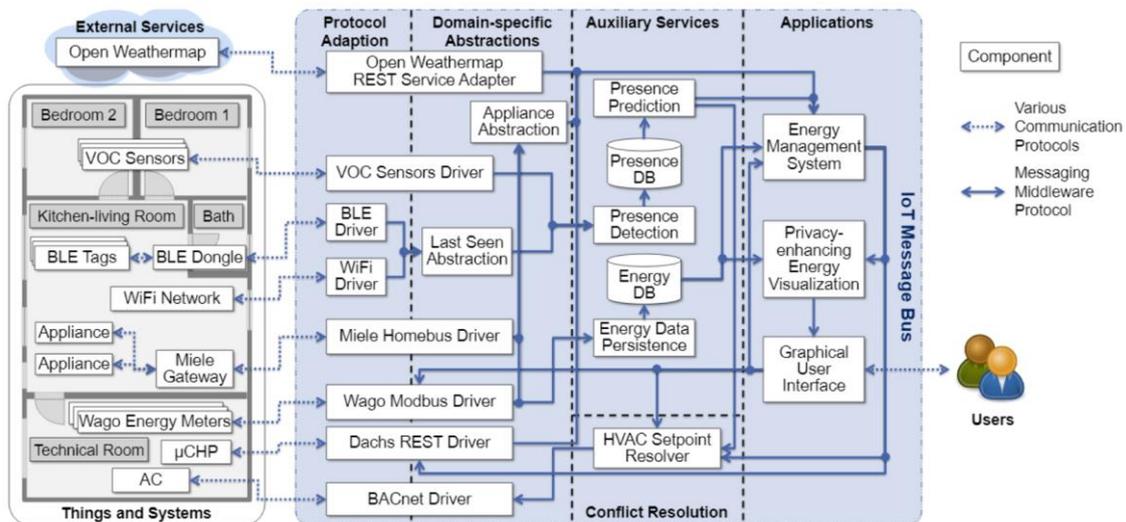


Figura 18. Ejemplo de realización de aplicaciones utilizando servicios auxiliares, sensores, actuadores y adaptación de protocolos (Bao et al., 2016).

En el trabajo presentado en (Haque et al., 2020) se describe presenta un enfoque de tres capas basado en microservicios para el diseño de un sistema de gestión energética de edificios (BEMS, Building Energy Management System) basado en software como servicio (SaaS). La capa central de la arquitectura (ver Figura 19) está compuesta por microservicios que realizan las funcionalidades principales del sistema, mientras que la capa de API sirve

como una puerta de enlace entre el sistema central y los servicios de front-end. Por último, la capa de servicio proporciona las funcionalidades y aplicaciones de SaaS que experimenta el usuario final. Este artículo presenta un sistema de gestión energética basado en microservicios que puede ser utilizado de manera efectiva por un usuario final para monitorear y controlar equipos eléctricos, y puede integrarse en una red de sistema de energía grande. La arquitectura propuesta se ha utilizado para desarrollar una interfaz web basada en la nube y una aplicación para iOS y Android de un sistema de gestión energética de edificios. El enfoque demuestra mejoras en el rendimiento y el desarrollo para un sistema BEMS desarrollado utilizando un enfoque basado en microservicios.

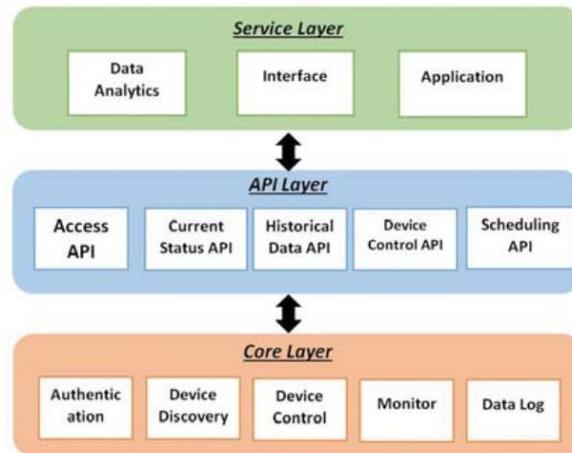


Figura 19. Arquitectura de microservicios de tres capas para la gestión de un BEMS (Haque et al., 2020).

En el trabajo presentado en (Bandara et al., 2017) se describe un enfoque alternativo para estandarizar las APIs RESTful en el contexto de edificios inteligentes. Para abordar la variedad de dispositivos, se diseña una API para cada dispositivo con dos puntos de acceso: uno para los atributos y otro para el estado del dispositivo (ver Figura 20). Esto permite que los desarrolladores trabajen con una abstracción del dispositivo y facilita su utilización en diferentes aplicaciones. Adicionalmente, se proporcionan descripciones de funcionalidad para ayudar a los desarrolladores a comprender mejor cómo utilizar los dispositivos en sus aplicaciones. Estas descripciones se incluyen en el punto de acceso de atributos de la API. Para evaluar este enfoque, se implementó una API de edificio inteligente en un entorno real y se desarrolló una aplicación de habitación inteligente como ejemplo de uso. Se comparó el proceso de desarrollo utilizando el estilo tradicional de RESTful con el enfoque propuesto. Los resultados mostraron que el diseño de la API propuesta logra reducir los costos de desarrollo y facilita la creación de aplicaciones.

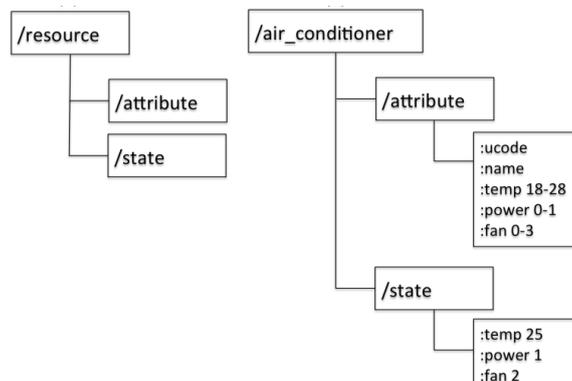


Figura 20. Abstracción para la definición de la API de un dispositivo inteligente (Bandara et al., 2017).

