



Universidad
LATINA *de Panamá*
SUMMUM DESIDERIUM SAPIENTIA

Facultad De Ingeniería

Escuela De Ingeniería Biomédica E Instrumentación

**Sistemas Inteligentes De Gestión Energética Para Infraestructuras
Hospitalarias**

Proyecto Final De Graduación Presentado Como Requisito Para Optar Por El
Título De Licenciatura En Ingeniería Biomédica E Instrumentación En La
Universidad Latina De Panamá

Lidianeth De Gracia Suárez

C.I.P 8-935-1302

Director De Tesis:

Dr. Luis Estrada Petrocelli

Asesor De Tesis:

Mgtr. Alfredo Lescher

Panamá, República De Panamá

2025

DEDICATORIA

A mis padres, Danilo Adrián De Gracia Quintero y Lidia Epifanía Suárez Góngora de De Gracia, con todo mi amor y gratitud. Gracias a ustedes soy quien soy y como soy. Por su apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado en cada paso de mi vida, por sus sabios consejos y por inculcarme valores que han guiado mi camino. Cada enseñanza y cada gesto de amor han sido la base de mis logros. Esta meta alcanzada no hubiera sido posible sin ustedes; es un logro que comparto y celebro junto a ustedes. **¡Lo logramos!** Y espero que la vida me permita seguir contando con su compañía por muchos años más, para continuar alcanzando nuevas metas y sueños.

Los amo profundamente.



UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ
DECLARACIÓN JURADA

Yo Lidianeth De Gracia Suárez con cédula de identidad personal 8-935-1302, estudiante graduando del programa/carrera de Licenciatura en Ingeniería Biomédica e Instrumentación declaro bajo la gravedad del juramento que el material que aparece en este trabajo de graduación, en la opción: Publicación científica (tesis, proyecto final, pasantía, otro), es de mi producción intelectual, en razón de lo cual exoneró a la Universidad Latina de Panamá de cualquier responsabilidad relacionada a este aspecto.

Para que conste firmo la presente declaración el día 30 de julio del año 2025.

Firma del estudiante: 

Cédula: 8-935-1302

Índice

Introducción.....	4
Capítulo 1.....	6
El Problema	6
1.1 Antecedentes del Problema de Investigación	7
1.2 Planteamiento del Problema.....	8
1.3 Justificación de la Investigación.....	9
1.4 Objetivos.....	10
1.5 Alcance y límites de la investigación	11
1.6. Línea de investigación a la que pertenece el estudio	11
Capítulo 2.....	12
Marco Teórico	12
2.1. Antecedentes de investigación realizadas en el tema	13
2.2. Bases teóricas que sustentan la investigación	14
Capítulo 3.....	18
Metodología.....	18
3.1 Tipo y diseño de la investigación	19
3.2 Población y muestra	19
3.3 Cálculo de muestreo	19
3.4 Descripción del instrumento.....	20
3.5 Procedimiento de la Investigación	20
Capítulo 4.....	22
Análisis E Interpretación De Los Resultados	22
4.1 Análisis e interpretación de los resultados.....	23
Conclusiones.....	33
Bibliografía	35
Anexos	43

Índice de Tablas

Tabla 1 Factores de consumo energético y su vinculación con tecnologías AIoT.....	23
Tabla 2 Estructura funcional para un sistema inteligente basado en AIoT	26
Tabla 3 Relación entre las etapas y los factores del consumo energético.....	29

Introducción

La gestión energética hospitalaria es un conjunto de procedimientos que favorece el monitoreo, regulación y optimización del consumo energético. Su objetivo es asegurar el uso eficiente de la energía, lo que implica entender el principio de eficiencia energética (Alansari et al. 2017a; Cedeño Cedeño, Chancay García, and Macías-Mero 2024), el cual se refiere al uso adecuado de la energía en momentos específicos, evitando el consumo excesivo [16]. La eficiencia energética en hospitales no depende únicamente de mejoras físicas, sino también del aprovechamiento de todas las fuentes renovables y la cultura energética de quienes trabajan y visitan el hospital. Para ello, se requiere un enfoque integral que combine tecnología, gestión eficiente y responsabilidad social. Asimismo, es necesario profundizar en la investigación para diseñar hospitales que sean energéticamente eficientes y funcionales para sus usuarios (Yaïci et al. 2021). Diversos estudios han abordado la utilización de tecnologías para la generación de energía (Ourahou et al. 2020; Thabit et al. 2019), se han propuesto diversas alternativas que buscan mejorar tanto el consumo como la generación de energía. Un ejemplo claro es el uso de la energía solar, que se obtiene mediante la colocación de paneles solares colocados en los edificios, con el objetivo de almacenar la energía y gestionar su consumo de manera inteligente, (Babatunde et al. 2018; Boutahri and Tilioua 2023a; Toughzaoui et al. 2024). Por otro lado, en el ámbito de la instrumentación, se estudia la eficiencia del mantenimiento envolvente de los edificios, destacando los sistemas de ventilación y climatización (HVAC) (Alkhayyat et al. 2019; Fakhabi, Hamidian, and Aliehyaei 2024; Zhihong Yang et al. 2011), ya que se ha comprobado que la eficiencia energética en centros de salud puede mejorar a través de una gestión adecuada de los parámetros operativos de un edificio (Gatea, Batcha, and Tawweekun 2020). No obstante, aunque estos avances son fundamentales, la integración de un sistema inteligente es la clave para transformar esta gestión hacia un modelo verdaderamente eficiente y sostenible.

En un estudio basado en el análisis de más de 20 000 horas de datos operativos de áreas como quirófano, UCI, zonas de tratamiento, además; de algunos equipos biomédicos, se logró estimar la cantidad de energía en tiempo real requerida para cada

área. Los autores concluyeron que únicamente ciertas áreas aisladas, como UCI realmente funcionan las 24 horas del día, mientras que otras áreas como la de quirófanos tiene patrones de consumo muy desiguales. No obstante, se identificó que los quirófanos requieren una mayor demanda de iluminación que incluso el área de UCI. Por otro lado, se observó que las áreas de tratamiento y exámenes no demanda una gran cantidad de energética en general, aunque esto varía dependiendo del tipo de equipo biomédico presente, ya que, por ejemplo, un equipo de resonancia magnética (MRI) puede consumir casi tanta energía como toda un área de exámenes (Christiansen, Kaltschmitt, and Dzukowski 2016). Estos datos resaltan la importancia de considerar varios aspectos de cada área al momento incorporar soluciones inteligentes para reducir el consumo energético. En este sentido, implementar un sistema inteligente de gestión energética es clave para buscar una solución a esta demanda específicas de las áreas críticas, con la implementación de estos sistemas inteligentes buscamos conseguir un monitoreo, una predicción y una optimización del consumo energético en tiempo real, mejorando la eficiencia y la sustentabilidad del entorno hospitalario. Por lo tanto, es importante incorporar herramientas tecnológicas que optimicen el uso de energía y, al mismo tiempo, vaya de la mano con un enfoque de salud digital. Un Sistema de Salud Inteligente (SHS) se define como una red de servicios sanitarios respaldados por tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), dispositivos portátiles y la inteligencia artificial (AI) (Abawajy and Hassan 2017; Garcés et al. 2022b).

Capítulo 1

El Problema

1.1 Antecedentes del Problema de Investigación

La utilización de energía en áreas hospitalarias provoca un efecto considerable debido al alto consumo, los costos operativos y el efecto ambiental que produce (Borges de Oliveira et al. 2021). En un estudio realizado en Pakistán se reveló que cerca del 60% del consumo energético corresponde a los sistemas HVAC, el resto casi en su totalidad es atribuido a el uso de equipos médicos como quirófanos, unidades de imagen y hornos, sin embargo, lo que más utiliza energía son los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación (Ahmed, Jakir, N. H. Mir, et al. 2025; Alexis and Liakos 2013; Nagao et al. 2017). Mediante Estas cifras y la aplicación de un sistema de evaluación energética, se pudo demostrar que los hospitales son estructuras más complejas en comparación con otros edificios. Por esto tienden a consumir más energía, esto se debe tomar en cuenta para la planificación de demanda energética en los hospitales (Ji and Qu 2019a). Por su parte, en una revisión de distintos artículos para respaldar la importancia que se le debe dar al consumo energético pudimos encontrar que, en China, el consumo en hospitales dobla el de edificios públicos (Ji and Qu 2019a); mientras que, En España, los hospitales consumen alrededor del 20% de energía total usada en edificios, Ubicándose entre las demandas más altas de energía y más altas de edificios (González González, García-Sanz-Calcedo, and Salgado 2018). En el contexto del sector terciario, los hospitales representan una de las infraestructuras con mayor demanda energética. De acuerdo con datos del Ministerio de Energía y Minas, estas instituciones concentran cerca del 33% del consumo nacional de energía eléctrica en dicho sector (Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE : Indicateurs d'Efficacité Energétique pour la Méditerranée Avril 2014 Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE : Indicateurs d'Efficacité Energétique pour la Méditerranée 2014).

En un estudio basado en el análisis de más de 20 000 horas de datos operativos de áreas como quirófano, UCI, zonas de tratamiento, además; de algunos equipos biomédicos, se logró estimar la cantidad de energía en tiempo real requerida para cada área. Los autores concluyeron que únicamente ciertas áreas aisladas, como UCI realmente funcionan las 24 horas del día, mientras que otras áreas como la de quirófanos

tiene patrones de consumo muy desiguales. No obstante, se identificó que los quirófanos requieren una mayor demanda de iluminación que incluso el área de UCI. Por otro lado, se observó que las áreas de tratamiento y exámenes no demanda una gran cantidad de energética en general, aunque esto varía dependiendo del tipo de equipo biomédico presente, ya que, por ejemplo, un equipo de resonancia magnética (MRI) puede consumir casi tanta energía como toda un área de exámenes (Christiansen et al. 2016). Estos datos resaltan la importancia de considerar varios aspectos de cada área al momento incorporar soluciones inteligentes para reducir el consumo energético. En este sentido, implementar un sistema inteligente de gestión energética es clave para buscar una solución a esta demanda específicas de las áreas críticas, con la implementación de estos sistemas inteligentes buscamos conseguir un monitoreo, una predicción y una optimización del consumo energético en tiempo real, mejorando la eficiencia y la sustentabilidad del entorno hospitalario.

1.2 Planteamiento del Problema

Los sistemas inteligentes aplicados a la gestión energética hospitalaria suelen enfocarse en áreas específicas como climatización, monitoreo o iluminación, dejando de lado una visión integral del consumo energético total. Este enfoque limita el potencial de mejora, ya que el consumo energético hospitalario involucra múltiples factores. Por ello, se plantea la necesidad de un sistema inteligente capaz de integrar todas las áreas de consumo mediante el uso de tecnologías como Artificial Intelligence of Things (AloT), las cuales permiten recolectar, analizar y actuar en tiempo real de forma inteligente para una gestión energética eficiente (Ahmad 2024; Pise et al. 2022a). Bajo este enfoque, el objetivo del presente estudio es analizar cómo la adaptación de los seis factores que determinan el consumo energético en edificaciones al entorno hospitalario, junto con la integración de tecnologías AloT, permite abordar de forma integral la gestión energética en hospitales (Ibrahim, Mazher, and Ucan 2022), en contraste con soluciones tecnológicas aplicadas de forma aislada. Así se promueva la sostenibilidad y mejorar la eficiencia operativa hospitalaria sin comprometer la seguridad del paciente (Malche et al. 2022; Pise et al. 2022b). Este trabajo recopila y evalúa distintas investigaciones con el fin de evidenciar el potencial de las soluciones inteligentes en la gestión energética hospitalaria.

1.3 Justificación de la Investigación

El consumo energético en hospitales representa uno de los componentes más críticos en la sostenibilidad operativa del sistema de salud, tanto por su impacto económico como por su repercusión ambiental. En la actualidad, los sistemas inteligentes aplicados a la gestión energética hospitalaria tienden a enfocarse en áreas puntuales como climatización, monitoreo o iluminación, sin considerar una visión integral del consumo total. Esta limitación reduce el potencial de optimización energética, pues el funcionamiento hospitalario implica múltiples factores que interactúan constantemente (Ahmad 2024; Pise et al. 2022a). Por tanto, el presente proyecto se justifica por la necesidad de analizar e integrar soluciones tecnológicas que permitan una gestión energética holística en entornos hospitalarios, tomando en cuenta los seis factores que determinan el consumo energético en edificaciones y adaptándolos a la realidad del ámbito hospitalario (Ibrahim et al. 2022).

La investigación aborda un problema con fuerte impacto comunitario. El alto consumo energético en los hospitales incide directamente en el gasto público en salud, en la huella de carbono institucional y en la sostenibilidad de los recursos. La aplicación de sistemas inteligentes capaces de optimizar la energía en tiempo real no sólo permitiría reducir costos, sino también mejorar la eficiencia operativa de estas infraestructuras críticas, sin comprometer la seguridad del paciente (Malche et al. 2022; Pise et al. 2022b). Además, la integración de tecnologías como la inteligencia artificial, el *machine learning* y el Internet de las Cosas (IoT) puede ayudar a prever fallas, detectar anomalías y planificar mejor los recursos, garantizando un servicio continuo y eficiente en entornos donde la energía salva vidas (Ahmed, Jakir, M. N. H. Mir, et al. 2025),(Uslu, Okay, and Dursun 2020). Así, el estudio ofrece beneficios tangibles en la calidad de vida de los pacientes y en la gestión responsable de los recursos, promoviendo un modelo hospitalario más sostenible y resiliente.

El estudio se sitúa en un campo de investigación emergente. Si bien existen avances en tecnologías aplicadas a la gestión energética, la literatura científica aún presenta vacíos al abordar soluciones integrales que combinen todas las variables que afectan el consumo energético hospitalario (1691479684 n.d.).

Este trabajo propone un enfoque original al analizar como la integración de tecnologías AIoT puede responder a dicha necesidad, evidenciando su capacidad para recolectar, analizar y actuar sobre grandes volúmenes de datos en tiempo real. Con ello, se espera generar nuevos conocimientos teóricos y aplicados que enriquezcan el campo de la ingeniería biomédica, la gestión hospitalaria y la eficiencia energética, así como servir de base para futuras investigaciones multidisciplinarias (Said, Yahyaoui, and Abdellatif 2021a).

Se seleccionó un diseño de revisión sistemática documental con enfoque cualitativo, el cual es adecuado para sintetizar conocimientos previos, identificar tendencias y establecer nuevas perspectivas analíticas. La revisión de literatura se realizó de forma rigurosa, mediante criterios de inclusión y exclusión claramente definidos, una estrategia de búsqueda estructurada y una matriz de extracción que permitió sistematizar la información extraída de bases científicas como PubMed y Google Scholar. Este método garantiza la validez y confiabilidad del análisis, ya que permite evaluar una gran cantidad de estudios relevantes, aportando un marco de referencia sólido para sustentar propuestas futuras. Además, este tipo de revisión facilita la transferencia de conocimiento a otros investigadores, instituciones hospitalarias y tomadores de decisiones que buscan implementar soluciones sostenibles en el sistema de salud.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Generales

Analizar cómo la adaptación de los seis factores que determinan el consumo energético en edificaciones al entorno hospitalario, junto con la integración de tecnologías AIoT, puede mejorar la eficiencia energética en hospitales.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Identificar los principales factores que inciden en el consumo energético en hospitales.
- Evaluar la aplicabilidad de tecnologías AIoT en la gestión energética hospitalaria.
- Proponer una estructura funcional que combine los factores clave con una arquitectura tecnológica eficiente.

- Comparar investigaciones previas relevantes y extraer buenas prácticas aplicables.

1.5 Alcance y límites de la investigación

Esta investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica, con el objetivo de analizar y sintetizar información relevante sobre sistemas inteligentes aplicados a la gestión energética eficiente en hospitales. El estudio se centró particularmente en el uso del Internet de las Cosas (IoT) y tecnologías complementarias como la inteligencia artificial (IA), el aprendizaje automático (Machine Learning, ML) y la computación en la nube, por su capacidad para automatizar la toma de decisiones, predecir la demanda energética y optimizar recursos en tiempo real. Por otro lado, esta investigación también presenta ciertas delimitaciones. Al ser un estudio de tipo documental y no empírico, no se realizaron experimentaciones directas ni recolección de datos primarios en hospitales reales. Además, se excluyeron documentos que no abordarán específicamente la gestión energética en entornos hospitalarios o que presentarán baja rigurosidad metodológica. La revisión se limitó a artículos disponibles en inglés y a aquellos accesibles a través de bases de datos científicas como PubMed y Google Scholar. Asimismo, el estudio se enfoca exclusivamente en tecnologías inteligentes aplicadas al sector salud, sin considerar aplicaciones energéticas en otros sectores industriales o comerciales.

1.6. Línea de investigación a la que pertenece el estudio

El estudio presentado pertenece a la línea de investigación en ciencias de la salud, específicamente tema de Ingeniería Clínica y Biomédica el cual trata de: Sistemas Inteligentes de Gestión Energética para Infraestructuras Hospitalarias.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Antecedentes de investigación realizadas en el tema

En el ambiente de la salud inteligente, nuevas tecnologías están ayudando en gran manera a redefinir la gestión clínica y operativa. Estas tecnologías utilizan lo que son sensores portátiles y plataformas conectadas que hacen posible el monitoreo continuo de pacientes, lo que mejora significativamente temprana de anomalías y reduce la carga sobre el personal de salud (Saba Raoof and Durai 2022a) .

El uso de tecnologías como IOT mejora la calidad asistencial, el flujo de pacientes, reduce errores administrativos y contribuye a la asignación de recursos en el ámbito de consumo energético. Esto es de gran ayuda, ya que permite gestionar la energía de acuerdo con la necesidad y se evitan así consumos innecesarios [66],[67]. Tecnologías como redes inalámbricas, protocolos de comunicación IoT (ZigBee, WiFi, RFID), y computación en la nube permiten una conectividad segura y flexible para estos fines (Luo 2022). También, con el uso de inteligencia artificial y aprendizaje profundo, se han desarrollado sistemas capaces de anticipar necesidades médicas, prevenir complicaciones y asistir en decisiones clínicas [68][69].

Para la gestión energética, el uso de IA ha demostrado ser clave para optimizar el consumo de energía mediante el uso de monitoreo continuo, permitiendo lograr sostenibilidad (Pariso, Picariello, and Marino 2025). En hospitales italianos, se ha evidenciado que el uso de gestores energéticos con implementación de IA para monitorear el consumo y reducir costos operacionales ha sido de gran eficacia (Pariso et al. 2025). En el caso del norte de Italia, donde se integraron tecnologías de IoT con la integración de algoritmos de aprendizaje automático en la nube, y de esta forma se logró modernizar sistemas de HVAC, logrando así ahorro de energía con ambiente adecuado según la necesidad de los pacientes (Frassanito et al. 2022a). También, se logró demostrar que, con el uso de la herramienta HOMER Pro, más paneles solares fotovoltaicos (PV) junto con sistemas de batería, esta combinación no sólo ayudó a reducir de forma considerable las emisiones contaminantes, sino que mejora el uso eficiente de la energía dentro de los centros médicos [72]. Como queda evidenciado, existen un conjunto de tecnologías que pueden utilizarse. Aprovechar las ventajas y oportunidades innovadoras que ofrecen para una gestión energética eficiente, traería

grandes avances hacia estructuras hospitalarias más sostenibles. Sin embargo, debemos tener en cuenta que la implementación de estas tecnologías trae consigo importantes desafíos y limitaciones que se analizan a continuación.

2.2. Bases teóricas que sustentan la investigación

La Agencia Internacional de Energía (IEA) identifica seis factores que influyen en el consumo energético de los edificios: clima, envolvente del edificio, equipamiento, operación y mantenimiento, comportamiento de los ocupantes y condiciones ambientales interiores. Aunque estos factores no han sido definidos específicamente para hospitales, pueden adaptarse a este contexto. Se agrupan en dos categorías: factores físicos, que incluyen clima, envolvente y equipamiento, y son comúnmente usados para estimar el rendimiento energético; y factores de influencia humana, como la operación, el comportamiento y las condiciones interiores, que suelen ser menos considerados. Sin embargo, este trabajo resalta que la inclusión de los factores humanos permite estimar de manera más realista el consumo energético en hospitales, por lo que se analizarán todos desde una perspectiva de gestión energética hospitalaria (Yoshino, Hong, and Nord 2017).

En este sentido, en la gestión energética hospitalaria, el clima es un factor determinante, ya que influye directamente en la demanda de calefacción o refrigeración, especialmente en áreas críticas como quirófanos y UCI. Estudios en hospitales de China resaltan que mejorar los sistemas de aire acondicionado puede generar importantes ahorros energéticos, mientras que en Australia se identificó que la mayor parte de las emisiones provienen de la climatización, y que el calentamiento global ha reducido la necesidad de calefacción, pero ha aumentado la demanda de refrigeración (Nourdine and Saad 2020).

Por otro lado, la envolvente del edificio también es clave, ya que influye en la capacidad de conservar condiciones térmicas estables. Un caso en España evidenció que una envolvente inadecuada permite un exceso de radiación solar, afectando la temperatura interna de las salas hospitalarias (Saba Raoof and Durai 2022b).