En (Kwon et al., 2019), los autores proponen IBFRAME, un *framework* de procesamiento de datos para la gestión inteligente de edificios basada en IoT. El *framework* propuesto tiene como objetivo proporcionar servicios de recopilación, monitoreo, procesamiento, enrutamiento y análisis de datos para respaldar una variedad de aplicaciones inteligentes en edificios (ver Figura 21). Los recolectores de datos del marco recopilan diferentes tipos de datos de fuentes externas, como bases de datos meteorológicas y dispositivos medidores de energía. Este *framework* proporciona no solo análisis de valores ambientales en interiores en tiempo real, como la detección de ocupantes y la medición del confort térmico, sino que también ofrece servidores de aplicaciones y administración de dispositivos de sensores IoT, como un servidor WebSocket para datos de sensores, un agente de mensajes de publicación/suscripción y un servicio de notificación.

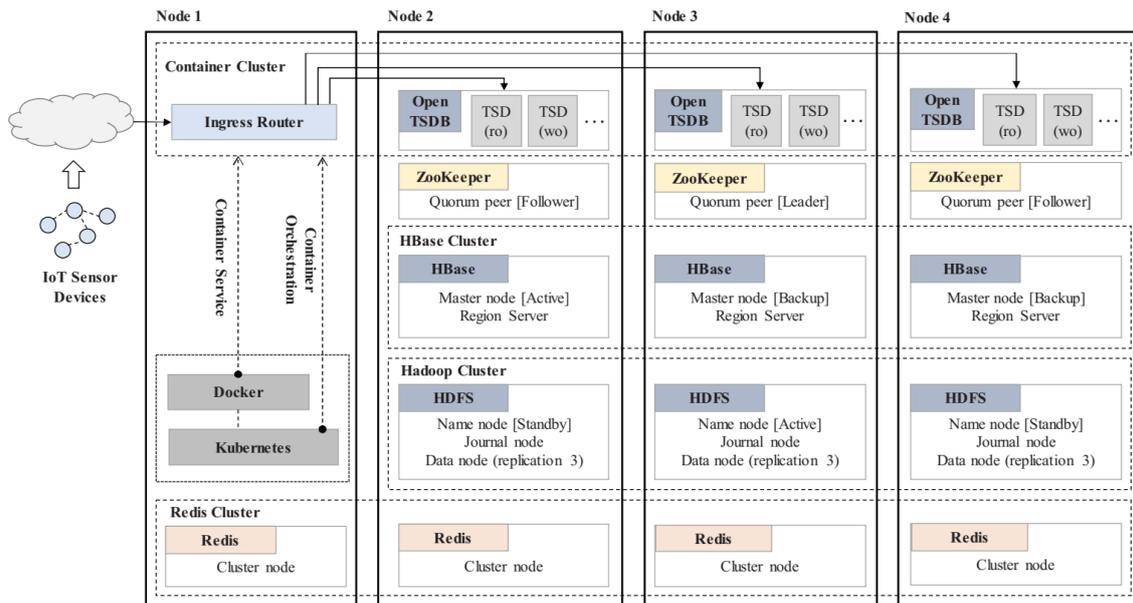


Figura 21. Estructura del *framework* IBFRAME para la gestión de edificios inteligentes (Kwon et al., 2019).

Tal y como se describe en el trabajo (Peng et al., 2015), mediante servicios web es posible obtener información detallada sobre el entorno y controlar dispositivos remotos con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de los edificios. Esto permite escribir reglas flexibles que utilicen estos servicios para controlar los electrodomésticos y adaptar su funcionamiento en función del contexto adquirido, para llegar a ser más eficientes en el consumo energético vinculado a estas instalaciones. Sin embargo, debido a la complejidad de un edificio, resulta complicado para personas sin experiencia detallar las políticas de control de energía sin un estudio exhaustivo del edificio en cuestión. En el artículo mencionado, se propone un lenguaje de descripción de políticas energéticas llamado EPDL, que es fácil de usar y que permite escribir de forma sencilla políticas de control de energía para edificios inteligentes (ver Figura 22). El artículo analiza la facilidad de lectura y escritura del lenguaje EPDL y se valida que se trata de una herramienta eficiente para que usuarios no expertos puedan redactar políticas de control de energía para edificios inteligentes.

```

1 rule "uri:skl:names:dcrdl:1.0:ruleid:1" when {
2     building.floors["3F"].spaces["3L-5"].sba_get_PeriodElectricityConsumption("00:15:00") > 0.35
3 }then{
4     building.floors["3F"].spaces["3L-5"].appliances["AirConditioner1"].sba_ctr_ac_off
5     building.floors["3F"].spaces["3L-5"].appliances["AirConditioner2"].sba_ctr_ac_off
6 }

```

Figura 22. Regla en formato EPDL para el apagado/encendido de un aire acondicionado (Peng et al., 2015).

En (Davidsson et al., 2019) se desarrolló una plataforma abierta llamada Elis que incluye un ecosistema de servicios móviles y APIs abiertas, además de protocolos para el desarrollo de nuevos servicios y productos. La plataforma tiene una capa “adaptador” que permite que la plataforma interopere con cualquier sistema de gestión de edificios o dispositivo individual. La plataforma Elis hace posible que actores externos desarrollen aplicaciones móviles de eficiencia energética que funcionarán independientemente de qué BMS y dispositivos se utilicen en el edificio (Figura 23).