Asimismo, el equipamiento del edificio representa una carga energética significativa en hospitales, dado el uso intensivo de sistemas de climatización, iluminación y dispositivos

biomédicos. Investigaciones en Noruega destacan variaciones en el uso energético según áreas y horarios, señalando que incluso zonas con baja demanda presentan un alto consumo por iluminación continua, mientras que las áreas críticas requieren sistemas HVAC eficientes a baja carga (Rohde and Martinez 2015).

Además, la operación y mantenimiento adecuados de los edificios son esenciales para reducir el consumo energético, los costos y garantizar la continuidad de los servicios, especialmente en hospitales. Un estudio destaca que los sistemas HVAC y la iluminación eficiente, así como el uso de energía solar para agua caliente, son estrategias clave para mejorar el rendimiento energético y reducir emisiones (García-Sanz-Calcedo, Al-Kassir, and Yusaf 2018).

A esto se suma que el comportamiento de los ocupantes influye directamente en el uso de la energía. En hospitales, prácticas como dejar luces encendidas o puertas abiertas en áreas climatizadas elevan el consumo. Una investigación en hospitales de Malasia concluyó que la conducta de los ocupantes, la densidad y el uso de equipos afectan significativamente la calidad del aire interior, y que estos factores pueden modificarse mediante estrategias de gestión adecuadas (Ibrahim et al. 2024)

En esta línea, la convergencia entre el Internet de las Cosas y la Inteligencia Artificial ha dado lugar al concepto de AIoT, una tecnología que permite automatizar procesos en tiempo real y mejorar el desempeño energético (Alansari et al. 2017b), (Iqbal et al. 2018). En el ámbito hospitalario, esta integración posibilita que los dispositivos médicos no sólo recopilen datos, sino que también los analicen y tomen decisiones de manera autónoma, optimizando así la atención al paciente y el funcionamiento del hospital (Ji and Qu 2019b). AIoT facilita además, la gestión dinámica de los sistemas HVAC en función del clima exterior y las condiciones internas del edificio, apoyado por arquitecturas Edge/Fog/Cloud Computing, donde el procesamiento en el borde recolecta los datos y la nube ejecuta algoritmos complejos de IA (Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE : Indicateurs d'Efficacité Énergétique pour la Méditerranée Avril 2014 Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE : Indicateurs d'Efficacité Énergétique pour la Méditerranée 2014).

Este avance hacia dispositivos inteligentes que operan de forma autónoma ha originado una nueva generación de soluciones IoT (Saleem et al. 2023). La integración de AIoT en hospitales permite mejorar la gestión energética, optimizar el servicio, reducir costos operativos y fomentar la sostenibilidad. No obstante, persisten retos como los altos costos de implementación, la necesidad de personal especializado y los riesgos de ciberseguridad (Gambarotta et al. 2023). A pesar de ello, AIoT representa una oportunidad clave para alcanzar hospitales más sostenibles y eficientes. Su implementación facilita el monitoreo en tiempo real, mejora el mantenimiento de los equipos y regula las condiciones ambientales internas, lo cual reduce significativamente el consumo energético. Esta perspectiva está respaldada por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), que identifica seis factores esenciales que influyen en el consumo energético en edificaciones (Nyembwe et al. 2023)

En consecuencia, el funcionamiento eficaz de los sistemas inteligentes requiere una infraestructura tecnológica compuesta por sensores, redes inalámbricas y protocolos de comunicación, los cuales permiten una interacción segura, eficiente y en tiempo real entre dispositivos. Los sensores recopilan datos clave como temperatura, humedad o luminancia, siendo comunes en la gestión energética hospitalaria. Se utilizan tanto sensores personalizados, como Arduino o Raspberry Pi, como sensores comerciales que incorporan múltiples funciones y protocolos estandarizados (Mischos, Dalagdi, and Vrakas 2023).

También, tenemos que, las redes inalámbricas como RFID, WSN, Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi, 6LowPAN y Z-Wave permiten la transmisión de datos entre los dispositivos conectados. Estas tecnologías se seleccionan según el consumo energético, el alcance y las necesidades del sistema. Wi-Fi (IEEE 802.11x) destaca por su alta velocidad, mientras que ZigBee y Z-Wave son preferidos para redes en malla y automatización de bajo consumo (Yalli et al. 2025).

Además, los protocolos de comunicación aseguran que los datos se transmiten de forma ordenada y eficiente. En redes inalámbricas, estos protocolos enfrentan desafíos particulares como la variabilidad del canal y la necesidad de eficiencia energética, lo que complica el diseño de protocolos de enrutamiento eficaces (Sun et al. 2018).

Finalmente, en cuanto a la calidad del servicio (QoS), la seguridad y la privacidad, se vuelven críticas en entornos como hospitales. Aunque, las soluciones actuales priorizan el hardware de sensores y la reducción de la latencia, suelen limitarse a escenarios de monitoreo remoto o redes WBAN. Estos enfoques no consideran entornos con múltiples redes activas o jerarquías complejas. Tecnologías como el Fog Computing surgen como solución para disminuir los tiempos de respuesta al procesar datos cerca del sensor, aunque la transmisión hasta los nodos aún puede comprometer la QoS según la infraestructura disponible (Rodrigues et al. 2022).

Capítulo 3

Metodología

3.1 Tipo y diseño de la investigación

Esta investigación es de tipo documental, con un enfoque cualitativo, desarrollada bajo el diseño de revisión sistemática de literatura científica. El propósito fue analizar y sintetizar información relevante sobre sistemas inteligentes con un enfoque en la gestión energética eficiente en los hospitales. Se realizó un especial énfasis en el uso del Internet de las Cosas (IoT) y tecnologías complementarias como la inteligencia artificial, el machine learning y la computación en la nube, las cuales permiten la automatización de la toma de decisiones, la predicción de la demanda energética y la optimización de recursos en tiempo real.

3.2 Población y muestra

La población corresponde a artículos científicos relacionados con energía, salud e innovación tecnológica. La muestra se conformó por los artículos que cumplieron con criterios de inclusión y exclusión establecidos, priorizando estudios que abordarán concretamente el enfoque energético hospitalario mediante tecnologías inteligentes como IoT, IA y ML.

3.3 Cálculo de muestreo

Al tratarse de una investigación documental, no se realizó un cálculo estadístico de muestra. Se aplicaron criterios de selección rigurosos para delimitar la muestra de estudio. Como resultado de la estrategia de búsqueda, se obtuvo una primera búsqueda de más de 2,960,000 artículos, los cuales fueron filtrados mediante evaluación de títulos y resúmenes para identificar los documentos pertinentes. Posteriormente, se realizó una revisión profunda de los estudios seleccionados, priorizando aquellos que documentarán resultados prácticos sobre eficiencia energética hospitalaria mediante el uso de tecnologías inteligentes.

3.4 Descripción del instrumento

El instrumento empleado fue una matriz de extracción de datos en base al análisis de documentos diseñada para sistematizar la información recopilada. La información fue extraída de las secciones de metodología, resultados, conclusiones y marco teórico de los artículos seleccionados. Esta matriz permitió categorizar los hallazgos más relevantes en torno al uso de tecnologías inteligentes en la gestión energética hospitalaria, incluyendo tendencias, desafíos, impactos y oportunidades de mejora.

3.5 Procedimiento de la Investigación

- A. Selección de base de datos: Se consultaron bases científicas de alto impacto como PubMed y Google Scholar, buscando abarcar y dar con investigaciones que integren aspectos de energía, salud e innovación tecnológica.
- B. Estrategia de búsqueda: Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés para un mayor alcance de información como: “smart energy management systems”, “hospital energy efficiency”, “IoT in healthcare”, “machine learning energy prediction”, “AI-based energy control systems”, “intelligent hospital infrastructure”, entre otras. Los términos se articularon mediante operadores booleanos (AND, OR) para asegurar la precisión de los resultados.
- C. Criterios de inclusión y exclusión: Se incluyeron artículos publicados entre 2013 y 2025, priorizando estudios recientes. Con excepción de algunos documentos normativos, estándares técnicos y reportes oficiales de consumo energético, como guías institucionales, marcos regulatorios o leyes, que, aunque datan de años anteriores, fueron considerados por su valor referencial y vigencia en el ámbito hospitalario y energético. Toda la información se enfocó en el IoT, IA y ML aplicados a la optimización energética. Se excluyeron documentos de baja rigurosidad o que no abordarán concretamente el enfoque energético hospitalario.
- D. Proceso de evaluación: Se realizó una evaluación de títulos y resúmenes para obtener información alineada con el objetivo de búsqueda y descartar estudios no pertinentes. Como resultado, se obtuvo una primera búsqueda de más de 2,960,000 artículos. Posteriormente, se revisaron en profundidad los documentos

seleccionados para determinar su aplicabilidad al tema, priorizando aquellos que documentarán resultados prácticos sobre eficiencia energética mediante tecnologías inteligentes.

- E. Extracción y síntesis de datos: La información fue extraída de las secciones de metodología, resultados, conclusiones y marco teórico. Se realizó una síntesis de información con el fin de proporcionar un análisis integral sobre el uso de tecnologías inteligentes en la gestión energética hospitalaria, permitiendo identificar tendencias, desafíos actuales, impactos y oportunidades de mejora en la eficiencia operativa y la sostenibilidad de estas infraestructuras.

Capítulo 4

Análisis E Interpretación De Los Resultados

4.1 Análisis e interpretación de los resultados

En esta sección se presentan y examinan los resultados obtenidos a partir de la revisión documental sistemática sobre sistemas inteligentes para la gestión energética en infraestructuras hospitalarias. La información sintetizada se organiza en tres tablas: (1) factores determinantes del consumo energético y su vinculación con tecnologías AIoT, (2) estructura funcional propuesta para un sistema inteligente basado en AIoT y (3) relación entre las etapas recomendadas para la implementación y los factores de consumo identificados. Este análisis busca no sólo describir los hallazgos, sino también establecer conexiones entre ellos, permitiendo una comprensión integral de como las tecnologías inteligentes pueden optimizar la eficiencia energética en entornos hospitalarios.

Tabla 1

Factores de consumo energético y su vinculación con tecnologías AIoT

Factores del Consumo eléctrico total	<i>Impacto en el consumo energético hospitalario</i>	<i>Tecnologías AIoT aplicables</i>	<i>Aplicación Práctica</i>	<i>Referencia</i>
Clima	Optimización del consumo energético del sistema de enfriamiento (chiller) considerando las variaciones y condiciones del clima exterior	AI, ML, Big Data	optimización energética basado en aprendizaje automático que usa datos históricos y en tiempo real para ajustar sistemas HVAC según el clima exterior	(Yu 2020)
Envolvente del edificio	Monitoreo ambiental y desempeño del edificio mediante BIM-FM mejora la gestión energética y operativa de la envolvente, impactando el consumo energético	BIM, IoT, AI, Robótica	Uso de BIM-FM para el monitoreo ambiental y energético de la envolvente del edificio, incluyendo control del flujo de aire y radiación solar, que optimizan el desempeño	(Chen and Ho 2023)

			energético y la respuesta operativa del hospital	
Equipamiento	Mejora en el mantenimiento reduce tiempos de inactividad y posibles consumos innecesarios del equipamiento médico	AI, IoT	Gestión centralizada del mantenimiento de equipamiento médico mediante IoT (BLE, RTLS) y plataformas integradas, mejorando tiempos y eficiencia en hospitales	(Luschi et al. 2024)
Operación y el mantenimiento	Ahorros energéticos significativos derivados de la detección y corrección de fallas operativas en unidades AHU, optimizando su operación y mantenimiento	AI, IoT, ML, Digital Twin, BIM	Mantenimiento predictivo basado en Digital Twin para AHU, que detecta fallas, predice estados futuros y mejora la planificación y eficiencia del mantenimiento.	(Hosamo et al. 2022)
Acciones cotidianas de los ocupantes	Ahorros energéticos logrados al optimizar el consumo HVAC, teniendo en cuenta el comportamiento y las acciones diarias de los ocupantes para mantener confort térmico.	AI, IoT, ML	Reconocimiento de patrones y control predictivo, aplicados al comportamiento del ocupante y sistemas HVAC para mejorar eficiencia y confort	(Boutahri and Tilioua 2023b)
Condiciones ambientales interiores	Potencial ahorro energético al ajustar en tiempo real los puntos de consigna térmicos según el confort de los ocupantes,	AI, ML	Predicción en tiempo real del índice PMV usando redes neuronales para clasificar el confort térmico y ajustar el	(Boutahri and Tilioua 2023b)

optimizando HVAC	control dinámicamente	HVAC
---------------------	--------------------------	------

A partir del análisis de los factores y su vinculación con tecnologías basadas en AIoT, se identificaron patrones relevantes que se presentan en la **Tabla 1**, del contenido de esta tabla se encontraron hallazgos relevantes que merecen ser destacados. Uno de los primeros puntos a destacar es el papel que juegan las condiciones climáticas del entorno. Estas circunstancias externas son el factor predominante que influye en la demanda del sistema HVAC del edificio y, en consecuencia, en su consumo energético(Yu 2020). En lo que se refiere al uso de BIM-FM para monitoreo ambiental y energético de la envolvente del edificio, se evidenció una estructura rígida entre las aplicaciones BIM-FM las cuales carecen de autonomía completa. Causando así limitantes en la flexibilidad lo cual impide el flujo dinámico entre niveles (Chen and Ho 2023). Por otro lado, el proyecto OHIO mejora la gestión del equipamiento hospitalario mediante la integración avanzada de software y nuevas interfaces, lo que incrementa la fiabilidad de los dispositivos y reduce tiempos de inactividad. Los resultados evidencian una mejora significativa en las actividades de mantenimiento sistemático, gracias a códigos de fallo y KPIs estandarizados que permiten un análisis más eficiente y basado en evidencia. Además, las interfaces gráficas intuitivas facilitan el trabajo del personal, optimizando la operación y contribuyendo a un entorno clínico más seguro y eficiente(Luschi et al. 2024). Para la operación y el mantenimiento un artículo destaca cómo el Gemelo Digital optimiza éstos al utilizar un sistema de mantenimiento predictivo integrado con BIM, sensores IoT y gestión de instalaciones. Este enfoque permite la detección automática de fallos, predicción de condiciones y planificación anticipada del mantenimiento, aumentando la vida útil de las Unidades de Manejo de Aire (AHU). Los resultados de los autores muestran alta efectividad en la detección de problemas variados, aunque se señala la necesidad de mejorar la selección de algoritmos y adoptar modelos de datos estandarizados y aprendizaje incremental para perfeccionar la precisión y actualización continua del sistema(Hosamo et al. 2022). En cuanto a las acciones de los ocupantes el artículo resalta su importancia en la gestión energética de edificios mediante técnicas de IA que consideran el confort térmico, basándose en datos reales obtenidos a través de cuestionarios, entrevistas y mediciones directas. Se enfatiza el uso de redes neuronales

y lógica difusa para modelar y adaptar dinámicamente las condiciones ambientales según la percepción y comportamiento humano. Además, los autores resaltan que la integración de la conciencia contextual y el seguimiento de la actividad humana son claves para ajustar eficientemente los sistemas (Boutahri and Tilioua 2023b). Por último, para el factor de las condiciones ambientales interiores se revisa un artículo que presenta un modelo basado en inteligencia artificial que utiliza redes neuronales artificiales (ANN) para predecir el índice PMV, integrable en sistemas HVAC con el fin de optimizar el consumo energético sin comprometer el confort térmico, siguiendo los estándares ASHRAE. Los autores demostraron la eficacia del modelo para mejorar la eficiencia energética y la calidad ambiental en edificios mediante un control adaptativo (Boutahri and Tilioua 2023b). Como se evidencia en los seis artículos revisados para la tabla 1, los seis factores que influyen en el consumo total energético de los edificios están presentes, al menos un factor por artículo, en investigaciones sobre sistemas inteligentes de gestión energética. No obstante, es poco común encontrar estudios que aborden de manera integral todos los seis factores al mismo tiempo. En su mayoría, los enfoques se centran en aspectos específicos de la gestión energética, sin ofrecer una visión completa ni una solución global para la totalidad del entorno hospitalario. Por lo que, al considerar los seis factores al momento de integrar un sistema inteligente a un entorno hospitalario, se puede considerar que será un sistema completo para todas las áreas del hospital.

Tabla 2

Estructura funcional para un sistema inteligente basado en AIoT

Etapas	Tecnologías Involucradas	Descripción	Aplicación en la gestión energética	Referencia
Medición y recolección de datos	IoT, FC	Datos de salud recolectados desde sensores inalámbricos vía dispositivos IoT, agregados en gateways y procesados en servidores	Optimización del consumo en red al procesar datos cerca del usuario (fog computing), reduciendo la	(Ida Syafiza M. Isa et al. 2020)

Conectividad y transmisión de datos	IoT, protocolos ligeros	cercanos (fog) antes de enviarlos a la nube	carga y transmisión a la nube central.	(Jan et al. 2021)
		Dispositivos portátiles conectados a servidores remotos mediante gateways, que actúan como intermediarios para transmitir datos hacia la nube para análisis y toma de decisiones.	Optimización en la transmisión mediante arquitectura distribuida para reducir latencia y mejorar eficiencia en el envío de datos biomédicos	
Procesamiento y análisis inteligente	ML, DL	Preprocesamiento de datos y extracción de características para mejorar la precisión y confiabilidad de modelos predictivos en energía	Análisis y predicción energética mediante algoritmos de aprendizaje automático para optimizar consumo y operación	(Fatehijananloo, Stopps, and Mcarthur n.d.)
Automatización y control en tiempo real	IoT, AI, ML, DL, CC	Modelo supervisado que usa datos históricos de parámetros interiores y exteriores para predecir el confort térmico de los ocupantes	Control automático en tiempo real para ajustar condiciones interiores y optimizar el consumo energético manteniendo confort térmico	(Brik et al. 2022)
Interfaz de usuario y visualización	IoT, ML, CC	Aplicación web para visualizar y descargar datos ambientales e históricos, ajustar	Mejora de la gestión energética mediante visualización	(Frassanito et al. 2022b)

		consignas y en tiempo consultar el estado real y ajuste de controladores y manual o comandos automático generados de parámetros HVAC Optimización	
Aprendizaje y mejora continua	IoT, ML, CC, EC	Modelo MDP con retroalimentación humana en tiempo real para que el sistema HVAC aprenda y ajuste sus decisiones de control de manera adaptativa y continua	progresiva de eficiencia energética y confort, reduciendo la necesidad de intervención humana mediante aprendizaje constante Mejora de eficiencia operativa mediante integración de dispositivos y sistemas hospitalarios para reducir tiempos de respuesta y optimizar recursos energéticos. (Liang et al. 2025)
Integración con otros sistemas hospitalarios	IoT, EC, CC, 5G, 6G	Red 6G e IoT integran monitoreo en tiempo real, análisis en edge y almacenamiento en la nube para conectar equipos médicos y plataformas hospitalarias	(Kumar et al. 2025)

Una vez comprendido el concepto de AIoT y presentadas algunas de las tecnologías claves que lo comprenden en la **Tabla 2** se presenta una propuesta de una estructura funcional basada en AIoT, cabe destacar que estas etapas no son provenientes de una fuente o normativa específica, sino que sido diseñadas en este trabajo como una recomendación estructurada, con base en el análisis técnico de los seis factores que determinan el consumo energético total de los edificios. Entre los hallazgos, destacan arquitecturas de Fog Computing que procesan datos cerca del usuario, reduciendo el

tráfico hacia la nube y logrando hasta un 52 % de ahorro energético(Iida Syafiza M. Isa et al. 2020), propuestas como LightIoT(Jan et al. 2021), que optimizan la transmisión segura de datos en dispositivos biomédicos con bajo consumo computacional y el uso de algoritmos inteligentes como redes neuronales, SVM, híbridos, mejoran la predicción del consumo energético(Fatehijananloo et al. n.d.) También, se identificaron sistemas capaces de ajustar automáticamente parámetros térmicos mediante aprendizaje automático(Brik et al. 2022) , y plataformas de visualización que permiten reducir hasta un 20 % del consumo energético en áreas específicas sin afectar el entorno clínico(Frassanito et al. 2022b) Además, se introducen enfoques de mejora continua como los sistemas Human-in-the-Loop (HITL), que adaptan la gestión energética según ocupación y condiciones del mercado eléctrico(Liang et al. 2025) e iniciativas de integración tecnológica avanzada (IA explicable, 6G, robótica) para lograr interoperabilidad y eficiencia hospitalaria(Kumar et al. 2025). En conjunto, los siete artículos analizados evidencian que la implementación de un sistema inteligente basado en tecnologías que conforman el AIoT en hospitales permite optimizar el consumo energético sin comprometer la calidad del servicio. Aunque, cada estudio aborda distintas etapas de manera individual y en contextos específicos, sus resultados demuestran que, al integrarse, pueden conformar un sistema inteligente robusto, capaz de responder de forma eficiente y coordinada a las demandas energéticas del entorno hospitalario. Esto resalta la necesidad de apostar por soluciones tecnológicas que se complementen entre sí, y que, al integrarse de manera gradual y coordinada, permiten construir una gestión energética más eficiente, flexible y orientada a las verdaderas necesidades del entorno hospitalario.