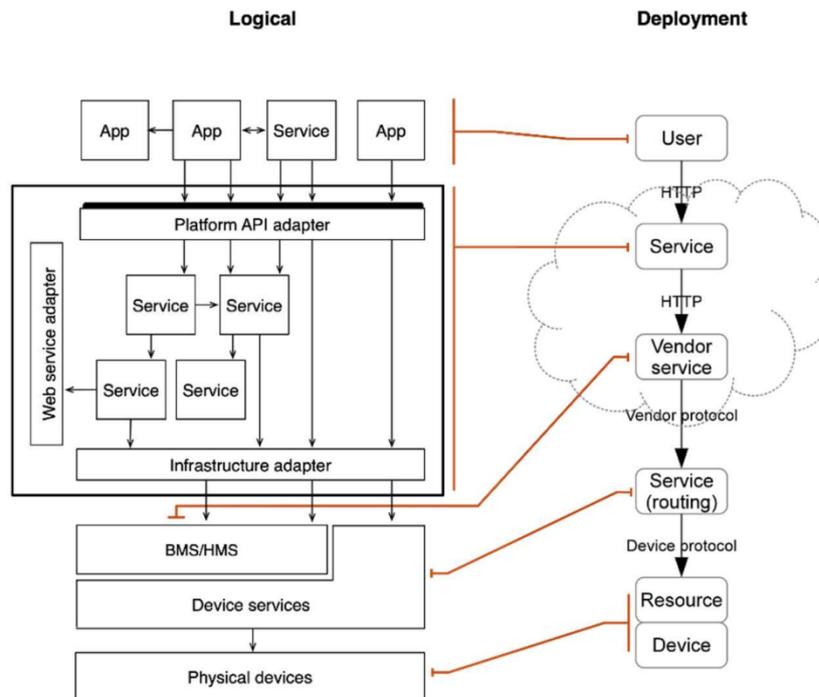


Figura 23. Vista de la lógica de la propuesta descrita en (Davidsson et al., 2019) que muestra las dependencias de diseño de la plataforma a los sistemas propietarios.

4.7 Surveys

Del conjunto de publicaciones seleccionadas en este estudio, existe un subconjunto de ellas que, aunque tratan sobre una o varias de las categorías establecidas (i.e., energía, indicadores, IoT, inteligencia artificial, arquitecturas, o servicios web), siguen un enfoque propio de una revisión de la literatura o survey. Por ello, en esta sección se revisan los aspectos más importantes de un subconjunto de las 14 publicaciones de este tipo.

El estudio realizado en (L. Yu et al., 2021) se centra en la importancia y urgencia de desarrollar tecnologías de gestión energética de edificios inteligentes (SBEM, Smart Building Energy Management) para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de carbono en los edificios a nivel mundial. Se mencionan varios desafíos en el desarrollo de estas tecnologías, como la dificultad de crear un modelo explícito de la dinámica térmica del edificio preciso y eficiente para el control del mismo, la presencia de muchos parámetros inciertos del sistema, restricciones operativas espacialmente y temporalmente acopladas, la incapacidad de resolver problemas de optimización energética de edificios en tiempo real con métodos tradicionales debido a su gran espacio de soluciones, y la falta de versatilidad de los métodos tradicionales para diferentes entornos de edificios. El estudio destaca el potencial de la tecnología de inteligencia artificial, específicamente el aprendizaje profundo

por refuerzo (DRL, Deep Reinforcement Learning), para abordar estos desafíos. Se analiza el aumento en el uso de DRL para SBEM, pero falta una visión general sistemática de los diferentes métodos de DRL utilizados en este campo. Por lo tanto, este artículo proporciona una revisión exhaustiva de DRL para SBEM desde la perspectiva de la escala del sistema. Se identifican problemas no resueltos existentes y se señalan posibles direcciones futuras de investigación, como son la optimización multiobjetivo o la separación y distribución de servicios en *microgrids*.

En (Dinh & Kim, 2012) se realiza una revisión y análisis de las ventajas de los enfoques principales actuales y emergentes que podrían ser adecuados para BMS. Específicamente, se discuten desafíos como la interoperabilidad, integración, sobrecarga y limitación de ancho de banda de las WSNs en BMS (Figura 24). Se resaltan las ventajas de un enfoque de arquitectura basada en IP y RESTful como la solución más adecuada para BMS utilizando WSNs (BMS-WSN). El artículo también describe nuestra dirección futura y diseño para BMS-WSN basado en estas ventajas. El propósito es permitir la interacción de los usuarios con BMS-WSN de la misma manera que con cualquier sitio web, al tiempo que se garantiza la eficiencia energética. Además, se introduce una implementación y evaluación de un caso de prueba de una aplicación de BMS en este artículo para demostrar la viabilidad y los beneficios de la arquitectura basada en IP y RESTful para BMS.

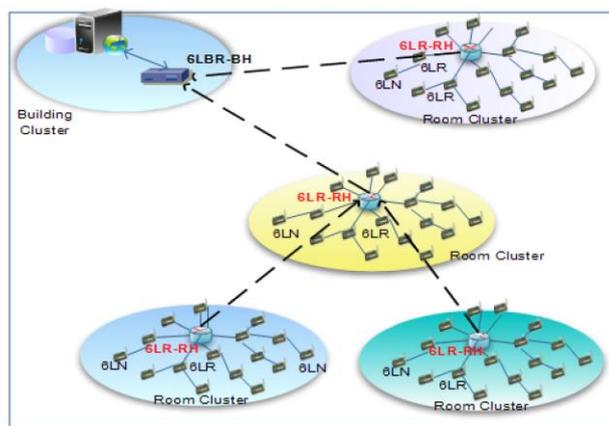


Figura 24. Diseño de una arquitectura BMS-WSN (Dinh & Kim, 2012).

En el estudio realizado en (Djenouri et al., 2019), los autores proporcionan una encuesta exhaustiva y una taxonomía de soluciones de aprendizaje automático en aplicaciones de edificios inteligentes. Las soluciones presentadas se han dividido en dos clases principales. El primer grupo son las soluciones centradas en los ocupantes, en las que se han utilizado enfoques de ML para lidiar con características relacionadas con los ocupantes. La segunda categoría principal incluye soluciones en las que se utiliza ML para estimar aspectos relacionados con la energía o dispositivos. Se han presentado diferentes soluciones en cada categoría, se han comparado y se han discutido desde la perspectiva de ML, así como los aspectos técnicos y de aplicación de sus implementaciones y experimentaciones.

En el estudio presentado en (De Paola et al., 2014) se analizan los aspectos tecnológicos, arquitectónicos y algorítmicos que contribuyen al diseño BMS. Este trabajo establece que las pautas para diseñar un BMS se derivan de la política elegida para el ahorro de energía. Dependiendo de su complejidad y de la posibilidad de futuras expansiones, el diseñador deberá seleccionar la tecnología sensorial y de comunicación a implementar en el edificio, así como la arquitectura del sistema en su conjunto y los módulos de software que brinden soporte inteligente.