Tabla 3

Relación entre las etapas recomendadas y los factores del consumo energético

Etapas	Clima	Envolve nte del Edificio	Equipa miento	Opera ción y el manteni miento	Acciones cotidia nas de los ocupan tes	Condicio nes ambien tales interiores	Ref.
---------------	-------	--------------------------------	------------------	---	---	--	-------------

Medición y recolección de datos	✗	✗	✓	✓	✗	✗	(Said, Yahyaoui, and Abdellatif 2021b)
Conectividad y transmisión de datos	✗	✗	✓	✓	✗	✗	(Pise et al. 2022c)
Procesamiento y análisis inteligente	✓	✓	✓	✓	✗	✓	(Maddalena et al. 2022)
Automatización y control en tiempo real	✓	✗	✓	✓	✓	✓	(Dong et al. 2018)
Interfaz de usuario y visualización	✗	✗	✓	✓	✓	✗	(Chai et al. 2018)
Aprendizaje y mejora continua	✓	✓	✓	✓	✗	✗	(Cao et al. 2020)
Integración con otros sistemas hospitalarios	✗	✗	✓	✓	✓	✓	(Ahmad 2024)

Además, en la **Tabla 3** se establece la correlación entre cada etapa de dicha estructura y los factores analizados, lo que permite visualizar de manera más clara cuales etapas cubren todos los factores y cuales presentan limitaciones en su alcance. En los que se observó que los factores más abordados fueron equipamiento del edificio y operación y mantenimiento, presentes en todos los estudios, mediante sensores, automatización y gestión en tiempo real Factor eficiencia Posterior, comportamiento de los ocupantes y condiciones interiores aparecen con menor frecuencia, pero influyen en estrategias predictivas y adaptativas para el confort y eficiencia Por último, el envolvente del edificio fue el menos considerado, aunque se abordó indirectamente mediante modelos que relacionan condiciones externas e internas (Ahmad 2024; Cao et al. 2020; Chai et al. 2018; Dong et al. 2018; Maddalena et al. 2022; Pise et al. 2022c; Said et al. 2021b). En conjunto, estos hallazgos muestran que el AIoT permite integrar tecnologías complementarias que, aplicadas a los factores determinantes del consumo energético, pueden mejorar significativamente la gestión energética hospitalaria. También, con el uso de inteligencia artificial y aprendizaje profundo, se han desarrollado sistemas capaces de anticipar necesidades médicas, prevenir complicaciones y asistir en decisiones clínicas.

Para la gestión energética, el uso de IA ha demostrado ser clave para optimizar el consumo de energía mediante el uso de monitoreo continuo, permitiendo lograr sostenibilidad (Pariso et al. 2025). En hospitales italianos, se ha evidenciado que el uso de gestores energéticos con implementación de IA para monitorear el consumo y reducir costos operacionales ha sido de gran eficacia (Pariso et al. 2025). En el caso del norte de Italia, donde se integraron tecnologías de IoT con la integración de algoritmos de aprendizaje automático en la nube, y de esta forma se logró modernizar sistemas de HVAC, logrando así ahorro de energía con ambiente adecuado según la necesidad de los pacientes (Frassanito et al. 2022a). También se logró demostrar que, con el uso de la herramienta HOMER Pro, más paneles solares fotovoltaicos (PV) junto con sistemas de batería, esta combinación no sólo ayudó a reducir de forma considerable las emisiones contaminantes, sino que también mejora el uso eficiente de la energía dentro de los centros médicos [72]. Como queda evidenciado, existe un conjunto de tecnologías que pueden utilizarse. Aprovechar las ventajas y oportunidades innovadoras que ofrecen

para una gestión energética eficiente, traería grandes avances hacia estructuras hospitalarias más sostenibles. Sin embargo, debemos tener en cuenta que la implementación de estas tecnologías trae consigo importantes desafíos y limitaciones que se analizan a continuación.

Conclusiones

La identificación de los seis factores que determinan el consumo energético en los edificios constituye una base valiosa para comprender y optimizar el uso de la energía en distintos contextos. Al llevar este enfoque a un entorno hospitalario, se reconoce la utilidad de estos factores como herramienta de análisis para lograr una gestión más eficiente. Habitualmente, en el ámbito de la salud la gestión energética se centra en los factores físicos, (clima, envolvente del edificio y equipamiento), ya que son elementos que se pueden medir y controlar. Sin embargo, a través del desarrollo de este trabajo se resalta la importancia de considerar también los factores humanos, (operación y mantenimiento, acciones cotidianas del ocupante y condiciones ambientales interiores) ya que éstas también tienen un aporte significativo en el consumo energético total. En este contexto, la implementación de sistemas inteligentes basados en tecnologías AIoT se perfila como una solución efectiva, ya que permite una gestión integral de la energía que considera tanto variables físicas como humanas. Su principal fortaleza radica en la integración de sensores IoT, capacidades de decisión autónoma mediante Inteligencia Artificial, Machine Learning y Deep Learning, y arquitecturas de procesamiento Cloud, Edge y Fog Computing, lo que posibilita un monitoreo y respuesta en tiempo real. Como aporte clave, este estudio plantea que la aplicación de tecnologías AIoT puede facilitar el desarrollo de sistemas energéticos hospitalarios adaptativos, orientados a mejorar la eficiencia operativa, la sostenibilidad y el confort. Sin embargo, también se reconocen desafíos importantes, como los elevados costos iniciales, la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada, la formación del personal y los riesgos asociados a la ciberseguridad.

A partir de los resultados obtenidos en esta revisión sistemática, se identifican algunos aspectos clave que convendría considerar en futuras investigaciones e iniciativas orientadas a la implementación efectiva de sistemas inteligentes de gestión energética basados en tecnologías AIoT en hospitales. Primero, al diseñar planes para gestionar la energía en los hospitales, se tengan en cuenta desde el inicio los factores que determinan el consumo energético, el considerar éstos

aspectos desde la planificación y durante el uso diario ayuda a mejorar la eficiencia energética, reducir costos y crear hospitales más sostenibles y resistentes. En segundo lugar, se recomienda el desarrollo de políticas públicas que impulsen la inversión en infraestructura tecnológica moderna e inteligente. También es esencial ofrecer programas de formación para el personal técnico y clínico, con el fin de asegurar un manejo adecuado y seguro de estos sistemas. Por último, se resalta la necesidad de fortalecer las medidas de seguridad y protección de datos, debido a los riesgos asociados con el uso de información sensible en plataformas conectadas. Esta investigación no incluye un alcance experimental, por lo que en el futuro sería recomendable realizar estudios mediante pruebas piloto o simulaciones que permitan evaluar el desempeño y la viabilidad de los sistemas inteligentes para la gestión energética basados en tecnologías AIoT en entornos hospitalarios. De esta manera, se podrían ajustar y optimizar estas tecnologías para satisfacer mejor las necesidades específicas del sector salud.

Bibliografía

1691479684. n.d.

Abawajy, Jemal H., and Mohammad Mehedi Hassan. 2017. "Federated Internet of Things and Cloud Computing Pervasive Patient Health Monitoring System." *IEEE Communications Magazine* 55(1):48–53. doi:10.1109/MCOM.2017.1600374CM.

Ahmad, Asiyah. 2024. "Enhancing Hospital Efficiency through IoT and AI: A Smart Healthcare System." *JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE APPLICATION AND ENGINEERING* 2(2):34–38. <https://journal.lenterailmu.com/index.php/josapen>.

Ahmed, Adib, Tanaya Jakir, Md Nazmul Hossain Mir, MD Abdul Fahim Zeeshan, Arat Hossain, Afrin hoque Jui, and Md Sakibul Hasan. 2025. "Predicting Energy Consumption in Hospitals Using Machine Learning: A Data-Driven Approach to Energy Efficiency in the USA." *Journal of Computer Science and Technology Studies* 7(1):199–219. doi:10.32996/jcsts.2025.7.1.15.

Ahmed, Adib, Tanaya Jakir, Nazmul Hossain Mir, Abdul Fahim Zeeshan, Arat Hossain, Afrin Hoque Jui, and Md Sakibul Hasan. 2025. "Predicting Energy Consumption in Hospitals Using Machine Learning: A Data-Driven Approach to Energy Efficiency in the USA." doi:10.32996/jcsts.

Alansari, Zainab, Nor Badrul Anuar, Amirrudin Kamsin, Safeeullah Soomro, and Mohammad Riyaz Belgaum. 2017a. "The Internet of Things Adoption in Healthcare Applications." Pp. 1–5 in *2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS)*. IEEE.

Alansari, Zainab, Nor Badrul Anuar, Amirrudin Kamsin, Safeeullah Soomro, and Mohammad Riyaz Belgaum. 2017b. "The Internet of Things Adoption in Healthcare Applications." Pp. 1–5 in *2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS)*. IEEE.

Alexis, G. K., and P. Liakos. 2013. "A Case Study of a Cogeneration System for a Hospital in Greece. Economic and Environmental Impacts." *Applied Thermal Engineering* 54(2):488–96. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.02.019.

Ali, Dalia Mohammed Talat Ebrahim, Violeta Motuzienė, and Rasa Džiugaitė-Tumėnienė. 2024. "AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings." *Energies* 17(17).

Alkhayyat, Ahmed, Ahmed A. Thabit, Fahad A. Al-Mayali, and Qammer H. Abbasi. 2019. "WBSN in IoT Health-Based Application: Toward Delay and Energy

- Consumption Minimization.” *Journal of Sensors* 2019:1–14. doi:10.1155/2019/2508452.
- Babatunde, Olubayo, Daniel Akinyele, Tolulope Akinbulire, and Peter Oluseyi. 2018. “Evaluation of a Grid-Independent Solar Photovoltaic System for Primary Health Centres (PHCs) in Developing Countries.” *Renewable Energy Focus* 24:16–27. doi:10.1016/j.ref.2017.10.005.
- Borges de Oliveira, Karine, Eduardo Ferro dos Santos, Antonio Faria Neto, Vitor Homem de Mello Santos, and Otávio José de Oliveira. 2021. “Guidelines for Efficient and Sustainable Energy Management in Hospital Buildings.” *Journal of Cleaner Production* 329. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129644.
- Boutahri, Youssef, and Amine Tilioua. 2023a. “An Artificial Neural Network-Based System to Estimate the Thermal Comfort of Buildings with Energy Efficiency.” *ITM Web of Conferences* 52:02003. doi:10.1051/itmconf/20235202003.
- Boutahri, Youssef, and Amine Tilioua. 2023b. “An Artificial Neural Network-Based System to Estimate the Thermal Comfort of Buildings with Energy Efficiency.” *ITM Web of Conferences* 52:02003. doi:10.1051/itmconf/20235202003.
- Brik, Bouziane, Moez Esseghir, Leila Merghem-Boulahia, and Ahmed Hentati. 2022. “Providing Convenient Indoor Thermal Comfort in Real-Time Based on Energy-Efficiency IoT Network†.” *Energies* 15(3). doi:10.3390/en15030808.
- Burgu, Nurdan, Haluk Gözde, and M. Cengiz Taplamacioğlu. n.d. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Volume : 3 Number: 1 Efficiency Optimization Of Combined Heat And Power System Integrated With Renewable Energy For A Hospital*.
- Cao, Lingyan, Yongkui Li, Jiansong Zhang, Yi Jiang, Yilong Han, and Jianjun Wei. 2020. “Electrical Load Prediction of Healthcare Buildings through Single and Ensemble Learning.” *Energy Reports* 6:2751–67. doi:10.1016/j.egyr.2020.10.005.
- Cedeño Cedeño, Julexy, Leonardo Chancay García, and Ángel Macías-Mero. 2024. “Análisis Bibliográfico de Las Tecnologías IoT En La Telemedicina Para El Tratamiento de Enfermedades Cardiovasculares.” *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS* 6(5):256–77. doi:10.59169/pentaciencias.v6i5.1218.
- Chai, Peter Ray, Haipeng Zhang, Christopher W. Baugh, Guruprasad D. Jambaulikar, Jonathan C. McCabe, Janet M. Gorman, Edward W. Boyer, and Adam Landman. 2018. “Internet of Things Buttons for Real-Time Notifications in Hospital Operations: Proposal for Hospital Implementation.” *Journal of Medical Internet Research* 20(8). doi:10.2196/jmir.9454.

- Chen, James K. C., and Han Hsi Ho. 2023. "Asset Resource Optimization Solution for Smart Hospital Facilities and Energy Management through an Interpretive Structural Model." *Buildings* 13(12). doi:10.3390/buildings13123064.
- Christiansen, Nils, Martin Kaltschmitt, and Frank Dzukowski. 2016. "Electrical Energy Consumption and Utilization Time Analysis of Hospital Departments and Large Scale Medical Equipment." *Energy and Buildings* 131:172–83. doi:10.1016/j.enbuild.2016.09.023.
- Dong, Jin, Christopher Winstead, James Nutaro, and Teja Kuruganti. 2018. "Occupancy-Based HVAC Control with Short-Term Occupancy Prediction Algorithms for Energy-Efficient Buildings." *Energies* 11(9). doi:10.3390/en11092427.
- Fakhabi, Mona Masroor, Seyed Mohammad Hamidian, and Mehdi Aliehyaei. 2024. "Exploring the Role of the Internet of Things in Green Buildings." *Energy Science & Engineering* 12(9):3779–3822. doi:10.1002/ese3.1840.
- Fatehijananloo, Marjan, Helen Stopps, and J. J. Mcarthur. n.d. *Exploring Artificial Intelligence Methods for Energy Prediction in Healthcare Facilities: An In-Depth Extended Systematic Review*.
- Frassanito, Riccardo, Tiziana Buso, Stephanie Aumann, Jacopo Toniolo, Paolo Albrici, Pietro Canevari, Matteo Iemmi, and Francesca Mapelli. 2022a. "How IoT and Artificial Intelligence Can Improve Energy Efficiency in Hospitals - A North Italian Case Study." in *E3S Web of Conferences*. Vol. 343. EDP Sciences.
- Frassanito, Riccardo, Tiziana Buso, Stephanie Aumann, Jacopo Toniolo, Paolo Albrici, Pietro Canevari, Matteo Iemmi, and Francesca Mapelli. 2022b. "How IoT and Artificial Intelligence Can Improve Energy Efficiency in Hospitals - A North Italian Case Study." in *E3S Web of Conferences*. Vol. 343. EDP Sciences.
- Gambarotta, Agostino, Riccardo Malabarba, Mirko Morini, Giuliano Randazzo, Michele Rossi, Costanza Saletti, and Andrea Vieri. 2023. "Demonstrating a Smart Controller in a Hospital Integrated Energy System." *Smart Energy* 12. doi:10.1016/j.segy.2023.100120.
- Garcés, Hugo O., Claudia Durán, Eduardo Espinosa, Alejandro Jerez, Fredi Palominos, Marcela Hinojosa, and Raúl Carrasco. 2022. "Monitoring of Thermal Comfort and Air Quality for Sustainable Energy Management inside Hospitals Based on Online Analytical Processing and the Internet of Things." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(19):12207. doi:10.3390/ijerph191912207.
- García-Sanz-Calcedo, Justo, Awf Al-Kassir, and Talal Yusaf. 2018. "Economic and Environmental Impact of Energy Saving in Healthcare Buildings." *Applied Sciences (Switzerland)* 8(3). doi:10.3390/app8030440.

- Gatea, Anwer A., Mohd Faizal Mohideen Batcha, and Juntakan Taweeekun. 2020. "Energy Efficiency and Thermal Comfort in Hospital Buildings: A Review." *International Journal of Integrated Engineering* 12(3):33–41. doi:10.30880/ijie.2020.12.03.005.
- González González, Alfonso, Justo García-Sanz-Calcedo, and David Rodríguez Salgado. 2018. "A Quantitative Analysis of Final Energy Consumption in Hospitals in Spain." *Sustainable Cities and Society* 36:169–75. doi:10.1016/j.scs.2017.10.029.
- Hosamo, Haidar Hosamo, Paul Ragnar Svennevig, Kjeld Svidt, Daguang Han, and Henrik Kofoed Nielsen. 2022. "A Digital Twin Predictive Maintenance Framework of Air Handling Units Based on Automatic Fault Detection and Diagnostics." *Energy and Buildings* 261. doi:10.1016/j.enbuild.2022.111988.
- Ibrahim, Farha, Ely Zarina Samsudin, Ahmad Razali Ishak, and Jeyanthini Sathasivam. 2024. "The Relationship between Occupant Behaviour and Indoor Air Quality in Malaysian Hospital Outpatient Departments: A Multistage Cross-Sectional Study." *Heliyon* 10(14). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e34454.
- Ibrahim, Hadeel Tariq, Wamidh Jalil Mazher, and Osman Nuri Ucan. 2022. "AIoT in Healthcare: A Systematic Mapping Study." Pp. 1–6 in *2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things (ICAIoT)*. IEEE.
- Ida Syafiza M. Isa, Taisir E.H. El-Gorashi, Mohamed O.I. Musa, and Jaafar M.H. Elmighani. 2020. "Energy Efficient Fog-Based Healthcare Monitoring Infrastructure". *IEEE Access* 8:197828–52. doi:10.1109/ACCESS.2020.3033555.
- Iqbal, Javed, Murad Khan, Muhammad Talha, Haleem Farman, Bilal Jan, Arshad Muhammad, and Hasan Ali Khattak. 2018. "A Generic Internet of Things Architecture for Controlling Electrical Energy Consumption in Smart Homes." *Sustainable Cities and Society* 43:443–50. doi:10.1016/j.scs.2018.09.020.
- Jan, Mian Ahmad, Fazlullah Khan, Spyridon Mastorakis, Muhammad Adil, Aamir Akbar, and Nicholas Stergiou. 2021. "LightIoT: Lightweight and Secure Communication for Energy-Efficient IoT in Health Informatics." <http://arxiv.org/abs/2104.14906>.
- Ji, Ru, and Shilin Qu. 2019a. "Investigation and Evaluation of Energy Consumption Performance for Hospital Buildings in China." *Sustainability (Switzerland)* 11(6). doi:10.3390/su11061724.
- Ji, Ru, and Shilin Qu. 2019b. "Investigation and Evaluation of Energy Consumption Performance for Hospital Buildings in China." *Sustainability (Switzerland)* 11(6). doi:10.3390/su11061724.

- Kumar, Arun, Mehedi Masud, Mohammed H. Alsharif, Nishant Gaur, and Aziz Nanthaamornphong. 2025. "Integrating 6G Technology in Smart Hospitals: Challenges and Opportunities for Enhanced Healthcare Services." *Frontiers in Medicine* 12. doi:10.3389/fmed.2025.1534551.
- Li, Chunyan, Jiaji Wang, Shuihua Wang, and Yudong Zhang. 2024. "A Review of IoT Applications in Healthcare." *Neurocomputing* 565. doi:10.1016/j.neucom.2023.127017.
- Liang, Xinyu, Frits de Nijs, Buser Say, and Hao Wang. 2025. "Human-in-the-Loop AI for HVAC Management Enhancing Comfort and Energy Efficiency." Pp. 359–70 in *Proceedings of the 16th ACM International Conference on Future and Sustainable Energy Systems*. New York, NY, USA: ACM.
- Luo, Jiayi. 2022. "A Bibliometric Review on Artificial Intelligence for Smart Buildings." *Sustainability (Switzerland)* 14(16).
- Luschi, Alessio, Giovanni Luca Daino, Gianpaolo Ghisalberti, Vincenzo Mezzatesta, and Ernesto Iadanza. 2024. "Empowering Clinical Engineering and Evidence-Based Maintenance with IoT and Indoor Navigation †." *Future Internet* 16(8). doi:10.3390/fi16080263.
- Maddalena, Emilio T., Silvio A. Müller, Rafael M. dos Santos, Christophe Salzmann, and Colin N. Jones. 2022. "Experimental Data-Driven Model Predictive Control of a Hospital HVAC System during Regular Use." *Energy and Buildings* 271. doi:10.1016/j.enbuild.2022.112316.
- Malche, Timothy, Sumegh Tharewal, Pradeep Kumar Tiwari, Mohamed Yaseen Jabarulla, Abeer Ali Alnuaim, Wesam Atef Hatamleh, and Mohammad Aman Ullah. 2022. "Artificial Intelligence of Things- (AIoT-) Based Patient Activity Tracking System for Remote Patient Monitoring." *Journal of Healthcare Engineering* 2022:1–15. doi:10.1155/2022/8732213.
- Mischos, Stavros, Eleanna Dalagdi, and Dimitrios Vrakas. 2023. "Intelligent Energy Management Systems: A Review." *Artificial Intelligence Review* 56(10):11635–74. doi:10.1007/s10462-023-10441-3.
- Nagao, Hiroshi, Akane Uemichi, Yudai Yamasaki, and Shigehiko Kaneko. 2017. "Proposal of a Decision Scheme for Installing a Cogeneration System Considering Disaster Risks." *Applied Thermal Engineering* 114:1414–23. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.09.061.
- Nourdine, Brahim, and Abdallah Saad. 2020. "Energy Consumption in Hospitals." in *2020 International Conference on Electrical and Information Technologies, ICEIT 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Nyembwe, Jean Paul Kapuya Bulaba, John Omomoluwa Ogundiran, Behrang Chenari, Nuno Albino Vieira Simões, and Manuel Gameiro da Silva. 2023. "The

- Indoor Climate of Hospitals in Tropical Countries: A Systematic Review.” *Energies* 16(8).
- Ourahou, M., W. Ayir, B. EL Hassouni, and A. Haddi. 2020. “Review on Smart Grid Control and Reliability in Presence of Renewable Energies: Challenges and Prospects.” *Mathematics and Computers in Simulation* 167:19–31. doi:10.1016/j.matcom.2018.11.009.
- Pariso, Paolo, Michele Picariello, and Alfonso Marino. 2025. “AI Integration in Energy Management: Enhancing Efficiency in Italian Hospitals.” *Health Economics Review* 15(1):40. doi:10.1186/s13561-025-00638-3.
- Pise, Anil Audumbar, Khalid K. Almuzaini, Tariq Ahamed Ahanger, Ahmed Farouk, Kumud pant, Piyush Kumar Pareek, and Stephen Jeswinde Nuagah. 2022a. “Enabling Artificial Intelligence of Things (AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security Issues.” *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022:1–14. doi:10.1155/2022/8421434.
- Pise, Anil Audumbar, Khalid K. Almuzaini, Tariq Ahamed Ahanger, Ahmed Farouk, Kumud pant, Piyush Kumar Pareek, and Stephen Jeswinde Nuagah. 2022b. “Enabling Artificial Intelligence of Things (AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security Issues.” *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022:1–14. doi:10.1155/2022/8421434.
- Pise, Anil Audumbar, Khalid K. Almuzaini, Tariq Ahamed Ahanger, Ahmed Farouk, Kumud pant, Piyush Kumar Pareek, and Stephen Jeswinde Nuagah. 2022c. “Enabling Artificial Intelligence of Things (AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security Issues.” *Computational Intelligence and Neuroscience* 2022:1–14. doi:10.1155/2022/8421434.
- Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE : Indicateurs d'Efficacité Energétique pour la Méditerranée Avril 2014 Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE : Indicateurs d'Efficacité Energétique pour la Méditerranée. 2014.
- Rodrigues, Vinicius Facco, Rodrigo da Rosa Righi, Cristiano André da Costa, and Rodolfo Stoffel Antunes. 2022. “Smart Hospitals and IoT Sensors: Why Is QoS Essential Here?” *Journal of Sensor and Actuator Networks* 11(3). doi:10.3390/jsan11030033.
- Rohde, Tarald, and Robert Martinez. 2015. “Equipment and Energy Usage in a Large Teaching Hospital in Norway.” *Journal of Healthcare Engineering* 6(3):419–34. doi:10.1260/2040-2295.6.3.419.
- Saba Raoof, Syed, and M. A. Saleem Durai. 2022a. “A Comprehensive Review on Smart Health Care: Applications, Paradigms, and Challenges with Case Studies.” *Contrast Media and Molecular Imaging* 2022.