5 Conclusiones

El objetivo de este estudio era describir los resultados obtenidos a partir del análisis del estado del arte sobre la implementación de tecnologías para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes, además del análisis de soluciones TIC existentes en la gestión de edificios públicos.

El presente informe técnico ha sido elaborado mediante la realización de un estudio sistemático de revisión de trabajos existentes en la literatura. Dicho estudio se basó en metodologías existentes en ingeniería del software que establecen un conjunto de pasos bien definido (Kuhmann et al., 2017; Petersen et al., 2008, 2015). En primer lugar, se llevó a cabo el establecimiento de un conjunto de palabras clave para, posteriormente, poder elaborar las consultas sobre las bases de datos de publicaciones. Tras la ejecución de dichas consultas, se construyó una colección constituida por el conjunto de resultados obtenidos a partir de los repositorios utilizados y teniendo en cuenta una serie de criterios específicos para el filtrado de dichos resultados. Finalmente, los trabajos seleccionados fueron analizados para poder extraer información específica de utilidad para el desarrollo de soluciones de edificios inteligentes y para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes.

El análisis de los resultados del estudio pone de manifiesto que un alto porcentaje (27%) se centra en propuestas orientadas a la implementación de soluciones más relacionadas con la capa hardware, cuyas contribuciones están vinculadas al desarrollo, construcción o modificación de dispositivos ciberfísicos y/o arquitecturas y sistemas IoT.

En lo que respecta a una capa de abstracción más elevada, a nivel software existe un porcentaje importante (19%) de propuestas orientadas a la implementación de arquitecturas software, al diseño de sistemas software completos, o al desarrollo de componentes software relacionados con la gestión de edificios inteligentes.

En el estudio realizado, se aprecia un número considerable (con un 14%) de propuestas relacionadas con la aplicación de técnicas de inteligencia artificial a la gestión de edificios o a la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes.

Con respecto a los indicadores sobre edificios inteligentes, existe un reducido número de publicaciones (2%) cuyas principales contribuciones se centran en la construcción de indicadores relacionados con la transformación o gestión de edificios inteligentes. Además, no existen de trabajos de investigación que profundicen en la vinculación de soluciones TIC con el concepto del indicador SRI (Smart Readiness Indicator), que ha sido recientemente adoptado como el esquema de referencia para la categorización de edificios inteligentes.

En lo relativo a la aplicación de servicios web a este tipo de soluciones, en el estudio realizado también se seleccionaron un número considerable de publicaciones (14%) que se centran en propuestas orientadas al desarrollo servicios de utilidad para la gestión de edificios inteligentes, o a la construcción de interfaces de programación de aplicaciones (Application Programming Interface, API). Tras el análisis de los trabajos que se centran en el uso de tecnologías web, incluyendo el desarrollo de servicios web y de APIs RESTful, se observa que, en la mayoría de los casos, esta tecnología se utiliza como una solución de integración para las diferentes partes del sistema. No obstante, en los trabajos analizados no se ha identificado una estructura, un esquema o un patrón común para llevar a cabo la

implementación de la arquitectura software (en general) de la arquitectura orientada a servicios (en particular) que proporciona el soporte del sistema de gestión de un edificio o de un edificio inteligente.

Varias de las propuestas analizadas utilizan una capa de abstracción de nivel superior, como es el caso del paradigma de la WoT, para tratar de homogeneizar la descripción de los dispositivos ciberfísicos, así como el acceso a sus capacidades de interacción. Sin embargo, no existe un catálogo de servicios unificado ni un sistema común de representación en los sistemas de gestión de edificios inteligentes (BMS) o en los sistemas de gestión de energía en edificios inteligentes (BEMS).

Tras el análisis realizado en el presente estudio, se ha identificado que, comúnmente, existen cuatro grandes agrupaciones de servicios que son de utilidad para este tipo de sistemas: (a) servicios de acceso a dispositivos ciberfísicos, (b) servicios de acceso a datos, (c) servicios de predicción, y (d) servicios de simulación/emulación. Por este motivo, la Figura 25 trata de representar una propuesta para la construcción de soluciones TIC innovadoras para la transformación de edificios existentes en edificios inteligentes.

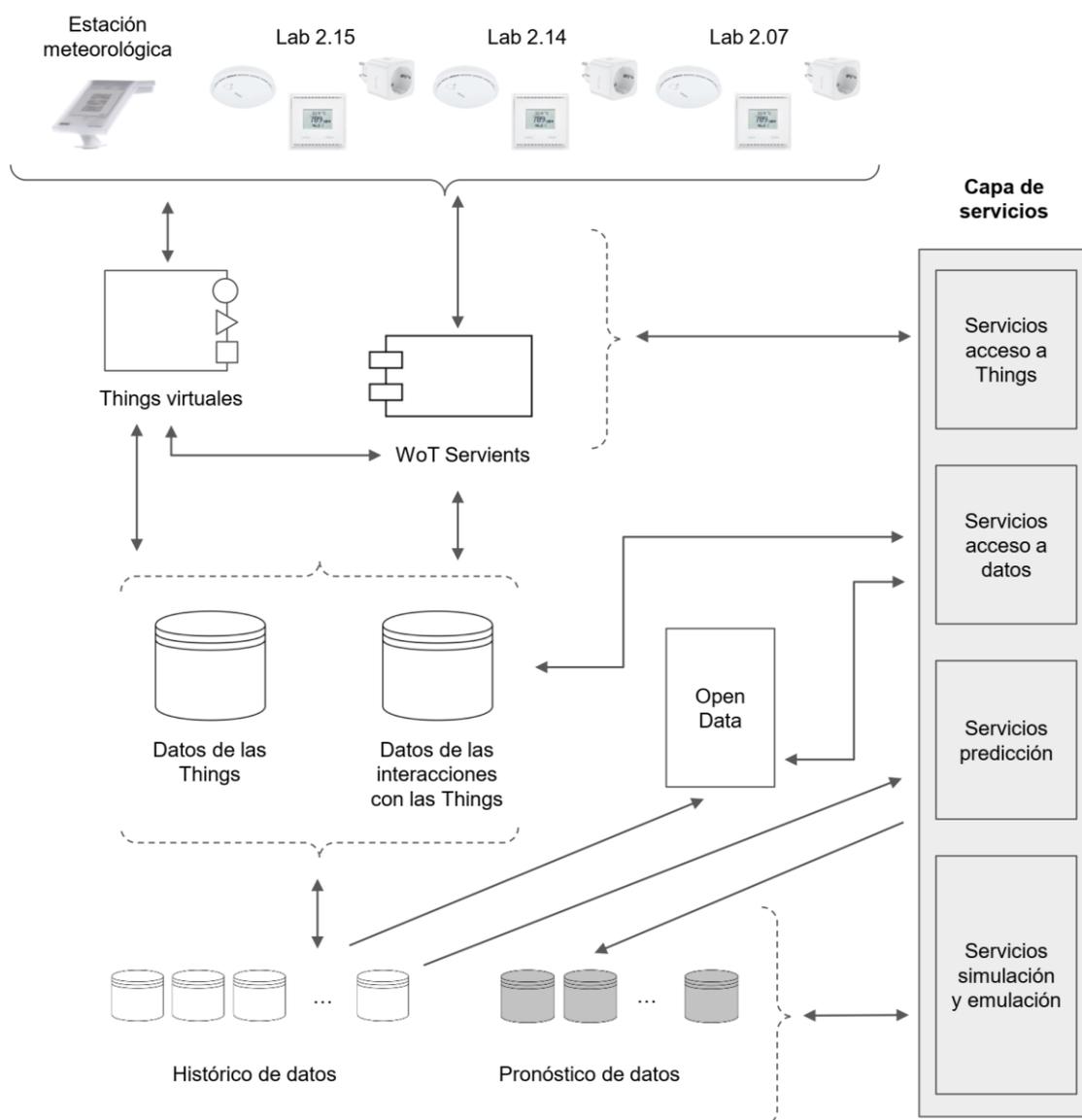


Figura 25. Propuesta para el desarrollo de soluciones TIC en la gestión de edificios inteligentes.

En la propuesta representada en la Figura 25, así como en la mayoría de las soluciones analizadas en este estudio, existe una pasarela que permite la comunicación con los dispositivos ciberfísicos. En su diseño, se ha considerado una capa física (dispositivos ciberfísicos) y una capa abstracta (dispositivos virtuales), además de otras dos capas de datos: una de ellas almacena datos de interacción y datos proporcionados de los dispositivos, y en la otra capa se almacena histórico de datos e información relativa a pronósticos. La arquitectura cuenta también con una capa de servicios y ha sido diseñada conforme a las capacidades de datos abiertos y estándares de la Web of Things del W3C.

Mediante la estructura propuesta, se dispondría de un mecanismo flexible y dinámico para la construcción de sistemas distribuidos que permitan la gestión de edificios inteligentes. Además, esta propuesta podría utilizarse para el desarrollo de una arquitectura de un sistema unificado para la adquisición, validación, almacenamiento, consulta y análisis de datos procedentes de dispositivos de un edificio inteligente.

6 Referencias

- Aybar-Mejía, M., Mariano-Hernández, D., Marte, J. C., Contreras, A., & Arias, J. (2022). Integration of Internet of Things Technologies in Government Buildings Through Low-Cost Solutions. *Communications in Computer and Information Science*, 1555 CCIS, 311–319. https://doi.org/10.1007/978-3-030-96753-6_22/FIGURES/9
- Bandara, S., Yashiro, T., Koshizuka, N., & Sakamura, K. (2017). Towards a standard API design for open services in smart buildings. *Proceedings - 2016 TRON Symposium: The IoT in Action, TRONSHOW 2016*. <https://doi.org/10.1109/TRONSHOW.2016.7842883>
- Bao, K., Mauser, I., Kochannek, S., Xu, H., & Schmeck, H. (2016). A Microservice Architecture for the Intranet of Things and Energy in Smart Buildings: Research Paper. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Mashups of Things and APIs*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3007203.3007215>
- Bovet, G., & Hennebert, J. (2014). Will Web Technologies Impact on Building Automation Systems Architecture? *Procedia Computer Science*, 32, 985–990. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2014.05.522>
- Bui, V., Le, N. T., Nguyen, V. H., Kim, J., & Jang, Y. M. (2021). Multi-Behavior with Bottleneck Features LSTM for Load Forecasting in Building Energy Management System. *Electronics*, 10(9), 1026. <https://doi.org/10.3390/electronics10091026>
- Davidsson, P., Eklund, U., & Olsson, C. M. (2019). Elis: An Open Platform for Mobile Energy Efficiency Services in Buildings. *Sustainability 2019, Vol. 11, Page 858, 11(3)*, 858. <https://doi.org/10.3390/SU11030858>
- De Paola, A., Ortolani, M., Lo Re, G., Anastasi, G., & Das, S. K. (2014). Intelligent Management Systems for Energy Efficiency in Buildings. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 47(1). <https://doi.org/10.1145/2611779>
- Dinh, N.-T., & Kim, Y. (2012). RESTful Architecture of Wireless Sensor Network for Building Management System. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 6(1), 46–63. <https://doi.org/10.3837/tiis.2012.01.003>
- Djenouri, D., Laidi, R., Djenouri, Y., & Balasingham, I. (2019). Machine Learning for Smart Building Applications. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52(2). <https://doi.org/10.1145/3311950>
- Elkhoukhi, H., Bakhouya, M., El Ouadghiri, D., & Hanifi, M. (2022). Using Stream Data Processing for Real-Time Occupancy Detection in Smart Buildings. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 2371, 22(6)*, 2371. <https://doi.org/10.3390/S22062371>
- Gupta, M., & Phillips, N. (2020). Knowledge Discovery Using Topological Analysis for Building Sensor Data. *Sensors 2020, Vol. 20, Page 4914, 20(17)*, 4914. <https://doi.org/10.3390/S20174914>
- Haque, A., Rahman, R., & Rahman, S. (2020). Microservice-based architecture of a software as a service (SaaS) building energy management platform. *6th IEEE International*