- Saba Raoof, Syed, and M. A. Saleem Durai. 2022b. "A Comprehensive Review on Smart Health Care: Applications, Paradigms, and Challenges with Case Studies." *Contrast Media and Molecular Imaging* 2022.
- Said, Abdel Mlak, Aymen Yahyaoui, and Takoua Abdellatif. 2021a. "Efficient Anomaly Detection for Smart Hospital IoT Systems." *Sensors* 21(4):1026. doi:10.3390/s21041026.
- Said, Abdel Mlak, Aymen Yahyaoui, and Takoua Abdellatif. 2021b. "Efficient Anomaly Detection for Smart Hospital IoT Systems." *Sensors (Switzerland)* 21(4):1–24. doi:10.3390/s21041026.
- Saleem, M. Usman, Mustafa Shakir, M. Rehan Usman, M. Hamza Tahir Bajwa, Noman Shabbir, Payam Shams Ghafaroki, and Kamran Daniel. 2023. "Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids." *Energies* 16(12). doi:10.3390/en16124835.
- Sun, Wencheng, Zhiping Cai, Yangyang Li, Fang Liu, Shengqun Fang, and Guoyan Wang. 2018. "Security and Privacy in the Medical Internet of Things: A Review." *Security and Communication Networks* 2018:1–9. doi:10.1155/2018/5978636.
- Thabit, Ahmed A., Mahmoud Shuker Mahmoud, Ahmed Alkhayat, and Qammer H. Abbasi. 2019. "Energy Harvesting Internet of Things Health-Based Paradigm: Towards Outage Probability Reduction through Inter-Wireless Body Area Network Cooperation." *International Journal of Distributed Sensor Networks* 15(10):155014771987987. doi:10.1177/1550147719879870.
- Toughzaoui, Y., R. Elkhatab, T. Kaoutari, H. Louahlia, H. Chaoui, and H. Gualous. 2024. "Advances in Hospital Energy Systems: Genetic Algorithm Optimization of a Hybrid Solar and Hydrogen Fuel Cell Combined Heat and Power." *International Journal of Hydrogen Energy* 86:1310–25. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.09.001.
- Uslu, Banu Çalış, Ertuğ Okay, and Erkan Dursun. 2020. "Analysis of Factors Affecting IoT-Based Smart Hospital Design." *Journal of Cloud Computing* 9(1):67. doi:10.1186/s13677-020-00215-5.
- Yaïci, Wahiba, Karthik Krishnamurthy, Evgueniy Entchev, and Michela Longo. 2021. "Recent Advances in Internet of Things (IoT) Infrastructures for Building Energy Systems: A Review." *Sensors* 21(6):2152. doi:10.3390/s21062152.
- Yalli, Jameel S., Mohd H. Hasan, Low T. Jung, Abdulrasheed I. Yerima, Dahiru A. Aliyu, Umar D. Maiwada, Safwan M. Al-Selwi, and Mujeeb U. R. Shaikh. 2025. "A Systematic Review for Evaluating IoT Security: A Focus on Authentication, Protocols and Enabling Technologies." *IEEE Internet of Things Journal*. doi:10.1109/JIOT.2025.3545737.

- Yoshino, Hiroshi, Tianzhen Hong, and Natasa Nord. 2017. "IEA EBC Annex 53: Total Energy Use in Buildings—Analysis and Evaluation Methods." *Energy and Buildings* 152:124–36. doi:10.1016/j.enbuild.2017.07.038.
- Yu, Yong. 2020. "AI Chiller: An Open IoT Cloud Based Machine Learning Framework for the Energy Saving of Building HVAC System via Big Data Analytics on the Fusion of BMS and Environmental Data." <http://arxiv.org/abs/2011.01047>.
- Zhihong Yang, Yingzhao Yue, Yu Yang, Yufeng Peng, Xiaobo Wang, and Wenji Liu. 2011. "Study and Application on the Architecture and Key Technologies for IOT." Pp. 747–51 in *2011 International Conference on Multimedia Technology*. IEEE.

Anexos

Sistemas Inteligentes de Gestión Energética Para Infraestructuras Hospitalarias

Smart Energy Management Systems for Hospital Infrastructure

Lidianeth De Gracia
*Facultad de Ingeniería
Biomédica e
Instrumentación
Universidad Latina
Panamá, Panamá
0009-0001-8784-0867*

Stacy Grant
*Facultad de Ingeniería
Biomédica e
Instrumentación
Universidad Latina
Panamá, Panamá
0009-0009-2598-3027*

Leydis Gonel
*Facultad de Ingeniería
Biomédica e
Instrumentación
Universidad Latina
Panamá, Panamá
0009-0005-3999-529X*

Dr. Luis Estrada P
*Facultad de Ingeniería
Biomédica e
Instrumentación
Universidad Latina
Panamá, Panamá
0000-0002-4126*

Resumen— La gestión energética en los hospitales representa un desafío significativo debido a su alto consumo, especialmente por su operación continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana y por su elevada demanda de recursos de los múltiples equipos biomédicos y sistemas instalados, los cuales requieren un suministro energético constante para su funcionamiento adecuado. En este trabajo de revisión sistemática, se analiza la implementación de sistemas inteligentes basados en la tecnología de Inteligencia Artificial de las Cosas (AIoT) como una alternativa para optimizar la gestión energética hospitalaria. Si bien la literatura muestra que los sistemas inteligentes suelen centrarse en áreas específicas utilizando tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) o la inteligencia artificial (IA) de forma independiente, este estudio identifica el potencial de integrar ambas en un enfoque combinado. A partir de esta integración, se plantea una estructura de referencia que ilustra cómo puede funcionar un sistema inteligente completo en el entorno hospitalario. A partir del análisis de seis factores clave que inciden en el consumo energético de los edificios, tres de naturaleza física (clima, envoltorio del edificio y equipamiento) y tres de influencia humana (operación y mantenimiento, comportamiento de los ocupantes y condiciones ambientales interiores del hospital), se propone una estructura funcional compuesta por siete etapas que permitiría integrar de forma eficiente estas variables en el entorno hospitalario. El estudio también realiza una revisión comparativa de siete artículos científicos que aplican tecnologías AIoT para la gestión energética, evaluando cuántos de los factores determinantes del consumo de energía son considerados en cada uno de ellos. Los resultados destacan la necesidad de adoptar un enfoque más integral que no solo contemple aspectos técnicos, sino también los comportamientos humanos dentro del hospital, con el objetivo de lograr una gestión energética completa, eficiente y sostenible de la infraestructura. Este trabajo busca ofrecer una visión práctica y adaptable, basada en la evidencia recopilada, que pueda servir como base para futuras implementaciones de sistemas inteligentes en hospitales, contribuyendo así a mejorar

la eficiencia operativa sin comprometer la calidad del servicio médico.

Palabras Claves—*Sistemas inteligentes; Gestión energética; Eficiencia energética; Entorno Hospitalario; Internet de las cosas (IoT); Inteligencia artificial (AI); Factores Determinantes de Consumo Total Energético*

Abstract— Energy management in hospitals represents a significant challenge due to their high energy consumption, particularly because they operate continuously 24 hours a day, 7 days a week, and due to the high resource demand from numerous biomedical devices and installed systems, which require a constant energy supply to function properly. This systematic review analyzes the implementation of intelligent systems based on Artificial Intelligence of Things (AIoT) technology as an alternative to optimize energy management in hospitals. While the literature shows that intelligent systems often focus on specific areas using technologies such as the Internet of Things (IoT) or Artificial Intelligence (AI) independently, this study identifies the potential of integrating both technologies into a combined approach. From this integration, a reference framework is proposed to illustrate how a comprehensive intelligent system can operate within the hospital environment. Based on the analysis of six key factors that influence energy consumption in buildings—three physical (climate, building envelope, and equipment) and three human-related (operation and maintenance, occupant behavior, and indoor environmental conditions within the hospital)—a functional structure composed of seven stages is proposed to integrate these variables in the hospital setting efficiently. The study also conducts a comparative review of seven scientific articles that apply AIoT technologies for energy management, evaluating how many of the key energy consumption factors are considered in each case. The results highlight the need for a more comprehensive approach that addresses not only technical aspects but also human behavior within hospitals, aiming for a complete, efficient, and sustainable management of the infrastructure's energy use. This work seeks to provide a

practical and adaptable vision, grounded in the evidence collected, that can serve as a foundation for future implementations of intelligent systems in hospitals, thus contributing to improved operational efficiency without compromising the quality of medical services.

Keywords—Smart systems; Energy management; Energy efficiency; Hospital environment; Internet of Things (IoT); Artificial Intelligence (AI); Key Factors of Total Energy Consumption.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la tecnología ha adquirido un papel fundamental en diversos ámbitos de la vida cotidiana. Su adopción ha aumentado de manera significativa, y su uso se ha visto reflejado en actividades como la comunicación, la educación, el transporte y el trabajo [1], [2], [3], [4]. Dentro de estos procesos de transformación, la atención médica no ha sido la excepción. Hasta hace poco, su aplicación se limitaba principalmente a equipos biomédicos de diagnóstico y al registro manual de datos clínicos [5]. Esta práctica no solo generaba un mayor margen de error humano, sino que también ralentiza el proceso, como resultado, menos personas tenían la posibilidad de ser atendidas. Actualmente se ha logrado realizar registros más rápidos, fáciles y seguros [6]. Un claro ejemplo de ello es la telemedicina, que permite conectar a los pacientes con sus médicos sin necesidad de una atención presencial, situación que representa un avance clave para quienes no tienen la facilidad de transportarse a un centro de salud cercano [7], [8]. De este modo, la tecnología no solo ha mejorado la atención médica, sino que ha facilitado un enfoque más significativo en la gestión hospitalaria [9]. Además, ha optimizado procesos y brindado apoyo en múltiples áreas, lo que comprende una gestión eficaz de los recursos, una optimización en la planificación operativa, un manejo eficiente de los inventarios que facilite una supervisión exacta de los materiales y un respaldo en la toma de decisiones fundamentada en una recolección de datos [10], [11]. Considerando las limitaciones del modelo previo del sector sanitario, han emergido nuevas sugerencias enfocadas en incrementar la eficacia en la asistencia médica. En este contexto, surge el concepto de salud inteligente, que incorpora tecnologías en auge con el propósito de optimizar la administración y suministro de servicios de salud. Dentro de estas tecnologías sobresalen los dispositivos inteligentes que facilitan la optimización de múltiples procesos hospitalarios en tiempo real [12], [13]

La gestión energética hospitalaria es un conjunto de procedimientos que favorece el monitoreo, regulación y optimización del consumo energético. Su objetivo es asegurar el uso eficiente de la energía, lo que implica entender el principio de eficiencia energética [14], [15], el cual se refiere al uso adecuado de la energía en momentos específicos,

evitando el consumo excesivo [16]. La eficiencia energética en hospitales no depende únicamente de mejoras físicas, sino también del aprovechamiento de todas las fuentes renovables y la cultura energética de quienes trabajan y visitan el hospital. Para ello, se requiere un enfoque integral que combine tecnología, gestión eficiente y responsabilidad social. Asimismo, es necesario profundizar en la investigación para diseñar hospitales que sean energéticamente eficientes y funcionales para sus usuarios [2]. Diversos estudios han abordado la utilización de tecnologías para la generación de energía [18], [19], se han propuesto diversas alternativas que buscan mejorar tanto el consumo como la generación de energía. Un ejemplo claro es el uso de la energía solar, que se obtiene mediante la colocación de paneles solares colocados en los edificios, con el objetivo de almacenar la energía y gestionar su consumo de manera inteligente, [7], [8], [9]. Por otro lado, en el ámbito de la instrumentación, se estudia la eficiencia del mantenimiento envolvente de los edificios, destacando los sistemas de ventilación y climatización (HVAC) [10], [11], [12], ya que se ha comprobado que la eficiencia energética en centros de salud puede mejorar a través de una gestión adecuada de los parámetros operativos de un edificio [13]. No obstante, aunque estos avances son fundamentales, la integración de un sistema inteligente es la clave para transformar esta gestión hacia un modelo verdaderamente eficiente y sostenible.

Para que la integración de un sistema inteligente sea eficaz, es indispensable primero reconocer y comprender el verdadero consumo energético que se necesita abastecer, con el fin de administrar correctamente los recursos [27]. En este sentido, la información sobre la producción y el consumo de energía es fundamental para diseñar estrategias efectivas de conservación energética. Es importante conocer dónde y cuándo se consume la energía en las instalaciones hospitalarias para así proponer soluciones efectivas [13]. Es sabido que los hospitales presentan un consumo energético elevado, ya que operan todos los días sin excepción, por lo que generan un impacto ambiental significativo [28]. Muchas de estas edificaciones son antiguas, presentan fallas en sus sistemas y tienen un bajo nivel de eficiencia energética. Su modernización es compleja, tanto de manera estructural como por la necesidad de mantener sus condiciones operativas óptimas y garantizar una calidad de servicio satisfactoria [6].

En un estudio basado en el análisis de más de 20 000 horas de datos operativos de áreas como quirófano, UCI, zonas de tratamiento, además de algunos equipos biomédicos, se logró estimar la cantidad de energía en tiempo real requerida para cada área. Los autores concluyeron que únicamente ciertas áreas aisladas, como UCI realmente funcionan las 24 horas del día, mientras que otras áreas como la de quirófanos tiene patrones de consumo muy desiguales.

No obstante, se identificó que los quirófanos requieren una mayor demanda de iluminación que incluso el área de UCI. Por otro lado, se observó que las áreas de tratamiento y exámenes no demanda una gran cantidad de energética en general, aunque esto varía dependiendo del tipo de equipo biomédico presente, ya que, por ejemplo, un equipo de resonancia magnética (MRI) puede consumir casi tanta energía como toda un área de exámenes [14]. Estos datos resaltan la importancia de considerar varios aspectos de cada área al momento incorporar soluciones inteligentes para reducir el consumo energético. En este sentido, implementar un sistema inteligente de gestión energética es clave para buscar una solución a esta demanda específicas de las áreas críticas, con la implementación de estos sistemas inteligentes buscamos conseguir un monitoreo, una predicción y una optimización del consumo energético en tiempo real, mejorando la eficiencia y la sustentabilidad del entorno hospitalario.

Por lo tanto, es importante incorporar herramientas tecnológicas que optimicen el uso de energía y, al mismo tiempo, se vaya de la mano con un enfoque de salud digital. Un Sistema de Salud Inteligente (SHS) se define como una red de servicios sanitarios respaldados por tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), dispositivos portátiles y la inteligencia artificial (AI) [30], [31]. Este sistema tiene objetivo vincular eficientemente a pacientes, personal médico, centros de salud y tutores mediante una plataforma compartida que facilita el intercambio de información y la conexión de manera inteligente. Para ello, se apoya en un conjunto de distintas tecnologías como IoT, AI, Edge, Fog y Cloud computing, big data, internet de sensores, ciencias aplicadas y nanotecnología[32]. La **Figura I** es una representación esquemática del flujo funcional de un sistema inteligente en infraestructuras hospitalarias. Este esquema funcional representa los elementos esenciales de un sistema inteligente, en conjunto simbolizan la inteligencia del sistema, desde el cual se destacan seis procesos interrelacionados: detección, transmisión de datos, almacenamiento, análisis inteligente, toma de decisiones y mejora continua. Este modelo resume el ciclo integral del funcionamiento de los sistemas inteligentes, destacando su capacidad de adaptación, aprendizaje y optimización autónoma en contextos complejos.

Por otro lado, un aspecto crucial a destacar en este contexto hospitalario es la seguridad, ya que asegura una atención ética y responsable [33] La protección de los datos es un derecho de los pacientes y una obligación de las instituciones sanitarias, los pacientes tienen derecho a que su información médica y personal sea manejada con confidencialidad y sea protegida frente a accesos no autorizados, pérdidas o alteraciones [34]. La incorporación de tecnologías emergentes como sistemas inteligentes

basados en tecnologías IoT, AI o plataformas de historial clínico digital, presentan oportunidades de mejorar la eficiencia y sostenibilidad hospitalaria [35]. Sin embargo, esta transformación digital también conlleva nuevos retos en cuanto a la seguridad y privacidad de los datos [36]. En la salud, los problemas más comunes de seguridad de la información incluyen tanto ataques de hardware como de software. Entre ellos destacan la inserción de troyanos en los componentes electrónicos durante la fabricación, el uso de software malicioso (malware), el ransomware en el que exigen pagos para desbloquear sistemas, sistemas operativos obsoletos sin actualizaciones de seguridad, y actualizaciones de firmware falsificadas que permiten el control no autorizado de dispositivos médicos[37], [38]. Estas vulnerabilidades comprometen la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información, lo cual representa una amenaza directa para la atención y seguridad del paciente [14]. Además, la gestión energética inteligente en hospitales está estrechamente relacionada a la ciberseguridad, ya que estos sistemas dependen de infraestructuras digitales conectadas. La falta de protección frente a ciberataques puede ocasionar fallos en el suministro energético, manipulación de datos o interrupciones en servicios críticos, afectando la eficiencia operativa y la seguridad del entorno clínico[40]. Por tanto, garantizar la seguridad de la información es fundamental para el correcto funcionamiento y la confianza en los sistemas inteligentes de gestión energética [41]. En consecuencia, al implementar sistemas inteligentes especialmente de gestión energética hospitalaria, es crucial integrar mecanismos que garanticen tanto la protección de los datos como la integridad de la información operativa. Por ello, es importante profundizar en el estudio de seguridad y privacidad de los sistemas inteligentes [42], [43].

Dado lo anteriormente expuesto, en la actualidad, los sistemas inteligentes aplicados a la gestión energética hospitalaria suelen enfocarse en áreas específicas como climatización, monitoreo o iluminación, dejando de lado una visión integral del consumo energético total. Este enfoque limita el potencial de mejora, ya que el consumo energético hospitalario involucra múltiples factores. Por ello, se plantea la necesidad de un sistema inteligente capaz de integrar todas las áreas de consumo mediante el uso de tecnologías como Artificial Intelligence of Things (AIoT), las cuales permiten recolectar, analizar y actuar en tiempo real de forma inteligente para una gestión energética eficiente [44], [45]. Bajo este enfoque, el objetivo del presente estudio es analizar cómo la adaptación de los seis factores que determinan el consumo energético en edificaciones al entorno hospitalario, junto con la integración de tecnologías AIoT, permite abordar de forma integral la gestión energética en hospitales [46], en contraste con soluciones tecnológicas aplicadas de forma



Figura I- Estructura operativa básica de un sistema inteligente, donde se muestran los elementos esenciales que permiten recopilar información, analizarla y mejorar continuamente su desempeño

aislada. Así se promueva la sostenibilidad y mejorar la eficiencia operativa hospitalaria sin comprometer la seguridad del paciente[47], [48]. Este trabajo recopila y evalúa distintas investigaciones con el fin de evidenciar el potencial de las soluciones inteligentes en la gestión energética hospitalaria.