Energy Conference, ENERGYCon 2020, 967–972.
<https://doi.org/10.1109/ENERGYCON48941.2020.9236617>

- Ibaseta, D., García, A., Álvarez, M., Garzón, B., Díez, F., Coca, P., Pero, C. Del, & Molleda, J. (2021). Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102637. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102637>
- Iddianozie, C., & Palmes, P. (2020). Towards smart sustainable cities: Addressing semantic heterogeneity in Building Management Systems using discriminative models. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102367. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102367>
- Javed, A., Larijani, H., Ahmadiania, A., Emmanuel, R., Mannion, M., & Gibson, D. (2017). Design and Implementation of a Cloud Enabled Random Neural Network-Based Decentralized Smart Controller with Intelligent Sensor Nodes for HVAC. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(2), 393–403. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2627403>
- Jin, W., Lim, S., Woo, S., Park, C., & Kim, D. (2022). Decision-making of IoT device operation based on intelligent-task offloading for improving environmental optimization. *Complex and Intelligent Systems*, 8(5), 3847–3866. <https://doi.org/10.1007/S40747-022-00659-Z/FIGURES/18>
- Karthick, T., Charles Raja, S., Jeslin Drusila Nesamalar, J., & Chandrasekaran, K. (2021). Design of IoT based smart compact energy meter for monitoring and controlling the usage of energy and power quality issues with demand side management for a commercial building. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 26, 100454. <https://doi.org/10.1016/J.SEGAN.2021.100454>
- Ke, J., Qin, Y., Wang, B., Yang, S., Wu, H., Yang, H., & Zhao, X. (2020). Data-driven predictive control of building energy consumption under the IoT architecture. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/8849541>
- Kuhrmann, M., Fernández, D. M., & Daneva, M. (2017). On the pragmatic design of literature studies in software engineering: an experience-based guideline. *Empirical Software Engineering*, 22(6), 2852–2891. <https://doi.org/10.1007/s10664-016-9492-y>
- Kumar, T., Srinivasan, R., & Mani, M. (2022). An Energy-based Approach to Evaluate the Effectiveness of Integrating IoT-based Sensing Systems into Smart Buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102225. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2022.102225>
- Kwon, D., Ok, K., & Ji, Y. (2019). IBFRAME: IoT Data Processing Framework for Intelligent Building Management. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Big Data, Big Data 2019*, 5233–5238. <https://doi.org/10.1109/BIGDATA47090.2019.9006367>
- Lee, J., Kim, T. W., Lee, C., & Koo, C. (2021). A scalable platform for investigating the space-specific features of the temporal energy usage pattern and saving potential with real-time bigdata. *Journal of Cleaner Production*, 314, 128028. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128028>

- Lork, C., Choudhary, V., Ul Hassan, N., Tushar, W., Yuen, C., Ng, B. K. K., Wang, X., & Liu, X. (2019). An Ontology-Based Framework for Building Energy Management with IoT. *Electronics* 2019, Vol. 8, Page 485, 8(5), 485. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS8050485>
- Luo, X. J., Oyedele, L. O., Ajayi, A. O., Monyei, C. G., Akinade, O. O., & Akanbi, L. A. (2019). Development of an IoT-based big data platform for day-ahead prediction of building heating and cooling demands. *Advanced Engineering Informatics*, 41, 100926. <https://doi.org/10.1016/J.AEI.2019.100926>
- Medina-Gracia, R., De Castro, A. D. R. G., Garrido-Zafra, J., Moreno-Munoz, A., & Canete-Carmona, E. (2019). Power Quality Sensor for Smart Appliance's Self-Diagnosing Functionality. *IEEE Sensors Journal*, 19(20), 9486–9495. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2924574>
- Moreno, M. V., Úbeda, B., Skarmeta, A. F., & Zamora, M. A. (2014). How can We Tackle Energy Efficiency in IoT Based Smart Buildings? *Sensors* 2014, Vol. 14, Pages 9582-9614, 14(6), 9582–9614. <https://doi.org/10.3390/S140609582>
- Mugarza, I., Amurrio, A., Azketa, E., & Jacob, E. (2019). Dynamic Software Updates to Enhance Security and Privacy in High Availability Energy Management Applications in Smart Cities. *IEEE Access*, 7, 42269–42279. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2905925>
- Na, U., & Lee, E. K. (2020). Fog BEMS: An Agent-Based Hierarchical Fog Layer Architecture for Improving Scalability in a Building Energy Management System. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 2831, 12(7), 2831. <https://doi.org/10.3390/SU12072831>
- Nugur, A., Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M., & Rahman, S. (2018). Design and Development of an IoT Gateway for Smart Building Applications. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2885652>
- Park, S., Park, S., Choi, M. I., Lee, S., Lee, T., Kim, S., Cho, K., & Park, S. (2020). Reinforcement Learning-Based BEMS Architecture for Energy Usage Optimization. *Sensors* 2020, Vol. 20, Page 4918, 20(17), 4918. <https://doi.org/10.3390/S20174918>
- Park, S., Park, S., Park, S., & Byun, J. (2016). Design of a mass-customization-based cost-effective Internet of Things sensor system in smart building spaces. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 12(8). https://doi.org/10.1177/15501477166660895/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_15501477166660895-FIG9.JPEG
- Peng, X., Bessho, M., Koshizuka, N., & Sakamura, K. (2015). EPDL: Supporting Context-Based Energy Control Policy Design in IoT-Enabled Smart Buildings: Programming the Physical World with EPDL. *2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*, 297–303. <https://doi.org/10.1109/DSDIS.2015.17>
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., & Mattsson, M. (2008). Systematic Mapping Studies in Software Engineering. *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*, 68–77. <https://doi.org/10.14236/EWIC/EASE2008.8>