Un sistema Inteligente es aquel que integra múltiples tecnologías con el fin de optimizar procesos en tiempo real. En el ámbito de la gestión energética en hospitales, existen algunas alternativas de sistemas inteligentes que logran dar resultados para la disminución del consumo energético; sin embargo, estos sistemas son relativamente nuevos y no logran satisfacer todos los elementos que determinan el consumo total de un edificio. En general, los sistemas inteligentes se enfocan en áreas puntuales, sin considerar otras variables que influyen en la eficiencia energética total de un hospital [49] Tecnologías como la Inteligencia Artificial y el deep learning permiten predecir el consumo energético futuro en hospitales, facilitando una planificación eficiente[50]. A su vez, la detección de anomalías permite identificar patrones inusuales, fallos de equipos o pérdidas no técnicas. El machine learning mejora estas predicciones mediante modelos individuales y de conjunto, aunque su precisión depende de la calidad de los datos disponibles [6] Por su parte, el IoT permite la identificación y transmisión de datos de dispositivos a través de sensores para su análisis, aunque requiere alta fiabilidad y conectividad[4]. La integración de estas tecnologías optimiza el control

energético en tiempo real, reduciendo costos y aumentando la sostenibilidad.

En esta revisión se analiza como la integración de tecnologías Artificial Intelligence of Things (AIoT), combinada con la adaptación de los seis factores determinantes del consumo energético de los edificios pueden permitir el desarrollo de un modelo de gestión energética hospital más completo eficiente y seguro. A partir de esta perspectiva, se busca responder la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué criterios permiten evaluar si la gestión energética de un hospital considera todos los aspectos clave del consumo, y qué tecnologías resultan más adecuada para desarrollar un sistema inteligente de gestión energética hospitalaria eficaz y completo?

II. ENERGÍA EN HOSPITALES

La utilización de energía en áreas hospitalarias provoca un efecto considerable debido al alto consumo, los costos operativos y el efecto ambiental que produce [51]. Para lograr una gestión eficiente necesitamos del empleo de sistemas inteligentes, capaces de fusionar diferentes tecnologías que permitan cubrir todas las áreas hospitalarias de acuerdo con la demanda. Un estudio realizado en Pakistán se reveló que cerca del 60% del consumo energético corresponde a los sistemas HVAC, el resto casi en su totalidad es atribuido al uso de equipos médicos como quirófanos, unidades de imagen y hornos, sin embargo, lo que más utiliza energía son

los sistemas de calefacción, refrigeración e iluminación [52], [53], [54]. Mediante Estas cifras y la aplicación de un sistema de evaluación energética, se pudo demostrar que los hospitales son estructuras más complejas en comparación con otros edificios. Por esto tienden a consumir más energía, esto se debe tomar en cuenta para la planificación de demanda energética en los hospitales[55]. Por su parte, en una revisión de distintos artículos para respaldar la importancia que se le debe dar al consumo energético pudimos encontrar que, en China, el consumo en hospitales dobla el de edificios públicos[55]; mientras que, En España, los hospitales consumen alrededor del 20% de energía total usada en edificios, Ubicándose entre las demandas más altas de energía y más altas de edificios [56]. En el contexto del sector terciario, los hospitales representan una de las infraestructuras con mayor demanda energética. De acuerdo con datos del Ministerio de Energía y Minas, estas instituciones concentran cerca del 33% del consumo nacional de energía eléctrica en dicho sector [57]. Sin embargo, Si bien es cierto que los hospitales tienen un alto consumo energético se logró comprobar que con el uso de sistemas de gestión inteligente (SEMS), se puede optimizar el consumo. A través de módulos inteligentes que permiten programar el uso de los equipos según la demanda real, se consigue no solo reducir el gasto energético en horarios de tarifa alta, sino también extender la vida útil de los dispositivos al evitar sobrecargas. Esta gestión inteligente ayuda de manera significativamente a reducir los gastos operativos, incrementar la comodidad del ambiente hospitalario y minimizar el impacto ecológico,

fomentando de esta manera un modelo más eficaz y sostenible para el sector de la salud[58], [59]. En la **Tabla I** se presenta una recopilación de datos sobre el consumo energético en diversas áreas funcionales de un hospital. Su meta es evidenciar cómo cada sistema contribuye al consumo total de energía, lo que facilita la identificación de los sectores con mayor demanda y facilita la elaboración de estrategias de eficiencia energética adaptadas al entorno hospitalario. Por otro lado, a partir de los puntos previamente mencionados y sabiendo que en este trabajo se busca alcanzar la eficiencia energética, que se entiende como la capacidad de utilizar menor cantidad de energía posible, para cumplir con una determinada función sin comprometer el servicio. Para esto se debe integrar estrategias como observamos en la **Figura II**, que ayudan a reducir el consumo energético y promueven la sostenibilidad en entornos hospitalarios. Logrando así obtener un HVAC eficiente, iluminación optimizada, uso de energía solar inteligente, equipos biomédicos eficientes, monitoreo energético en tiempo real y concienciación del personal sobre prácticas responsables [60].

Tabla IV Consumo Energético en Hospitales

Área o sistema	Consumo Energético en Hospitales		
	Consumo	Características clave	Referencia
Iluminación	34–39 kWh/(m ² ·año)	Consumo estimado en hospitales europeos	[49]
Aire acondicionado	9,303 kW (frío)	Sistema central con agua circulada.	[107]
Calefacción	5,582 kW (calor); 3 calderas de 2,791 kW c/u	Calderas de agua caliente al vacío; carga de calefacción diseñada para invierno	[107]
Cocina	1.1 kWh/(m ² ·año)	Consumo reportado por cocción de alimentos	[108]
Equipos médicos	1000 kWh/año por equipo	Distribución típica del calor residual de equipos médicos; requiere eliminación de calor incluso en clima frío	[109]
Agua caliente	125 kWh/m ²	Representa un alto consumo para los hospitales.	[49]

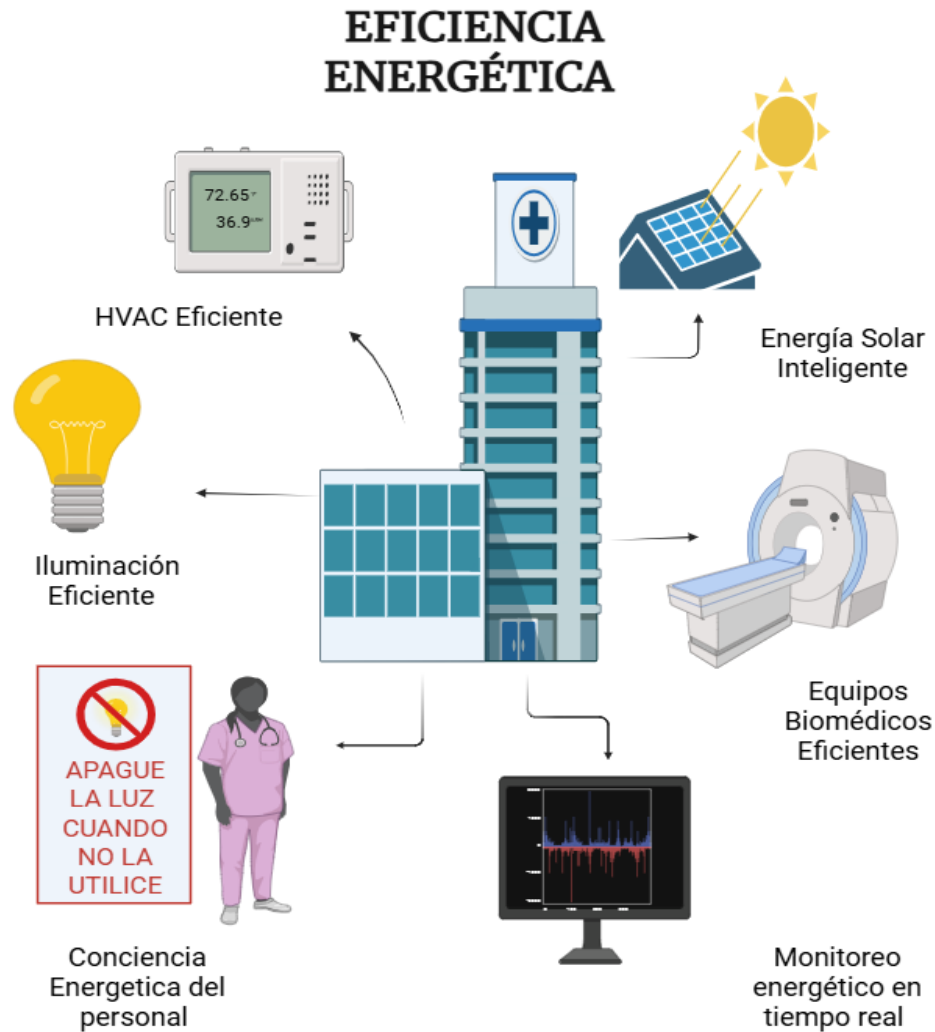


Figura II Representación de la Eficiencia Energética en hospitales mediante acciones claves

A. Necesidad de garantizar un funcionamiento ininterrumpido.

Los hospitales al brindar servicios de atención médica, es necesario que no detengan su actividad, incluso si hay cortes de energías. Debido a esto, es muy común que las infraestructuras hospitalarias cuenten con sistemas de respaldo energético para prevenir y poder solventar las cargas esenciales. viéndolo en un escenario normal, esta medida suele ser suficiente. Sin embargo, Existen diversos riesgos que deben ser prevenidos [61]. Un caso emblemático se dio en enero de 2017, cuando operadores de países como Francia, Italia, Suiza, Bélgica, Rumanía, Bulgaria y Grecia enfrentaron severas dificultades para mantener el suministro

energético, debido a una brusca caída de temperatura y condiciones climáticas extremas[62]. Ejemplos como el huracán Katrina (EE. UU., 2005) [63]. o el terremoto de Kumamoto (Japón, 2016) [64]. En estos casos se evidencia los límites de este enfoque: el combustible se agotó en menos de dos días, dejando a los hospitales sin energía durante lapsos prolongados. Ante esto, surge la necesidad de estrategias que no solo consideren respaldo energético, si no que contemplen gestión energética, incluso para prever situaciones extremas [65]. En instalaciones críticas, como lo son los hospitales garantizar un suministro eléctrico es indispensable, ya que no se puede comprometer servicios vitales como lo son la unidad de cuidados intensivos, quirófanos o equipos de soporte vital.

En el estudio realizado por Gambarotta et al. (2023), se indica el requisito principal para implementar la estrategia MPC es garantizar la continuidad del servicio. La solución adoptada integra una arquitectura de control dual (a corto y largo plazo), como se ve en la **Figura III**, que permite optimizar en tiempo real el uso de recursos energéticos sin comprometer la continuidad del servicio. Para ello, el MPC opera de manera paralela al sistema de gestión tradicional (BaU), evitando interferencias directas con el funcionamiento del hospital. Además, se implementó una lógica de respaldo (watchdog) dentro del sistema de gestión del edificio (BMS), que permite restablecer inmediatamente el control convencional en caso de falla del MPC, asegurando así la entrega continua de energía[59]. Estas experiencias demuestran que garantizar la continuidad energética en hospitales es indispensable, en el siguiente punto evidenciamos la necesidad y los beneficios que otorga el apoyarse en tecnologías inteligentes como IoT que a su vez integra inteligencia artificial, aprendizaje automático, Edge computing y computación en la nube, de esta manera se podría garantizar un funcionamiento hospitalario ininterrumpido. Logrando así la reducción del consumo energético total, un sistema más resiliente y sostenible.



Figura III Modelo de Predicción de Control

III. FACTORES DETERMINANTES DEL CONSUMO ENERGÉTICO APLICADOS A UN ENTORNO HOSPITALARIO

Para entender cómo realizar una gestión energética eficaz en el entorno hospitalario, primero se deben identificar los factores que determinan el consumo de energía del

edificio, con el fin de que, a partir del reconocimiento de estos elementos, se logre plantear una estrategia de gestión energética verdaderamente eficiente, estos factores no se encuentran específicos a un entorno hospitalario. Estos factores no están definidos específicamente para un entorno hospitalario; sin embargo, si han sido identificados para edificaciones en general. En este apartado, se adaptarán estos factores a una perspectiva hospitalaria. La Agencia Internacional de Energía (IEA) define seis factores claves que influyen en el consumo energético total de los edificios, el clima, el envolvente del edificio, el equipamiento del edificio, la operación y mantenimiento, el comportamiento de los ocupantes y las condiciones ambientales interiores. Estos factores se pueden clasificar en dos grupos: físicos y de influencia humana. En el grupo de factores físico destacan los primeros tres puntos, los cuales aportan a la estimación del rendimiento energético; este grupo suele ser el más considerado al momento de predecir el consumo energético de un edificio. Por otro lado, en la clasificación de influencia humana destaca los tres últimos factores, los cuales raramente son mencionados. No obstante, en este trabajo se detalla cómo, al incorporar los factores humanos se obtiene el consumo energético real. A lo largo de este apartado se desarrollará cada uno de los factores, analizándolo desde una perspectiva de gestión energética en un entorno hospitalario[66].

A. Factores Físicos

Para una gestión energética eficiente, el factor climático es primordial, ya que determina la necesidad de calefacción o refrigeración del espacio. En regiones frías la demanda energética en las edificaciones es significativa por el constante uso de calefacción, lo anterior demanda la implementación de sistemas térmicos eficientes y adecuados al entorno para asegurar el confort y reducir el gasto energético. Dentro del ámbito hospitalario, el clima influye en la demanda de áreas críticas como quirófanos, UCI y laboratorios, donde es necesario mantener rangos térmicos estrictos. Un estudio realizado en cien hospitales en China demuestra que mejorar los sistemas de Aire Acondicionado (AC) es una de las principales formas de lograr ahorros energéticos en los hospitales[67]. Por su parte, un estudio realizado en Australia señala que las emisiones de gases de efecto invernadero se atribuye principalmente a la calefacción, refrigeración y ventilación de los espacios [68]. Sus hallazgos evidencian que gracias al calentamiento climático el uso de energía para la calefacción disminuyó, pero la demanda de refrigeración aumentó afectando el consumo energético[69].

El segundo factor clave corresponde a la envolvente del edificio, en el cual el diseño, los materiales y estado de conservación del edificio actúan como barrera entre el

ambiente exterior e interior. En infraestructuras de la salud el envolvente es crucial, por la necesidad de mantener temperaturas adecuadas interiores de manera constante en zonas sensibles como salas de recuperación y hospitalización. Un ejemplo de esto es el de un nuevo hospital neonatal, ubicado en España, el cual fue monitoreado y sometido a simulaciones energéticas del edificio para evaluar el efecto de la envolvente del edificio en la demanda energética. Los resultados mostraron, por un lado, que las ganancias de radiación solar transmitidas a través de la fachada tienen un impacto importante en la temperatura interior de las salas analizadas, por tanto, una envolvente inadecuada desprotege a la instalación del flujo de calor externo [32]. Otro componente fundamental es el equipamiento del edificio, el cual incluye todos los sistemas e instalaciones que consumen energía para mantener el funcionamiento del recinto, desde sistemas de climatización, ventilación hasta iluminación y ascensores. En las unidades hospitalarias este factor toma una relevancia aún mayor debido a la alta demanda energética, ya que esta debe cubrir dispositivos biomédicos, sistemas de climatización, iluminación continua y tecnologías de soporte vital. Una investigación en Noruega sobre el consumo eléctrico del equipamiento en un hospital universitario comparó el uso de energía de los equipos entre diferentes áreas. Entre sus conclusiones, reportó que el uso de equipos varía significativamente según horarios y días. Por otro lado, en las áreas de laboratorio, los equipos operan de forma continua, mientras que, en UCI, el uso real de equipos es menor a la capacidad instalada, lo que exige sistemas HVAC eficientes a baja carga[71] No obstante, el equipamiento no solo se refiere a dispositivos. Resultados de un estudio en el que se analizó cinco áreas distintas dentro del hospital que se diferenciaban en sus intensidades energéticas y horarios en los que operaban, encontraron que la mayor demanda de iluminación provenía de áreas con baja demanda energética, en contraste con áreas intensivas que presentaron altas cargas energéticas debido a la ventilación especializada y equipos de laboratorio [72].

B. Factores de Influencia Humana

Desde la perspectiva del factor humano, la operación y el mantenimiento de los edificios es esencial para lograr un funcionamiento eficiente, ya que con una gestión adecuada se espera reducir el consumo energético, reducir costos, prolongar la vida útil de los sistemas y prevenir fallos. Todo esto impacta directamente en la seguridad de los ocupantes. Aplicado a instalaciones hospitalarias, este aspecto tiene una notabilidad aún mayor, ya que no solo impacta en la energía del inmueble, sino también en la continuidad de los servicios de salud. Una Investigación centrada en evaluar el impacto económico y ambiental del consumo energético propone distintas alternativas de ahorro energético, entre ellas: la

energía eléctrica, sistemas HVAC, agua caliente sanitaria (ACS), iluminación, entre otras. Teniendo en cuenta el factor de operación y mantenimiento, sus hallazgos relevantes indican que los sistemas de climatización y calefacción (HVAC) impactan de manera significativa en el gasto energético. También se concluyó lo esencial que es emplear soluciones de iluminación eficientes, como equipos de bajo consumo, luminarias de alto desempeño y controladores de intensidad luminosa. Asimismo, concluyen que el uso de la energía solar para producir agua caliente reduce significativamente el consumo energético y las emisiones, siendo una opción eficiente, especialmente en edificios de gran demanda [73].

Las acciones cotidianas de los ocupantes son otro aspecto notable que influye en el desempeño energético de los edificios. El comportamiento de los ocupantes influye en las acciones tomadas para ajustarse o reaccionar a las condiciones ambientales del espacio. Hábitos como el uso racional de la iluminación, climatización o equipos electrónicos contribuyen a una operación más eficiente. En el sector de la salud, las prácticas del personal, pacientes y visitantes tiene un impacto directo en el uso eficiente de la energía. Acciones como dejar abiertas las puertas en áreas climatizadas, mantener luces encendidas sin uso y operar equipos sin supervisión aumentan el gasto energético. Una publicación realizada en hospitales de Malasia, que estudia la relación entre el comportamiento de los ocupantes y la calidad del aire interior de los departamentos ambulatorios, determinó que factores como la conducta de los ocupantes, la densidad, las actividades y el uso de equipos y la eficiencia de la envolvente influyen notablemente en la calidad del aire interior en áreas. Estos son factores modificables, por lo que los autores indican que estos hallazgos ofrecen una base para que gestores de salud y especialistas implementen estrategias de control[74] .

Tabla V Factores de Consumo Energético y su Vinculación con las Tecnologías AIoT

Factores del Consumo eléctrico total	Factores de consumo energético y su vinculación con tecnologías AIoT			
	<i>Impacto en el consumo energético hospitalario</i>	<i>Tecnologías AIoT aplicables</i>	<i>Aplicación Practica</i>	<i>Referencia</i>
Clima	Optimización del consumo energético del sistema de enfriamiento (chiller) considerando las variaciones y condiciones del clima exterior	AI, ML, Big Data	optimización energética basado en aprendizaje automático que usa datos históricos y en tiempo real para ajustar sistemas HVAC según el clima exterior	[77]
Envolvente del edificio	Monitoreo ambiental y desempeño del edificio mediante BIM-FM mejora la gestión energética y operativa de la envolvente, impactando el consumo energético	BIM, IoT, AI, Robótica	Uso de BIM-FM para el monitoreo ambiental y energético de la envolvente del edificio, incluyendo control del flujo de aire y radiación solar, que optimizan el desempeño energético y la respuesta operativa del hospital	[78]
Equipamiento	Mejora en el mantenimiento reduce tiempos de inactividad y posibles consumos innecesarios del equipamiento médico	AI, IoT	Gestión centralizada del mantenimiento de equipamiento médico mediante IoT (BLE, RTLS) y plataformas integradas, mejorando tiempos y eficiencia en hospitales	[79]
Operación y el mantenimiento	Ahorros energéticos significativos derivados de la detección y corrección de fallas operativas en unidades AHU, optimizando su operación y mantenimiento	AI, IoT, ML, Digital Twin, BIM	Mantenimiento predictivo basado en Digital Twin para AHU, que detecta fallas, predice estados futuros y mejora la planificación y eficiencia del mantenimiento.	[80]
Acciones cotidianas de los ocupantes	Ahorros energéticos logrados al optimizar el consumo HVAC, teniendo en cuenta el comportamiento y las acciones diarias de los ocupantes para mantener confort térmico.	AI, IoT, ML	Reconocimiento de patrones y control predictivo, aplicados al comportamiento del ocupante y sistemas HVAC para mejorar eficiencia y confort	[81]
Condiciones ambientales interiores	Potencial ahorro energético al ajustar en tiempo real los puntos de consigna térmicos según el confort de los ocupantes, optimizando HVAC	AI, ML	Predicción en tiempo real del índice PMV usando redes neuronales para clasificar el confort térmico y ajustar el control HVAC dinámicamente	[81]

Para finalizar, mantener las condiciones ambientales interiores adecuada es esencial para el confort de los ocupantes. Condiciones como temperatura, humedad, ventilación e iluminación guardan una relación directa con el consumo energético, ya que implican el uso constante de sistemas como aire acondicionado, calefacción e iluminación artificial. Desde una perspectiva hospitalaria, esto no solo está vinculado al confort, sino también a otros elementos críticos como el control de infecciones y al soporte de procesos clínicos sensibles. Ciertas áreas críticas de los hospitales exigen parámetros estrictos con respecto a la temperatura, humedad y ventilación, lo que implica un uso intensivo de recursos energéticos. Una indagación científica reveló que se existe una escasez de investigaciones sobre el clima interior en edificios de países tropicales, y concluyó que representa una preocupación, especialmente ante el cambio climático y la contaminación industrial del aire, lo que aumenta la demanda de sistemas HVAC para garantizar el confort térmico y la calidad del aire [37]. Con el fin de evaluar las condiciones ambientales interiores, se suele utilizar el modelo PMV, siendo clave en entornos hospitalarios para garantizar el bienestar de personal y pacientes. Un análisis de la literatura de investigaciones relacionadas con el confort térmico y su aplicación en hospitales, centros de salud y centros geriátricos identificó que un ambiente térmico adecuado, además de ser esencial para distintos ocupantes, requiere más investigación sobre su impacto en la productividad, ya que la información es escasa. Adicionalmente, se subraya la relevancia de tener en cuenta otros factores de la calidad ambiental interior, como la calidad del aire, especialmente después de la experiencia de la pandemia de COVID-19 [76].

Por lo tanto, al examinar los seis elementos que afectan el consumo total de energía de los edificios, se resalta su interacción dinámica en el entorno hospitalario. Se destaca que una correcta administración no solo influye en la eficiencia energética, sino también en la seguridad de los pacientes, la calidad de los servicios que se brindaran y la sostenibilidad operativa. Comprender esta influencia permite diseñar estrategias efectivas y adaptadas al sector de la salud, y además sienta las bases para la implementación de sistemas inteligentes que optimicen la gestión energética hospitalaria de manera integral. Para comprender de forma más específicas estos seis factores que influyen en el consumo energético, en la **Tabla II** se presenta una adaptación de estos elementos con soluciones basadas en tecnologías AIoT, en la que se expone cada factor junto con su impacto en el consumo energético, las tecnologías inteligentes que se utilizan y una ejemplificación de ella. Esta tabla permite visualizar de manera estructural el potencial del uso de sistemas inteligentes en la eficiencia operativa de los hospitales. A partir del análisis de los factores y su vinculación con

tecnologías basadas en AIoT, se identificaron patrones relevantes que se presentan en la **Tabla II**, del contenido de esta tabla se encontraron hallazgos relevantes que merecen ser destacados. Uno de los primeros puntos a destacar es el papel que juegan las condiciones climáticas del entorno. Estas circunstancias externas son el factor predominante que influye en la demanda del sistema HVAC del edificio y, en consecuencia, en su consumo energético [77]. En lo que se refiere al uso de BIM-FM para monitoreo ambiental y energético de la envolvente del edificio, se evidenció una estructura rígida entre las aplicaciones BIM-FM las cuales carecen de autonomía completa. Causando así limitantes en la flexibilidad lo cual impide el flujo dinámico entre niveles [78]. Por otro lado, el proyecto OHIO mejora la gestión del equipamiento hospitalario mediante la integración avanzada de software y nuevas interfaces, lo que incrementa la fiabilidad de los dispositivos y reduce tiempos de inactividad. Los resultados evidencian una mejora significativa en las actividades de mantenimiento sistemático, gracias a códigos de fallo y KPIs estandarizados que permiten un análisis más eficiente y basado en evidencia. Además, las interfaces gráficas intuitivas facilitan el trabajo del personal, optimizando la operación y contribuyendo a un entorno clínico más seguro y eficiente [79]. Para la operación y el mantenimiento un artículo destaca cómo el Gemelo Digital optimiza estos al utilizar un sistema de mantenimiento predictivo integrado con BIM, sensores IoT y gestión de instalaciones. Este enfoque permite la detección automática de fallos, predicción de condiciones y planificación anticipada del mantenimiento, aumentando la vida útil de las Unidades de Manejo de Aire (AHU). Los resultados de los autores muestran alta efectividad en la detección de problemas variados, aunque se señala la necesidad de mejorar la selección de algoritmos y adoptar modelos de datos estandarizados y aprendizaje incremental para perfeccionar la precisión y actualización continua del sistema [80]. En cuanto a las acciones de los ocupantes el artículo resalta su importancia en la gestión energética de edificios mediante técnicas de IA que consideran el confort térmico, basándose en datos reales obtenidos a través de cuestionarios, entrevistas y mediciones directas. Se enfatiza el uso de redes neuronales y lógica difusa para modelar y adaptar dinámicamente las condiciones ambientales según la percepción y comportamiento humano. Además, los autores resaltan que la integración de la conciencia contextual y el seguimiento de la actividad humana son claves para ajustar eficientemente los sistemas [81]. Por último, para el factor de las condiciones ambientales interiores se revisa un artículo que presenta un modelo basado en inteligencia artificial que utiliza redes neuronales artificiales (ANN) para predecir el índice PMV, integrable en sistemas HVAC con el fin de optimizar el consumo energético sin comprometer el confort térmico, siguiendo los estándares ASHRAE. Los autores

demostraron la eficacia del modelo para mejorar la eficiencia energética y la calidad ambiental en edificios mediante un control adaptativo [81]. Como se evidencia en los seis artículos revisados para la tabla II, los seis factores que influyen en el consumo total energético de los edificios están presentes, al menos un factor por artículo, en investigaciones sobre sistemas inteligentes de gestión energética. No obstante, es poco común encontrar estudios que aborden de manera integral todos los seis factores al mismo tiempo. En su mayoría, los enfoques se centran en aspectos específicos de la gestión energética, sin ofrecer una visión completa ni una solución global para la totalidad del entorno hospitalario. Por lo que, al considerar los seis factores al momento de integrar un sistema inteligente a un entorno hospitalario, se puede considerar que será un sistema completo para todas las áreas del hospital.

IV. AIOT: LA CONVERGENCIA DE INTERNET DE LAS COSAS E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El internet de las cosas (IoT) ha revolucionado la forma en que los hospitales monitorean su funcionamiento, con el fin de recopilar, compartir, monitorizar, almacenar y analizar los datos generados en tiempo real, lo que ayuda a tomar decisiones más rápidas y precisas [25], [82]. La Implementación de este sistema en hospitales, ha facilitado la monitorización en tiempo real del consumo energético, permitiendo ajustes automáticos según las necesidades específicas de cada área funcional, gracias a sensores interconectados y plataformas inteligentes, es posible administrar ajustes automáticos como la iluminación, climatización y el uso de equipos biomédicos, optimizando el desempeño operativo del hospital [83], [84]. Las aplicaciones de IoT se benefician ampliamente de la introducción de tecnologías inalámbricas, para operaciones de monitoreo y supervisión, y también facilitan la integración de servicios en la nube. La computación en la nube ofrece la posibilidad de almacenar, procesar y analizar grandes cantidades de datos (big data), lo que facilita el desarrollo y la implementación de servicios avanzados de IA y ML [47]. Una de las ventajas más destacadas de la innovación en el contexto de la IoT en el sector sanitario es la disminución de costos, dado que la incorporación de dispositivos y tecnologías facilita la reducción de los costos operativos y simultáneamente potencia la calidad del servicio [48], [49], [50]. Por ejemplo, los costos médicos se disminuyeron significativamente a través de la implementación de soluciones como la computación en la nube y el uso de la

administración de recursos [49]. Por otra parte, la provisión de atención médica basada en IoT reduce el número de personas que visitan clínicas y hospitales, reduciendo así la carga de costos para los pacientes [52]. La gran cantidad de datos generados por los dispositivos IoT en hospitales requiere herramientas analíticas avanzadas para su eficaz procesamiento [14]. Esto ha evidenciado la importancia de incluir inteligencia artificial (IA), la cual facilita la conversión de dichos datos en información valiosa a través de análisis automatizados [16]. La IA potencia la capacidad del IoT al incorporar funciones como la identificación de patrones, pronóstico del consumo de energía y soporte a la toma de decisiones automatizada [53],[92].

La convergencia entre IoT e IA ha dado lugar al concepto de AIoT (Artificial Intelligence of Things), una tecnología que ayuda a automatizar procesos en tiempo real y a mejorar el desempeño energético [15],[16]. Esta integración hace posible que los dispositivos médicos no solo recopilan datos, sino que también los analizan y toman decisiones al instante, lo que resulta en una atención más eficiente lo que mejora la atención al paciente y un funcionamiento más optimizado en los hospitales [55]. En el contexto de la administración energética en hospitales, AIoT facilita la modificación dinámica de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) según el clima exterior y las condiciones internas del inmueble. Adicionalmente, la incorporación de arquitecturas fundamentadas en el paradigma Edge/Fog/Cloud Computing proporciona significativos beneficios al poner en marcha aplicaciones basadas en AIoT, dado que la capacidad Edge se ocupa de recolectar grandes volúmenes de datos, mientras que la capacidad Cloud posee la habilidad computacional para gestionar grandes volúmenes de datos y ejecutar algoritmos de Inteligencia Artificial de alta complejidad. [94],[57].

El avance hacia dispositivos inteligentes que pueden analizar su entorno y tomar decisiones al instante, sin depender completamente de la nube, ha dado lugar a una nueva generación de soluciones basadas en el Internet de las Cosas (IoT) [57], [58]. Cuando se integran sistemas AIoT en los hospitales, no solo se logra gestionar mejor la energía, sino que también se mejora la calidad del servicio, se reducen los costos operativos y se fomenta un ambiente más sostenible. sin embargo, la implementación de AIoT aun enfrenta desafíos como altos costos de implementación, la necesidad de personal técnico especializado y riesgos asociados con ciberseguridad. Pese a ello, estas tecnologías representan una oportunidad clave para lograr hospitales más sostenibles y

eficientes [59]. Al integrar internet de las cosas más inteligentes en entornos hospitalarios ha permitido que gestionar la energía sea mucho más sencillo y eficiente. Esto permite monitorizar en tiempo real aspectos clave y facilita una gestión energética más eficiente, el mantenimiento de los equipos y las condiciones ambientales internas, lo cual se traduce en una reducción significativa del consumo energético. Esta teoría está respaldada por una investigación de la Agencia Internacional de la Energía (AIE), que



Figura IV Esquema representativo de los elementos que complementa la AIoT

identificó seis factores esenciales que determinan el consumo energético en edificios.

La implementación de sistemas AIoT, que se representa en la Figura IV permite una gestión más inteligente mediante la integración de cuatro componentes, el procesamiento con AI que permite un análisis más preciso, sensores que recopilan datos relevantes como temperatura, ocupación de espacios y uso de equipos médicos. Estos datos son transmitidos por redes robustas para una comunicación inteligente. También observamos en la Figura IV La implementación de sistemas AIoT, que se representa en la Figura IV permite una gestión más inteligente mediante la integración de cuatro componentes, el procesamiento con AI que permite un análisis más preciso, sensores que recopilan datos relevantes como temperatura, ocupación de espacios y uso de equipos médicos. Estos datos son transmitidos por redes robustas para una comunicación inteligente [75]. También observamos en la Figura IV como tenemos integrado los factores

clave que, al ser considerados, no solo se mejora la eficiencia energética, sino que se logra una respuesta más adaptada y ágil frente a las demandas reales del entorno hospitalario [26]. La implementación de sistemas AIoT, que se representa en la **Figura IV** permite una gestión más inteligente mediante la integración de cuatro componentes, el procesamiento con AI que permite un análisis más preciso, sensores que recopilan datos relevantes como temperatura, ocupación de espacios y uso de equipos médicos. Estos datos son transmitidos por redes robustas para una comunicación inteligente [66]. También observamos en la **Figura IV** como tenemos integrado los factores clave que, al ser considerados, no solo se mejora la eficiencia energética, sino que se logra una respuesta más adaptada y ágil frente a las demandas reales del entorno hospitalario [60].

V. TECNOLOGÍAS CLAVES DE UN SISTEMA INTELIGENTE BASADO EN AIOT

Los sistemas inteligentes han emergido como soluciones innovadoras que brindan una mejor calidad de diagnóstico, el monitoreo y la eficiencia en la gestión hospitalaria. Estos integran diversas tecnologías avanzadas que permiten realizar procesos como la adquisición, transmisión, procesamiento y análisis de cantidades significativas de datos clínicos en tiempo real [67]. En este contexto, el Internet de las Cosas Inteligente (IoT) surge como una solución que conecta los distintos dispositivos, facilitando la recopilación y el envío de datos. No obstante, para que estos dispositivos aporten verdadero valor en un entorno hospitalario, es fundamental dotarlos de capacidades de análisis, predicción y respuesta inteligente. Por esta razón, en este trabajo se opta por integrar tecnologías AIoT. Luego de haber explicado el termino y los componentes de AIoT en la sección anterior, en este apartado se abordan las tecnologías específicas que conforman dicho enfoque y que serán consideradas en este estudio. Se reconoce al Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL) como núcleo de la toma de decisiones automáticas, por su capacidad de reconocer patrones y realizar predicciones a partir de grandes volúmenes de datos. Además, se integrarán las tres capas de procesamiento: Cloud, Edge y Fog Computing, las cuales permiten responder con eficiencia según la ubicación y urgencia del procesamiento. Siendo estas seleccionadas por su impacto directo en el procesamiento inteligente, distribuido y eficiente de datos en entornos hospitalarios. [68].

A. *Inteligencia Artificial (AI)*

La inteligencia artificial es una tecnología que permite la creación de un sistema capaz de aprender y tomar decisiones similares a las de un humano, respaldando así sistemas operativos dentro un hospital. En esencia, la AI es la ciencia de dotar a los programas de la capacidad de adaptarse y mejorar a partir de sus propias experiencias [[69]. Esta tecnología ha transformado la forma de trabajar, principalmente al suplir tareas manuales, La AI se basa en diversas técnicas de aprendizaje, como redes neuronales, máquinas de vectores de soporte, regresiones, árboles de decisión y modelos de Markov [70]. Una de las ventajas más significativas es que permite al personal de salud diagnosticar enfermedades de manera rápida y precisa, optimizando el tiempo del profesional para una mayor interacción con los pacientes. Entre sus aplicaciones destacan el análisis de imágenes médicas, como radiografías, resonancias magnéticas (MRI), ecografías, tomografías computarizadas (CT) y absorciómetros de rayos X de energía dual (DXA). Además, la AI puede analizar diversos tipos de datos de los pacientes, incluyendo imágenes médicas 2D/3D, bioseñales, signos vitales, datos demográficos, historial médico y resultados de pruebas de laboratorio. Este análisis contribuye con la toma de decisiones y ofrece resultados predictivos precisos que apoyan al profesional de la salud en la atención de los pacientes [[71]. Cabe señalar que la eficiencia de la IA depende tanto de la calidad como de la pertinencia de sus datos de entrada. En el contexto de eficiencia energética, es importante identificar los factores determinantes del consumo, como el clima, la infraestructura y los equipos, contribuyendo a una gestión energética hospitalaria más eficiente [[72].

B. *Machine Learning (ML) Y Deep Learning (DL)*

Tanto la AI como el ML se utilizan cada vez con mayor frecuencia en el ámbito de la salud, ya que estos son de utilidad en múltiples sistemas de atención al paciente. El ML, es una Rama de la AI este utiliza datos y algoritmos y con estos simulan los procesos de aprendizaje humano[71]. Inicialmente, esta tecnología se reconocía como una mejora del enfoque computacional tradicional, en el que los equipos aprendían por medio de la codificación basada en datos. En un principio, el ML implicaba métodos de aprendizaje supervisado, donde los algoritmos trabajaban con datos etiquetados para realizar predicciones y clasificaciones[73]. Entre los elementos que se destaca ML está su capacidad de analizar grandes volúmenes de datos, la detección de patrones complejos y la precisión en sus predicciones. Sus aplicaciones incluyen la detección temprana de

enfermedades, el diagnóstico médicos a partir de imágenes, la personalización de tratamientos, la asistencia en cirugía robótica y la gestión eficiente de datos clínicos, esta tecnología contribuye a la mejora de eficiencia y calidad de los servicios médicos[67].

Por su parte, Deep learning, es una subárea de ML que imita el procesamiento de información del cerebro humano. A diferencia del ML tradicional, no depende de reglas predefinidas, sino que aprende de una gran cantidad de datos, estableciendo comparaciones entre entradas y etiquetas, mediante múltiples capas de algoritmos. Estas capas, organizadas en una red neuronal profunda, incluyen una capa de entrada, varias capas ocultas y una de salida, que son encargadas de interpretar la información desde distintos niveles [[74].

Entre los beneficios de DL se destaca su alta precisión en el reconocimiento de patrones y su capacidad de aprender directamente de grandes volúmenes de datos. Sus aplicaciones en el campo de la salud abarcan desde la detección de enfermedades, diagnóstico por imágenes médicas, reconocimiento de voz en sistemas clínicos,

Tabla VI Estructura funcional recomendada para un Sistema Inteligente basado en AIoT

Etapas	Estructura funcional recomendada para un Sistema Inteligente basado en AIoT			
	<i>Tecnologías Involucradas</i>	<i>Descripción</i>	<i>Aplicación en la gestión energética</i>	<i>Referencia</i>
Medición y recolección de datos	IoT, FC	Datos de salud recolectados desde sensores inalámbricos vía dispositivos IoT, agregados en gateways y procesados en servidores cercanos (fog) antes de enviarlos a la nube	Optimización del consumo en red al procesar datos cerca del usuario (fog computing), reduciendo la carga y transmisión a la nube central.	[119]
Conectividad y transmisión de datos	IoT, protocolos ligeros	Dispositivos portátiles conectados a servidores remotos mediante gateways, que actúan como intermediarios para transmitir datos hacia la nube para análisis y toma de decisiones.	Optimización en la transmisión mediante arquitectura distribuida para reducir latencia y mejorar eficiencia en el envío de datos biomédicos	[120]
Procesamiento y análisis inteligente	ML, DL	Preprocesamiento de datos y extracción de características para mejorar la precisión y confiabilidad de modelos predictivos en energía	Análisis y predicción energética mediante algoritmos de aprendizaje automático para optimizar consumo y operación	[121]
Automatización y control en tiempo real	IoT, AI, ML, DL, CC	Modelo supervisado que usa datos históricos de parámetros interiores y exteriores para predecir el confort térmico de los ocupantes	Control automático en tiempo real para ajustar condiciones interiores y optimizar el consumo energético manteniendo confort térmico	[122]
Interfaz de usuario y visualización	IoT, ML, CC	Aplicación web para visualizar y descargar datos ambientales e históricos, ajustar consignas y consultar el estado de controladores y comandos generados	Mejora de la gestión energética mediante visualización en tiempo real y ajuste manual o automático de parámetros HVAC	[123]
Aprendizaje y mejora continua	IoT, ML, CC, EC	Modelo MDP con retroalimentación humana en tiempo real para que el sistema HVAC aprenda y ajuste sus decisiones de control de manera adaptativa y continua	Optimización progresiva de eficiencia energética y confort, reduciendo la necesidad de intervención humana mediante aprendizaje constante	[124]
Integración con otros sistemas hospitalarios	IoT, EC, CC, 5G, 6G	Red 6G e IoT integran monitoreo en tiempo real, análisis en edge y almacenamiento en la nube para conectar equipos médicos y plataformas hospitalarias	Mejora de eficiencia operativa mediante integración de dispositivos y sistemas hospitalarios para reducir tiempos de respuesta y optimizar recursos energéticos.	[125]

descubrimiento de fármacos y análisis de registros médicos [67].

C. Internet de las cosas (IoT)

El IoT es un sistema de dispositivos interconectado que recolectan y transmiten datos automáticamente a través de redes inalámbricas. Se caracteriza por la conectividad de múltiples dispositivos con capacidades de comunicación para conectarse a Internet y enviar la información que recopilan a una plataforma. Su arquitectura está diseñada como una estructura jerárquica, donde cada capa posee funciones específicas y módulos funcionales propios, donde la información se transmite entre estas capas mediante señales de interconexión [75]. Gracias a IoT, los centros de salud pueden implementar sistema de monitoreo continuo y

eficiente. Las áreas hospitalarias, los equipos y las instalaciones de emergencia envían datos de forma continua a la entidad médica más próxima con el fin de agilizar la respuesta ante cualquier situación [76]. Esta tecnología se clasifica según el tipo de comunicación empleada, incluyendo sensores portátiles, redes de sensores corporales y sensores basados en visión. Entre sus ventajas se destacan la automatización en la recolección de datos, la mejora en la toma de decisiones y su versatilidad de aplicación en el monitoreo remoto de pacientes, la recolección de signos vitales, el seguimiento de enfermedades crónicas y la atención médica en zonas rurales. Estas capacidades hacen del IoT una tecnología esencial para una atención sanitaria continua, eficiente y accesible [67].

D. Modelos de computación

El Internet de las Cosas (IoT) permite la comunicación entre dispositivos desde diferentes direcciones, facilitando el intercambio de datos entre objetos y personas en cualquier momento. Por ello, se apoya en arquitecturas como Cloud, Fog y Edge Computing, que mejoran la eficiencia y escalabilidad del procesamiento y la conectividad en entornos IoT. La integración de estas arquitecturas está redefiniendo el panorama computacional, respondiendo estratégicamente a las crecientes demandas de procesamiento de datos en tiempo real, la baja latencia e infraestructura escalable dentro del ecosistema IoT[77].