- Petersen, K., Vakkalanka, S., & Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and Software Technology*, 64, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.03.007>
- Petrie, C., Gupta, S., Rao, V., & Nutter, B. (2018). Energy efficient control methods of HVAC systems for smart campus. *IEEE Green Technologies Conference, 2018-April*, 133–136. <https://doi.org/10.1109/GREENTECH.2018.00032>
- Sembroiz, D., Careglio, D., Ricciardi, S., & Fiore, U. (2019). Planning and operational energy optimization solutions for smart buildings. *Information Sciences*, 476, 439–452. <https://doi.org/10.1016/J.INS.2018.06.003>
- Sharma, D., Rehu, J., Käsälä, K., & Ailisto, H. (2021). An Automatic Aggregator of Power Flexibility in Smart Buildings Using Software Based Orchestration. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 867, 21(3)*, 867. <https://doi.org/10.3390/S21030867>
- Shen, Z., Zhang, T., Jin, J., Yokota, K., Tagami, A., & Higashino, T. (2019). ICCF: An Information-Centric Collaborative Fog Platform for Building Energy Management Systems. *IEEE Access*, 7, 40402–40415. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906645>
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2020). Integration of Big Data analytics embedded smart city architecture with RESTful web of things for efficient service provision and energy management. *Future Generation Computer Systems*, 107, 975–987. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2017.06.024>
- Teixeira, N., Barreto, R., Gomes, L., Faria, P., & Vale, Z. (2022). A Trustworthy Building Energy Management System to Enable Direct IoT Devices' Participation in Demand Response Programs. *Electronics 2022, Vol. 11, Page 897, 11(6)*, 897. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS11060897>
- Thielemans, S., Di Zenobio, D., Touhafi, A., Lataire, P., & Steenhaut, K. (2017). DC Grids for Smart LED-Based Lighting: The EDISON Solution. *Energies 2017, Vol. 10, Page 1454, 10(10)*, 1454. <https://doi.org/10.3390/EN10101454>
- Vinnarasi, A., & Sangeetha, M. (2021). Comfort Cognitive IoT for Efficient Monitoring and Predictive in Building Management Systems. *2021 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2021*, 345–349. <https://doi.org/10.1109/WISPNET51692.2021.9419408>
- Yu, J., Kim, M., Bang, H. C., Bae, S. H., & Kim, S. J. (2016). IoT as a applications: cloud-based building management systems for the internet of things. *Multimedia Tools and Applications*, 75(22), 14583–14596. <https://doi.org/10.1007/S11042-015-2785-0/FIGURES/5>
- Yu, J., Lee, N. K., Pyo, C. S., & Lee, Y. S. (2018). WISE: web of object architecture on IoT environment for smart home and building energy management. *Journal of Supercomputing*, 74(9), 4403–4418. <https://doi.org/10.1007/S11227-016-1921-6/FIGURES/9>

- Yu, L., Qin, S., Zhang, M., Shen, C., Jiang, T., & Guan, X. (2021). A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(15), 12046–12063. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3078462>
- Zhang, X., Pipattanasomporn, M., Chen, T., & Rahman, S. (2020). An IoT-Based Thermal Model Learning Framework for Smart Buildings. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1), 518–527. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2951106>

7 Anexo: Lista publicaciones seleccionadas

En la tabla que se muestra a continuación, se incluye la lista completa de publicaciones seleccionadas como conjunto final del estudio realizado. En dicha tabla se indica la categoría principal (P) y las categorías secundarias a las que pertenece cada publicación, que pueden ser las siguientes: energía (E),

	E	I	IoT	IA	AS	SW	S
Experimental Evaluation of a Data Driven Cooling Optimization Framework for HVAC Control in Commercial Buildings	P		S		S		
Energy Efficient Control Methods of HVAC Systems for Smart Campus	P		S				
Formulating smart integrated workspace concept to improve energy efficiency	P		S				
How can We Tackle Energy Efficiency in IoT Based Smart Buildings?	P		S				
Implementation of a Demand Elasticity Model in the Building Energy Management System	P		S				
Information Provision System in a Home Energy and Comfort Management System for Energy Conservation	P		S				
Intelligent Eco-Building Management System	P		S				
Movement Based Energy Management Models for Smart Buildings	P		S				
Planning and operational energy optimization solutions for smart buildings	P		S				
Real Time Net Zero Energy Building Energy Manager with Heterogeneous Wireless Ad hoc Network Adaptable To IoT Architectures	P		S				
Social Internet of Things (SIoT) System Model Simulation for City Buildings: Bangladesh Perspective	P		S				
Smart Building Energy Management using Big Data Analytic Approach	P			S	S		
Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco	P				S		
An Energy-based Approach to Evaluate the Effectiveness of Integrating IoT-based Sensing Systems into Smart Buildings	S	P	S				
Knowledge Discovery Using Topological Analysis for Building Sensor Data	S	P	S				
Using Stream Data Processing for Real-Time Occupancy Detection in Smart Buildings	S	S	S	P			
Sensors and control solutions for Smart-IoT facade modules	S		P				
An IoT-Based Thermal Model Learning Framework for Smart Buildings	S		P		S		
Design of IoT based smart compact energy meter for monitoring and controlling the usage of energy and power quality issues with demand side management for a commercial building	S		P		S		
GeoAware: A Hybrid Indoor and Outdoor Localization Agent for Smart Buildings	S		P		S		
ICCF: An Information-Centric Collaborative Fog Platform for Building Energy Management Systems	S		P		S		
Publish-Subscribe Communication in Building Management Systems over Named Data Networking	S		P		S		
Design and Development of an IoT Gateway for Smart Building Applications	S		P			S	
Anomaly Detection in IoT-Based PIR Occupancy Sensors to Improve Building Energy Efficiency	S		P				