Cloud computing (CC) permite el acceso a recursos informáticos, como el almacenamiento, el procesamiento y distintas aplicaciones, a través de Internet. Sus beneficios incluyen la escalabilidad, la reducción de costos, el acceso remoto y la capacidad para procesar grandes volúmenes de datos. En el sector salud, Cloud Computing es clave para almacenar historiales clínicos, ejecutar sistemas de monitoreo, aplicar modelos de inteligencia artificial y mejorar la gestión hospitalaria. Además, integrada con dispositivos IoT, permite analizar datos clínicos en tiempo real, generar alertas de emergencia y facilitar la atención médica remota. En cuanto a la tecnología de Fog computing (FC) es una extensión de CC que permite procesar datos en el borde de la red, mediante un entorno descentralizado. Está estrechamente vinculada al IoT y se clasifica como una capa intermedia entre los dispositivos físicos y CC. Entre sus beneficios destaca la reducción de latencia, menor tráfico de datos hacia la nube y una respuesta más rápida en entornos críticos. En el ámbito de la salud, FC permite procesamiento inmediato de datos clínicos sensibles [67]

Por su parte Edge computing (EC) se refiere a modelos computacionales que permiten ubicar los recursos de cómputo y las capacidades de almacenamiento de información cerca de la aplicación del usuario final, donde pueden ser utilizados directamente. Esta tecnología se puede observar en aplicaciones de consumo energético, esto puede realizarse en plataformas de sensores inteligentes o dispositivos de enchufes inteligentes [37]. EC es una plataforma que integra capacidades de red, procesamiento, almacenamiento y aplicaciones en el extremo de la red, físicamente cerca de la fuente de datos. Esta tecnología presenta ventajas destacables, algunos investigadores han señalado su subutilización en la gestión de servicios y han propuesto mejoras en CC relacionadas con la gestión de servicios, la abstracción de datos y la seguridad del usuario [36].

En conjunto, estas tecnologías descritas conforman la base del sistema AIoT aplicado al entorno hospitalario. Su integración permite una gestión más inteligente,

automatizada y eficiente del consumo energético. Al combinar la capacidad analítica de la Inteligencia Artificial, el Machine Learning, la conectividad del Internet de las Cosas y los distintos modelos de computación, Cloud, Fog y Edge, se establecen las bases para la toma de decisiones autónoma y en tiempo real. Esto no solo mejora la atención médica y la operatividad hospitalaria, sino que también promueve la eficiencia, sostenibilidad y seguridad de los sistemas de salud modernos.

VI. INFRAESTRUCTURA TECNOLÓGICA Y NORMATIVAS RELEVANTES DE UN SISTEMA INTELIGENTE

El funcionamiento efectivo de los sistemas inteligentes requiere una infraestructura tecnológica adecuada que permita recolectar, transferir y procesar datos del entorno. En este sentido, es fundamental reconocer los componentes claves de dicha infraestructura, como lo sensores, las redes inalámbricas y los protocolos de comunicación, los cuales permiten una interacción entre dispositivos que sea segura, eficiente y que se de en tiempo real.

A. Sensores, redes inalámbricas y protocolos estándares de un sistema inteligente

Una parte esencial del sistema son los sensores o dispositivos de medición, los cuales brindan datos significativos sobre variables como la temperatura, humedad y niveles de luminancia. Dentro del ecosistema IoT se utilizan dos tipos de dispositivos, los sensores personalizados y los comerciales. En el caso de los personalizados, es común utilizar microcontroladores como el Arduino o el Raspberry Pi, debido a que estos se pueden adaptar a distintas necesidades. No obstante, para aplicaciones a gran escala, resulta más factible utilizar sensores comerciales, ya que estos cuentan con protocolos de comunicación estandarizados por defecto. Entre los sensores más comunes en sistemas inteligentes de gestión energética se encuentran los medidores de consumo eléctrico, que, en su versión personalizada, suelen implementarse con placas como NodeMCU o Arduino UNO. Además, se utilizan sensores de temperatura y humedad, así como sensores de luz y movimiento, que resultan especialmente útiles en hospitales, donde a menudo se mantienen encendidas luces en áreas sin uso, generando un consumo innecesario. En este contexto, los sensores comerciales ofrecen ventajas como la detección ambiental integrada y la incorporación de múltiples sensores en un solo

dispositivo, lo que permite ahorrar tiempo y esfuerzo al evitar la creación de soluciones personalizadas[113].

Mientras los sensores recopilan los datos del entorno las redes inalámbricas se encargan de transmitir dicha información. IoT se basa en este tipo de redes, que permiten la comunicación entre dispositivos inteligentes conectados. Entre ellas se incluyen RFID, WSN, Bluetooth, WLAN, WMAN y redes celulares como LTE, 2G, 3G, 4G, 5G y 6G. La tecnología RFID fue una de las primeras, permitiendo la comunicación mediante etiquetas (tags) con alcances de entre 100 metros y 1 km, aunque con limitaciones para conectarse a Internet. ZigBee, por su parte, es un protocolo inalámbrico de bajo consumo, ideal para redes en malla y automatización. Bluetooth, de la familia IEEE 802.15.1, ofrece comunicación sin línea de visión, aunque requiere un nodo intermediario para conectarse a Internet. Su versión Bluetooth 4.0 LE mejora significativamente la velocidad y la latencia. 6LoWPAN adapta el protocolo IPv6 para redes LAN inalámbricas de bajo consumo utilizando estándares IP compatibles con nodos sensores. Z-Wave es otro protocolo inalámbrico de bajo consumo, diseñado para automatización con arquitectura en malla. Finalmente, Wi-Fi, bajo el estándar IEEE 802.11x (a, b, g, n, e, f e i), es la tecnología más usada para conectar dispositivos a Internet, gracias a su capacidad de alta velocidad y amplia adopción [114].

En los sistemas inteligentes, un protocolo se define como un conjunto de reglas y normas que regulan la comunicación y el intercambio de datos entre los distintos componentes. Su función es garantizar que la información se transmita de forma correcta, ordenada y eficiente, asegurando una operación coordinada y confiable del sistema [40]. Dentro de este ámbito, los protocolos de enrutamiento juegan un papel crucial al determinar cómo los enrutadores de red comparten datos y seleccionan las rutas óptimas para la comunicación entre nodos. En redes inalámbricas, estos protocolos son más complejos que en redes cableadas, debido a factores como la topología cambiante, la necesidad de conservar energía y la calidad variable del canal. Como resultado, la transferencia eficiente de datos entre nodos representa un desafío multifacético en el diseño de protocolos inalámbricas [41].

B. Calidad de los servicios (QoS), seguridad y privacidad de los sistemas inteligentes

A medida que los sistemas inteligentes se integran en entornos críticos, como la atención médica o la gestión energética, se vuelve indispensable garantizar servicios confiables y seguros. Los requisitos de calidad del servicio

(QoS) aseguran que el sistema cumpla con parámetros esenciales para su funcionamiento, mientras que la seguridad y la privacidad se vuelven aún más relevantes debido al volumen y la sensibilidad de los datos procesados. En hospitales, existen múltiples áreas críticas como los quirófanos, donde el sistema puede proporcionar información útil sobre los pacientes y el personal médico. Sin embargo, la mayoría de las estrategias actuales se centran principalmente en sitios remotos, como hogares de cuidado, y en WBANs (Wireless Body Area Networks) enfocada únicamente en el monitoreo de la salud del paciente. En estos casos, el enfoque se limita al nivel de hardware de los sensores, priorizando la QoS en la transmisión de datos, sin profundizar en requisitos en tiempo real. Las soluciones actuales solo buscan reducir el retardo de paquetes o crear arquitecturas que lo soporten. Algunos estudios sobre WBAN han abordado QoS mediante protocolos de enrutamiento y selección de canal, mejorando la transmisión, no obstante, no consideran escenarios con múltiples WBAN activas ni niveles jerárquicos superiores. Ante estos retos, tecnologías como de Fog Computing surge como solución para reducir tiempos de respuesta procesando datos cerca de los sensores. Sin embargo, aún se requiere la transmisión desde los sensores hasta los nodos de FC, y esta puede afectar la QoS según infraestructura, volumen de datos y calidad del canal [117].

Otro aspecto crítico es la seguridad y privacidad de en el uso de tecnologías basadas en Inteligencia Artificial (AI), particularmente frente a ataques cibernéticos. Entre los más comunes se encuentran los adversarial attacks, que manipulan los datos de entrada que inducen errores en las tecnologías de ML y DL, afectando la integridad del sistema de aprendizaje. Para enfrentar estas amenazas, se han desarrollado diversas estrategias de defensa como data sanitization, que consiste en eliminar datos contaminados antes de entrenar el modelo. Entre sus técnicas se destaca Reject On Negative Impact (RONI). Sin embargo, ha surgido nuevos data poisoning attacks capaces de evadir estas defensas, lo que evidencia la necesidad de mayor investigación. Además de la data sanitization, existen métodos adicionales como bagging, ensemble methods y adversarial training. No obstante, estas defensas no son completamente efectivas, ya que muchos ataques modernos logran superarlas, lo que revela que los mecanismos actuales ofrecen solo una protección parcial. Tecnologías emergentes como differential privacy y homomorphic encryption mejoran significativamente la privacidad, pero aún requieren más investigación para lograr una protección robusta y confiable en entornos hostiles. Por lo tanto, es fundamental priorizar la seguridad y privacidad en la implementación de sistemas inteligentes, especialmente en áreas hospitalarias donde la protección de datos es sensible y la integridad de los procesos pueden impactar directamente en la salud y bienestar de los pacientes[118].

Finalmente, una vez comprendido el concepto de AIoT y presentadas algunas de las tecnologías claves que lo comprenden en la **Tabla III** se presenta una propuesta de una estructura funcional basada en AIoT, cabe destacar que estas etapas no son provenientes de una fuente o normativa específica, sino que sido diseñadas en este trabajo como una recomendación estructurada, con base en el análisis técnico de los seis factores que determinan el consumo energético total de los edificios. Entre los hallazgos, destacan arquitecturas de Fog Computing que procesan datos cerca del usuario, reduciendo el tráfico hacia la nube y logrando hasta un 52 % de ahorro energético[119], propuestas como LightIoT[120], que optimizan la transmisión segura de datos en dispositivos biomédicos con bajo consumo computacional y el uso de algoritmos inteligentes como redes neuronales, SVM, híbridos, mejoran la predicción del consumo energético[121] También se identificaron sistemas capaces de ajustar automáticamente parámetros térmicos mediante aprendizaje automático[122] , y plataformas de visualización que permiten reducir hasta un 20 % del consumo energético en áreas específicas sin afectar el entorno clínico[123]

Además, se introducen enfoques de mejora continua como los sistemas Human-in-the-Loop (HITL), que adaptan la gestión energética según ocupación y condiciones del mercado eléctrico[124] e iniciativas de integración tecnológica avanzada (IA explicable, 6G, robótica) para lograr interoperabilidad y eficiencia hospitalaria[125]. En conjunto, los siete artículos analizados evidencian que la implementación de un sistema inteligente basado en tecnologías que conforman el AIoT en hospitales permite optimizar el consumo energético sin comprometer la calidad del servicio. Aunque cada estudio aborda distintas etapas de manera individual y en contextos específicos, sus resultados demuestran que, al integrarse, pueden conformar un sistema inteligente robusto, capaz de responder de forma eficiente y coordinada a las demandas energéticas del entorno hospitalario. Esto resalta la necesidad de apostar por soluciones tecnológicas que se complementen entre sí, y que, al integrarse de manera gradual y coordinada, permitan construir una gestión energética más eficiente, flexible y orientada a las verdaderas necesidades del entorno hospitalario. Además, en la **Tabla IV** se establece la

Tabla VII Relación entre las Etapas de AIoT y los Factores

Relación entre las Etapas del sistema AIoT y los factores del consumo energético total							
<i>Etapas</i>	<i>Factores</i>						<i>Ref.</i>
	Clima	Envolvente del Edificio	Equipamiento	Operación y el mantenimiento	Acciones cotidianas de los ocupantes	Condiciones ambientales interiores	
Medición y recolección de datos	✗	✗	✓	✓	✗	✗	[131]
Conectividad y transmisión de datos	✗	✗	✓	✓	✗	✗	[128]
Procesamiento y análisis inteligente	✓	✓	✓	✓	✗	✓	[129]
Automatización y control en tiempo real	✓	✗	✓	✓	✓	✓	[127]
Interfaz de usuario y visualización	✗	✗	✓	✓	✓	✗	[126]
Aprendizaje y mejora continua	✓	✓	✓	✓	✗	✗	[130]
Integración con otros sistemas hospitalarios	✗	✗	✓	✓	✓	✓	[45]

correlación entre cada etapa de dicha estructura y los factores analizados, lo que permite visualizar de manera más clara cuáles etapas cubren todos los factores y cuáles presentan limitaciones en su alcance. En los que se observó que los factores más abordados fueron equipamiento del edificio y operación y mantenimiento, presentes en todos los estudios, mediante sensores, automatización y gestión en tiempo real. Factores como clima exterior, comportamiento de los ocupantes y condiciones interiores aparecen con menor frecuencia, pero influyen en estrategias predictivas y adaptativas para el confort y eficiencia. Por último, el envolvente del edificio fue el menos considerado, aunque se abordó indirectamente mediante modelos que relacionan condiciones externas e internas [45], [126], [127], [128], [129], [130], [131]. En conjunto, estos hallazgos muestran que el AIoT permite integrar tecnologías complementarias que, aplicadas a los factores determinantes del consumo energético, pueden mejorar significativamente la gestión energética hospitalaria.

VII. SOLUCIONES EXISTENTES EN SALUD INTELIGENTE

En el ambiente de la salud inteligente, nuevas tecnologías están ayudando en gran manera a redefinir la gestión clínica y operativa. Estas tecnologías utilizan lo que son sensores portátiles y plataformas conectadas que hacen posible el monitoreo continuo de pacientes, lo que mejora significativamente temprana de anomalías y reduce la carga sobre el personal de salud [132].

El uso de tecnologías como IOT mejora la calidad asistencial, el flujo de pacientes, reduce errores administrativos y contribuye a la asignación de recursos en el ámbito de consumo energético. Esto es de gran ayuda, ya que permite gestionar la energía de acuerdo con la necesidad y se evitan así consumos innecesarios [66],[67]. Tecnologías como redes inalámbricas, protocolos de comunicación IoT (ZigBee, WiFi, RFID), y computación en la nube permiten una conectividad segura y flexible para estos fines [134]. También, con el uso de inteligencia artificial y aprendizaje profundo, se han desarrollado sistemas capaces de anticipar necesidades médicas, prevenir complicaciones y asistir en decisiones clínicas [68][69].

Para la gestión energética, el uso de IA ha demostrado ser clave para optimizar el consumo de energía mediante el uso de monitoreo continuo, permitiendo lograr sostenibilidad [136]. En hospitales italianos, se ha evidenciado que el uso de

gestores energéticos con implementación de IA para monitorear el consumo y reducir costos operacionales ha sido de gran eficacia [136]. En el caso del norte de Italia, donde se integraron tecnologías de IoT con la integración de algoritmos de aprendizaje automático en la nube, y de esta forma se logró modernizar sistemas de HVAC, logrando así ahorro de energía con ambiente adecuado según la necesidad de los pacientes [137]. También se logró demostrar que, con el uso de la herramienta HOMER Pro, más paneles solares fotovoltaicos (PV) junto con sistemas de batería, esta combinación no solo ayudó a reducir de forma considerable las emisiones contaminantes, sino que también mejora el uso eficiente de la energía dentro de los centros médicos [72]. Como queda evidenciado, existen un conjunto de tecnologías que pueden utilizarse. Aprovechar las ventajas y oportunidades innovadoras que ofrecen para una gestión energética eficiente, traería grandes avances hacia estructuras hospitalarias más sostenibles. Sin embargo, debemos tener en cuenta que la implementación de estas tecnologías trae consigo importantes desafíos y limitaciones que se analizan a continuación.

VIII. METODOLOGÍA

Este estudio se desarrolló mediante una revisión rigurosa y sistemática de literatura científica, esto con el propósito de analizar y sintetizar información relevante, sobre sistemas inteligentes con un enfoque en la gestión energética eficiente en los hospitales. Para este estudio, se realizó un espacial énfasis en el uso del internet de las cosas y tecnologías complementarias como lo son la inteligencia artificial, el machine learning y la computación en la nube. Las cuales permiten la automatización de la toma de decisiones, la predicción de la demanda energética y la optimización de recursos en tiempo real.

- A. **Selección de base de datos:** Se consultaron bases científicas de alto impacto como PubMed y Google Scholar, buscando abarcar y dar con investigaciones que integren aspectos de energía, salud e innovación tecnológica.
- B. **Estrategia de búsqueda:** Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés para un mayor alcance de información como: “smart energy management systems”, “hospital energy efficiency”, “IoT in healthcare”, “machine learning energy prediction”, “AI-based energy control systems”, “intelligent hospital infrastructure”, entre otras. Los términos se articularon mediante operadores booleanos (AND, OR) para asegurar la precisión de los resultados.
- C. **Criterios de inclusión y exclusión:** Se incluyeron artículos publicados entre 2013 y 2025, priorizando estudios recientes. Con excepción de algunos

documentos normativos, estándares técnicos y reportes oficiales de consumo energético, como guías institucionales, marcos regulatorios o leyes, que, aunque datan de años anteriores, los mismos fueron considerados por su valor referencial y vigencia en el ámbito hospitalario y energético. Toda la información se enfocó en el IoT, IA y ML aplicados a la optimización energética. Se excluyeron documentos de baja rigurosidad o que no abordaran concretamente el enfoque energético hospitalario.

- D. *Proceso de evaluación:*** Para esto, se realizó una evaluación de títulos y resúmenes para que de esta manera obtener la información de acuerdo con nuestro objetivo de búsqueda y descartar estudios no pertinentes, como resultado obtuvimos una primera búsqueda de más 2,960.000 artículos y posteriormente, realizamos una revisión profunda con aquellos documentos de interés para la investigación y así identificar la aplicabilidad al tema. Se priorizaron aquellos estudios, que documentaran resultados prácticos relacionados con la eficiencia energética mediante el uso de tecnologías inteligentes.
- E. *Extracción y síntesis de datos:*** La información fue extraída de las secciones de metodología, resultados, conclusiones y marco teórico. Se realizó una síntesis de información, con el fin de proporcionar un análisis integral sobre el uso de tecnologías inteligentes en la gestión energética hospitalaria, permitiendo identificar tendencias, desafíos actuales, impactos y oportunidades de mejora en la eficiencia operativa y la sostenibilidad de estas infraestructuras y como resultado de esto se seleccionaron únicamente 149 artículos.

IX. DISCUSIÓN

En el presente estudio se realizó una recaudación rigurosa de información, con el fin de poder demostrar que el uso de AIoT con la contemplación de factores energéticos clave, es una solución eficaz para obtener resultados alentadores en cuanto a una gestión energética en hospitales óptima y eficiente. La incorporación de los seis factores permite la comprensión, el análisis y la predicción precisa del consumo total de energía en edificaciones, facilitando así una evaluación más efectiva de estrategias, normativas y tecnologías orientadas al ahorro energético [139]. La literatura revisada destaca que uno de los principales desafíos para mejorar la eficiencia energética en edificios inteligentes, es implementar modelos de confort térmico más precisos y

adaptativos. Dentro de los estudios consultados señalan que las metodologías aplicadas, tanto las tradicionales como las basadas en el estándar ASHRAE 55. Presentan limitaciones debido a la dificultad de estudiar el tiempo real de los parámetros necesarios. Se ha documentado que esto puede generar desviaciones relevantes, en el acercamiento a características específicas como en el caso de adultos mayores o personas con condiciones de salud particulares [140]

Cuyos hábitos diarios y necesidades de confort pueden variar significativamente. Para estas limitaciones, diversas investigaciones recaudadas investigaciones proponen el uso de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para desarrollar modelos dinámicos y personalizados de confort térmico, Cuyos hábitos diarios y necesidades de confort pueden variar significativamente. Para estas limitaciones, diversas investigaciones recaudadas investigaciones proponen el uso de técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para desarrollar modelos dinámicos y personalizados de confort térmico capaces de integrar datos en tiempo real provenientes de sensores IoT y de las características individuales de los usuarios [141], [142]. Asimismo, la literatura revisada enfatiza el potencial de utilizar AIoT para monitorear la demanda energética en entorno como microrredes comunitarias y sistemas distritales [143], lo cual podría mejorar la resiliencia, facilitar la integración de energías renovables y habilitar estrategias de demanda-respuesta que se ajusten al uso diario real de los edificios por sus ocupantes. Sin embargo, dentro de los trabajos analizados se relataron dificultades en cuanto a desafíos en términos de seguridad y privacidad. La literatura revisada informa sobre vulnerabilidades frecuentes derivadas de fallos de software [144]. La literatura revisada también aporta evidencia sobre la aplicación de modelos de predicción y optimización, para la mejora de la eficiencia energética en sistemas HVAC de edificios, destacando la influencia del factor clima en estos procesos. Un estudio reporta que, durante la implementación de soluciones basadas en datos históricos, se detectó una caída en el desempeño predictivo del modelo al enfrentar nuevos patrones operativos vinculados con variaciones climáticas o cambios en las condiciones externas [145]. Esta limitación destaca la necesidad de implementar estrategias de a fluctuaciones en las condiciones climáticas mediante la recolección y el uso de datos actualizados. Según el trabajo revisado, es esencial aplicar procesos de reentrenamiento tras la recolección de datos nuevos esto es esencial según los hallazgos para recuperar niveles aceptables de aceptación. considerando la capacidad del modelo para anticipar la demanda de enfriamiento o calefacción en función de variables meteorológicas como temperatura y humedad [77].