Decision-making of IoT device operation based on intelligent-task offloading for improving environmental optimization	S		P	S			
Design and implementation of an open-source infrastructure and an intelligent thermostat	S		P				
IMPLEMENTATION OF EFFECTIVE AND LOW-COST BUILDING MONITORING SYSTEM(BMS) USING RASPBERRY PI	S		P				
Innovative Low Power Multiradio Sensing and Control Device for Non-Intrusive Occupancy Monitoring	S		P				
Integration of Internet of Things Technologies in Government Buildings Through Low-Cost Solutions	S		P				
Internet of Things for Green Building Management Disruptive innovations through low-cost sensor technology and artificial intelligence	S		P	S			
IoT as a applications: cloud-based building management systems for the internet of things	S		P				
IoT Based Ambient Monitoring System for Intelligent Buildings	S		P				
IoT Based Intelligent Building Applications in the Context of COVID-19 Pandemic	S		P				
Occupancy Counting With Burst and Intermittent Signals in Smart Buildings	S		P				
Occupancy-Based Adaptive Dimmable Lighting Energy Management Scheme combined with Cyber Physical System	S		P				
Power Quality Sensor for Smart Appliance's Self-Diagnosing Functionality	S		P				
Smart Building Monitoring From Structure to Indoor Environment	S		P				
Design of a mass-customization-based cost-effective Internet of Things sensor system in smart building spaces	S		S		P	S	
Open BMS - IoT driven Architecture for the Internet of Buildings	S		S		P	S	
Space Inference System for Buildings using IoT	S		S	S	P	S	
WISE: web of object architecture on IoT environment for smart home and building energy management	S		S		P	S	
A solution for annotating sensor data streams - An industrial use case in building management system	S		S		P		
A Trustworthy Building Energy Management System to Enable Direct IoT Devices' Participation in Demand Response Programs	S		S		P		
An Automatic Aggregator of Power Flexibility in Smart Buildings Using Software Based Orchestration	S		S		P		
Application of the open-source cloud platform FIWARE for future building energy management systems	S		S		P		
Automatic Information Retrieval and Preprocessing for Energy Management	S		S	S	P		
BEMOSS: An Agent Platform to Facilitate Grid-Interactive Building Operation with IoT Devices	S		S		P		
Data-Driven Predictive Control of Building Energy Consumption under the IoT Architecture	S		S	S	P		
Dynamic Software Updates to Enhance Security and Privacy in High Availability Energy Management Applications in Smart Cities	S		S		P		
Embedded On-line System for Electrical Energy Measurement and Forecasting in Buildings	S		S		P		
Fog BEMS: An Agent-Based Hierarchical Fog Layer Architecture for Improving Scalability in a Building Energy Management System	S		S		P		
Monitoring and control of energy consumption in buildings using WoT: A novel approach for smart retrofit	S		S		P		
Visualizing Building Energy Measurement Data in Mixed Reality Applying BIM	S		S		P		

A Microservice Architecture for the Intranet of Things and Energy in Smart Buildings [Research Paper]	S		S		S	P	
IBFRAME: IoT Data Processing Framework for Intelligent Building Management	S		S		S	P	
A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management	S		S	S	S		P
IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings-Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems	S		S		S		P
Development of an IoT-based big data platform for day-ahead prediction of building heating and cooling demands	S		S	P	S		
Multi-Behavior with Bottleneck Features LSTM for Load Forecasting in Building Energy Management System	S		S	P	S		
Reinforcement Learning-Based BEMS Architecture for Energy Usage Optimization	S		S	P	S		
Toci: Computational Intelligence in an Energy Management System	S		S	P	S		
EPDL: Supporting Context-based Energy Control Policy Design in IoT-enabled Smart Buildings Programing the physical world with EPDL	S		S			P	
Integration of Big Data analytics embedded smart city architecture with RESTful web of things for efficient service provision and energy management	S		S			P	
AN EFFICIENT ENERGY MANAGEMENT IN BUILDINGS USING IoT - A SURVEY	S		S				P
Recent Advances in Internet of Things (IoT) Infrastructures for Building Energy Systems: A Review	S		S				P
Survey of Internet of Things (IoT) Infrastructures for Building Energy Systems	S		S				P
A scalable platform for investigating the space-specific features of the temporal energy usage pattern and saving potential with real-time bigdata	S		S	P			
Comfort Cognitive IoT for Efficient Monitoring and Predictive in Building Management Systems	S		S	P			
Design and Implementation of a Cloud Enabled Random Neural Network-Based Decentralized Smart Controller With Intelligent Sensor Nodes for HVAC	S		S	P			
In-Network Self-Learning Algorithms for BEMS Through a Collaborative Fog Platform	S		S	P			
Random Neural Networks based Cognitive Controller for HVAC in Non-Domestic Building using LoRa	S		S	P			
An Ontology-Based Framework for Building Energy Management with IoT	S				P		
Research on inefficiency analysis method of building energy utilizing time series data	S			S	P		
Elis: An Open Platform for Mobile Energy Efficiency Services in Buildings	S				S	P	
Microservice-based Architecture of a Software as a Service (SaaS) Building Energy Management Platform	S				S	P	
Demystifying Thermal Comfort in Smart Buildings: An Interpretable Machine Learning Approach	S			P	S		
A Review About Energy Management Techniques in Industrial Buildings	S						P
An overview of machine learning applications for smart buildings	S			S			P
Intelligent Management Systems for Energy Efficiency in Buildings: A Survey	S			S			P
Machine Learning for Smart Building Applications: Review and Taxonomy	S			S			P
Systematic Review Analysis on Smart Building: Challenges and Opportunities	S						P
Upscaling energy control from building to districts: Current limitations and future perspectives	S						P
BLEMAT: Data Analytics and Machine Learning for Smart Building Occupancy Detection and Prediction	S			P			

Towards smart sustainable cities: Addressing semantic heterogeneity in Building Management Systems using discriminative models	S			P			
Application of Integrated Building Information Modeling, IoT and Blockchain Technologies in System Design of a Smart Building			P		S		
Distributed Edge Solution for IoT based Building Management System with NDN			P		S		
Exploiting Internet of Things and Building Information Modeling Framework for Management of Cognitive Buildings			P		S		
IBMS - Intelligent Building Management System Framework			P		S		
DC Grids for Smart LED-Based Lighting: The EDISON Solution			S			P	
RESTful Architecture of Wireless Sensor Network for Building Management System			S			S	P
The Internet of Things as a Facilitator of Smart Building Services			S			S	P
IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey			S	S			P
Will web technologies impact on building automation systems architecture?					S	P	
Towards a Standard API Design for Open Services in Smart Buildings						P	