Dentro de los hallazgos encontrados en la literatura abordada, se evidencia que al utilizar PMV (Predictive Mean Vote) para optimizar el consumo energético, También se garantiza lo que es el confort térmico ya que gestiona los sistemas HVAC, siendo un aspecto central para el factor de condiciones ambientales interiores. Se documentó que mediante la predicción PMV, se aseguran condiciones interiores como temperatura, humedad, y velocidad del aire para que se mantengan en rangos confortables y estables. Sin embargo, los estudios señalan que estas mismas condiciones ambientales interiores, resultan complejas debido a la influencia de estas múltiples condiciones. Para esto resaltan el uso de redes neuronales artificiales (ANN) como herramienta de predicción, mostrando resultados prometedores en términos de métricas como MSE, RMSE, MAE y el coeficiente de determinación R2 [81]. De acuerdo con el estudio abordado, también se encontraron aportes relevantes sobre la aplicación de metodología para analizar las complejas interdependencias entre funciones en entornos hospitalarios inteligentes, considerando de forma integral elementos como la envolvente del edificio. En particular, se ha documentado el uso de metodologías como ISM (Interpretive Structural Modeling) y el análisis MICMAC para identificar relaciones causales, prioridades y jerarquías entre aplicaciones de BIM-FM (Building Information Modeling–Facility Management) [146]. En la literatura consultada se destaca la importancia de integrar monitoreo ambiental, ya que así se pueden optimizar decisiones de diseño, mantenimiento y operación para mejorar la eficiencia energética, fortalecer las respuestas ante emergencias y reducir costos de mantenimiento [147]. Otro hallazgo, importante encontrado en la literatura revisada es sobre las experiencias con sistemas avanzados, de gestión y localización diseñados para optimizar las actividades de mantenimiento hospitalario, centrándose de manera particular en el factor equipamiento y su adecuada gestión. Entre los problemas identificados previamente se encuentran la dificultad para localizar dispositivos médicos debido a préstamos interdepartamentales no reportados. Por otro lado, permite notificar proactivamente al personal de mantenimiento, proporcionar datos de localización en tiempo real y mejorar la comunicación interdepartamental para garantizar la correcta gestión del equipamiento hospitalario [79].

La literatura revisada resalta que un aspecto crítico dentro del factor de operación y mantenimiento es la adopción de estrategias de mantenimiento predictivo y sistemas de detección de fallas para componentes HVAC. se señala que esta funcionalidad aún no es un estándar en las operaciones debido a la limitada flexibilidad de los métodos existentes y sus altos costos de implementación. Los estudios revisados subrayan la dificultad para comparar enfoques por la

diversidad de conjuntos de datos, configuraciones de prueba y métricas utilizadas. Además, se reconoce como limitación que la elección de algoritmos de predicción suele depender de la experiencia previa del desarrollador. Frente a estas limitaciones, la literatura propone oportunidades significativas para mejorar la gestión operativa. Se destaca el diseño de sistemas modulares de detección de fallas que pueden adaptarse a distintos tipos de AHUs, y la implementación de enfoques de mantenimiento predictivo basados en técnicas de inteligencia artificial [80].

Según la literatura revisada, es importante recalcar sobre la conectividad y transmisión de datos es crítica para integrar información sobre el clima, la envolvente del edificio, el equipamiento y las prácticas de operación y mantenimiento. Dentro de las limitantes los autores destacan la falta de interoperabilidad entre sistemas heterogéneos, otra limitante mencionada por los autores es las condiciones de infraestructuras, las mismas no cuentan con la robustez necesaria para la incorporación de la red. Sin embargo, se menciona la oportunidad de utilizar arquitecturas IoT, estandarizadas que faciliten la recopilación y el envío eficiente de datos ambientales y operativos, habilitando una gestión energética más coordinada [131]. En base a hallazgos revisados en la literatura, la etapa de procesamiento y análisis inteligente permite integrar datos de clima, envolvente, equipamiento, operación y condiciones ambientales interiores para generar decisiones informadas. Dentro de las limitantes descritas por los autores se encontró que la complejidad de los modelos y la necesidad de datos históricos de calidad. Como oportunidad, se identifican los avances en IA y aprendizaje automático, que pueden mejorar la predicción de la demanda energética y la personalización de estrategias de ahorro sin comprometer el confort [128]

En la investigación reportada, la automatización y control en tiempo real involucra factores como clima, envolvente, equipamiento y operación y mantenimiento para responder dinámicamente a las condiciones cambiantes. Las limitaciones reportadas por los autores destacan, los altos costos iniciales y la complejidad de integrar sistemas antiguos. Sin embargo, la oportunidad radica en reducir consumos innecesarios mediante ajustes automáticos y mejorar la eficiencia operativa de los edificios inteligentes [129]. Según lo documentado en la literatura, la automatización y control en tiempo real involucra factores como clima, envolvente, equipamiento y operación y mantenimiento para responder dinámicamente a las condiciones cambiantes. Se destacaron limitaciones en cuanto a herramientas intuitivas que traduzcan datos complejos en información útil para el personal y los usuarios. Sin embargo, se destacaron de desarrollar paneles de control

interactivos que permitan tomar decisiones informadas y fomentar prácticas más sostenibles entre los ocupantes [127].

En el análisis previamente consultado, los autores destacaron que el aprendizaje y mejora continua integra datos sobre clima, envolvente, equipamiento y operación y mantenimiento para optimizar estrategias energéticas a lo largo del tiempo. Como limitación identificaron la necesidad de modelos capaces de adaptarse a cambios operativos y climáticos. Como oportunidad evidenciaron el desarrollar sistemas que aprendan de datos históricos y operativos para ajustar automáticamente parámetros y mejorar la eficiencia de forma progresiva [126]. Para evaluar si la gestión energética de un hospital considera todos los aspectos energéticos clave, es esencial analizar como el clima, que determina la demanda de calefacción o refrigeración; la envolvente del edificio, que influye en las ganancias y pérdidas térmicas; los equipos y sistemas instalados, que representan los principales consumos y requieren estrategias de eficiencia; las condiciones ambientales interiores, que deben mantenerse en niveles adecuados de confort y seguridad; la operación y mantenimiento, fundamentales para garantizar el rendimiento óptimo de los sistemas; y el comportamiento de los ocupantes, que puede afectar significativamente el uso de la energía [66]. Para abordar el desarrollo de un sistema inteligente de gestión energética hospitalaria optima y eficaz, la tecnología más adecuada tras el análisis de la revisión sistemática sería AioT, que es la complementación de Iot con Inteligencia Artificial y Machine Learning para el análisis predictivo y la optimización automatizada, junto con soluciones de computación en la nube o en el borde Edge/Fog Computing para procesar datos en tiempo real [148]

X. CONCLUSIÓN

La identificación de los seis factores que determinan el consumo energético en los edificios constituye una base valiosa para comprender y optimizar el uso de la energía en distintos contextos. Al llevar este enfoque a un entorno hospitalario, se reconoce la utilidad de estos factores como herramienta de análisis para lograr una gestión más eficiente. Habitualmente, en el ámbito de la salud la gestión energética se centra en los factores físicos, (clima, envolvente del edificio y equipamiento), ya que son elementos que se pueden medir y controlar. Sin embargo, a través del desarrollo de este trabajo se resalta la importancia de considerar también los factores humanos, (operación y mantenimiento, acciones cotidianas del ocupante y condiciones ambientales interiores) ya que estas también tienen un aporte significativo en el consumo energético total. En este contexto, la implementación de sistemas inteligentes basados en tecnologías AioT se perfila como una solución efectiva, ya que permite una gestión integral de la energía que considera

tanto variables físicas como humanas. Su principal fortaleza radica en la integración de sensores IoT, capacidades de decisión autónoma mediante Inteligencia Artificial, Machine Learning y Deep Learning, y arquitecturas de procesamiento Cloud, Edge y Fog Computing, lo que posibilita un monitoreo y respuesta en tiempo real. Como aporte clave, este estudio plantea que la aplicación de tecnologías AioT puede facilitar el desarrollo de sistemas energéticos hospitalarios adaptativos, orientados a mejorar la eficiencia operativa, la sostenibilidad y el confort. Sin embargo, también se reconocen desafíos importantes, como los elevados costos iniciales, la necesidad de infraestructura tecnológica adecuada, la formación del personal y los riesgos asociados a la ciberseguridad.

A partir de los resultados obtenidos en esta revisión sistemática, se identifican algunos aspectos clave que convendría considerar en futuras investigaciones e iniciativas orientadas a la implementación efectiva de sistemas inteligentes de gestión energética basados en tecnologías AioT en hospitales. Primero, al diseñar planes para gestionar la energía en los hospitales, se tengan en cuenta desde el inicio los factores que determinan el consumo energético, el considerar estos aspectos desde la planificación y durante el uso diario ayuda a mejorar la eficiencia energética, reducir costos y crear hospitales más sostenibles y resistentes. En segundo lugar, se recomienda el desarrollo de políticas públicas que impulsen la inversión en infraestructura tecnológica moderna e inteligente. También es esencial ofrecer programas de formación para el personal técnico y clínico, con el fin de asegurar un manejo adecuado y seguro de estos sistemas. Por último, se resalta la necesidad de fortalecer las medidas de seguridad y protección de datos, debido a los riesgos asociados con el uso de información sensible en plataformas conectadas. Esta investigación no incluye un alcance experimental, por lo que en el futuro sería recomendable realizar estudios mediante pruebas piloto o simulaciones que permitan evaluar el desempeño y la viabilidad de los sistemas inteligentes para la gestión energética basados en tecnologías AioT en entornos hospitalarios. De esta manera, se podrían ajustar y optimizar estas tecnologías para satisfacer mejor las necesidades específicas del sector salud.

XI. REFERENCIAS

L. Farhan, S. T. Shukur, A. E. Alissa, M. Alrweg, U. Raza, and R. Kharel, "A survey on the challenges and opportunities of the Internet of Things (IoT)," in *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*,

[1]

- IEEE, Dec. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICSensT.2017.8304465.
- [2] W. Yaïci, K. Krishnamurthy, E. Entchev, and M. Longo, [11] “Recent Advances in Internet of Things (IoT) Infrastructures for Building Energy Systems: A Review,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, p. 2152, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21062152.
- [3] M. Moutaib, T. Ahajjam, M. Fattah, Y. Farhaoui, B. [12] Aghoutane, and M. El Bekkali, “Application of Internet of Things in the Health Sector: Toward Minimizing Energy Consumption,” *Big Data Mining and Analytics*, vol. 5, no. 4, pp. 302–308, Dec. 2022, doi: 10.26599/BDMA.2021.9020031. [13]
- [4] B. Ç. Uslu, E. Okay, and E. Dursun, “Analysis of factors affecting IoT-based smart hospital design,” *Journal of Cloud Computing*, vol. 9, no. 1, p. 67, Dec. 2020, doi: 10.1186/s13677-020-00215-5. [14]
- [5] U. Iqbal, M. A. Dar, and S. Nisar Bukhari, “Intelligent Hospitals based on IOT,” in *2018 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, IEEE, Feb. 2018, pp. 1–3. doi: 10.1109/AEEICB.2018.8480947. [15]
- [6] A. Ahmed *et al.*, “Predicting Energy Consumption in Hospitals Using Machine Learning: A Data-Driven Approach to Energy Efficiency in the USA,” *Journal of Computer Science and Technology Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 199–219, Feb. 2025, doi: 10.32996/jcsts.2025.7.1.15.
- [7] J. Cedeño Cedeño, L. Chancay García, and Á. Macías-Mero, [16] “Análisis bibliográfico de las tecnologías Iot en la Telemedicina para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares,” *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, vol. 6, no. 5, pp. 256–277, Aug. 2024, doi: 10.59169/pentaciencias.v6i5.1218. [17]
- [8] Z. Alansari, N. B. Anuar, A. Kamsin, S. Soomro, and M. R. Belgaum, “The Internet of Things adoption in healthcare applications,” in *2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS)*, IEEE, Aug. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICETSS.2017.8324138. [18]
- [9] D. K. Serghides, S. Thravalou, S. Dimitriou, and I. Kyprianou, “Energy performance of healthcare facilities in 3 climatic zones in Cyprus,” *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 7, p. 16, 2022, doi: 10.1051/rees/2022004. [19]
- [10] Zhihong Yang, Yingzhao Yue, Yu Yang, Yufeng Peng, Xiaobo Wang, and Wenji Liu, “Study and application on the architecture and key technologies for IOT,” in *2011 International Conference on Multimedia Technology*, IEEE, Jul. 2011, pp. 747–751. doi: 10.1109/ICMT.2011.6002149.
- A. Alkhayyat, A. A. Thabit, F. A. Al-Mayali, and Q. H. Abbasi, “WBSN in IoT Health-Based Application: Toward Delay and Energy Consumption Minimization,” *J Sens*, vol. 2019, pp. 1–14, May 2019, doi: 10.1155/2019/2508452.
- M. M. Fakhabi, S. M. Hamidian, and M. Aliehyaei, “Exploring the role of the Internet of Things in green buildings,” *Energy Sci Eng*, vol. 12, no. 9, pp. 3779–3822, Sep. 2024, doi: 10.1002/ese3.1840.
- M. Munsamy and A. Telukdarie, “Healthcare Energy Management: A Digital Approach,” in *2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, IEEE, Dec. 2020, pp. 1048–1052. doi: 10.1109/IEEM45057.2020.9309741.
- J. Cedeño Cedeño, L. Chancay García, and Á. Macías-Mero, “Análisis bibliográfico de las tecnologías Iot en la Telemedicina para el tratamiento de enfermedades cardiovasculares,” *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, vol. 6, no. 5, pp. 256–277, Aug. 2024, doi: 10.59169/pentaciencias.v6i5.1218.
- Z. Alansari, N. B. Anuar, A. Kamsin, S. Soomro, and M. R. Belgaum, “The Internet of Things adoption in healthcare applications,” in *2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS)*, IEEE, Aug. 2017, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICETSS.2017.8324138.
- J. Iqbal *et al.*, “A generic internet of things architecture for controlling electrical energy consumption in smart homes,” *Sustain Cities Soc*, vol. 43, pp. 443–450, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.09.020.
- M. Psillaki *et al.*, “Hospitals’ Energy Efficiency in the Perspective of Saving Resources and Providing Quality Services through Technological Options: A Systematic Literature Review,” Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16020755.
- M. Ourahou, W. Ayrir, B. EL Hassouni, and A. Haddi, “Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects,” *Math Comput Simul*, vol. 167, pp. 19–31, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.matcom.2018.11.009.
- A. A. Thabit, M. S. Mahmoud, A. Alkhayyat, and Q. H. Abbasi, “Energy harvesting Internet of Things health-based paradigm: Towards outage probability reduction through inter-wireless body area network cooperation,” *Int J Distrib Sens Netw*, vol. 15, no. 10, p. 155014771987987, Oct. 2019, doi: 10.1177/1550147719879870.

- [20] Y. Boutahri and A. Tilioua, "An artificial neural network-based system to estimate the thermal comfort of buildings with energy efficiency," *ITM Web of Conferences*, vol. 52, p. 02003, 2023, doi: 10.1051/itmconf/20235202003.
- [21] O. Babatunde, D. Akinyele, T. Akinbulire, and P. Oluseyi, "Evaluation of a grid-independent solar photovoltaic system for primary health centres (PHCs) in developing countries," *Renewable Energy Focus*, vol. 24, pp. 16–27, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ref.2017.10.005.
- [22] Y. Toughzaoui, R. Elkhatab, T. Kaoutari, H. Louahlia, H. Chaoui, and H. Gualous, "Advances in hospital energy systems: Genetic algorithm optimization of a hybrid solar and hydrogen fuel cell combined heat and power," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 86, pp. 1310–1325, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.09.001.
- [23] H. O. Garcés *et al.*, "Monitoring of Thermal Comfort and Air Quality for Sustainable Energy Management inside Hospitals Based on Online Analytical Processing and the Internet of Things," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/ijerph191912207.
- [24] A. Alahmer and S. Alsaqoor, "Energy efficient of Using Chilled Water System for Sustainable Health Care Facility Operating by Solar Photovoltaic Technology," in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 65–71. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.092.
- [25] U. Ismail, U. Wakawa, A. Umar, U. Mohammad, S. Ismail, and H. Publications, "Prioritization of Passive Measures for Energy Optimization in Primary Health Care Centers in Nigeria HP," *JARAR*, vol. 4, no. 2, [Online]. Available: www.hummingbirdjournals.com
- [26] A. A. Gatea, M. F. M. Batcha, and J. Taweekun, "Energy efficiency and thermal comfort in hospital buildings: A review," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 33–41, 2020, doi: 10.30880/ijie.2020.12.03.005.
- [27] S. P. Mohanty, U. Choppali, and E. Kougianos, "Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone," *IEEE Consumer Electronics Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 60–70, Jul. 2016, doi: 10.1109/MCE.2016.2556879.
- [28] S. Tian, W. Yang, J. M. Le Grange, P. Wang, W. Huang, and Z. Ye, "Smart healthcare: making medical care more intelligent," Sep. 01, 2019, *KeAi Communications Co.* doi: 10.1016/j.glohj.2019.07.001.
- [29] N. Christiansen, M. Kaltschmitt, and F. Dzukowski, "Electrical energy consumption and utilization time analysis of hospital departments and large scale medical equipment," *Energy Build.*, vol. 131, pp. 172–183, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.09.023.
- [30] H. O. Garcés *et al.*, "Monitoring of Thermal Comfort and Air Quality for Sustainable Energy Management inside Hospitals Based on Online Analytical Processing and the Internet of Things," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 19, p. 12207, Sep. 2022, doi: 10.3390/ijerph191912207.
- [31] J. H. Abawajy and M. M. Hassan, "Federated Internet of Things and Cloud Computing Pervasive Patient Health Monitoring System," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 48–53, Jan. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600374CM.
- [32] S. Saba Raoof and M. A. S. Durai, "A Comprehensive Review on Smart Health Care: Applications, Paradigms, and Challenges with Case Studies," 2022, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2022/4822235.
- [33] F. Casarosa, "Cybersecurity of Internet of Things in the health sector: Understanding the applicable legal framework," *Computer Law & Security Review*, vol. 53, p. 105982, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.clsr.2024.105982.
- [34] H. Abie and I. Balasingham, "Risk-Based Adaptive Security for Smart IoT in eHealth," *European Alliance for Innovation n.o.*, Feb. 2013. doi: 10.4108/icst.bodynets.2012.250235.
- [35] M. Pahuja and D. Kumar, "An Energy-Optimized Artificial Intelligence of Things (AIoT)-Based Biosensor Networking for Predicting COVID-19 Outbreaks in Healthcare Systems," *COVID*, vol. 4, no. 6, pp. 696–714, May 2024, doi: 10.3390/covid4060047.
- [36] V. M. U *et al.*, "AI-Powered IoT: A Survey on Integrating Artificial Intelligence With IoT for Enhanced Security, Efficiency, and Smart Applications," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 50296–50339, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3551750.
- [37] M. M. Ozcelik, I. Kok, and S. Ozdemir, "A Survey on Internet of Medical Things (IoMT): Enabling Technologies, Security and Explainability Issues, Challenges, and Future Directions," *Expert Syst*, vol. 42, no. 5, May 2025, doi: 10.1111/exsy.70010.
- [38] Ashokkumar. N, N. R. Yatam, Chandra. I, A. Christaline. J., R. Bhairavi, and Thiruvani. M, "Internet of Medical Things (IoMT): Opportunities and Security Challenges," in *2024 5th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, IEEE, Aug. 2024, pp. 370–376. doi: 10.1109/ICESC60852.2024.10689770.
- [39] A. I. Newaz, A. K. Sikder, M. A. Rahman, and A. S. Uluagac, "A Survey on Security and Privacy Issues in Modern

- Healthcare Systems,” *ACM Trans Comput Healthc*, vol. 2, [51]
no. 3, Jul. 2021, doi: 10.1145/3453176.
- [40] W. Sun, Z. Cai, Y. Li, F. Liu, S. Fang, and G. Wang,
“Security and Privacy in the Medical Internet of Things: A
Review,” *Security and Communication Networks*, vol. 2018,
pp. 1–9, 2018, doi: 10.1155/2018/5978636. [52]
- [41] W. Sun, Z. Cai, Y. Li, F. Liu, S. Fang, and G. Wang,
“Security and Privacy in the Medical Internet of Things: A
Review,” *Security and Communication Networks*, vol. 2018,
pp. 1–9, 2018, doi: 10.1155/2018/5978636.
- [42] M. Mahmood *et al.*, “Improving Security Architecture of
Internet of Medical Things: A Systematic Literature
Review,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 107725–107753, 2023,
doi: 10.1109/ACCESS.2023.3281655. [53]
- [43] M. Raza *et al.*, “Challenges and Limitations of Internet of
Things Enabled Healthcare in COVID-19,” *IEEE Internet of
Things Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 60–65, Sep. 2021, doi:
10.1109/IOTM.0001.2000176. [54]
- [44] A. A. Pise *et al.*, “Enabling Artificial Intelligence of Things
(AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security
Issues,” *Comput Intell Neurosci*, vol. 2022, pp. 1–14, Aug.
2022, doi: 10.1155/2022/8421434. [56]
- [45] A. Ahmad, “Enhancing Hospital Efficiency through IoT and
AI: A Smart Healthcare System,” *JOURNAL OF
COMPUTER SCIENCE APPLICATION AND
ENGINEERING*, vol. 2, no. 2, pp. 34–38, 2024, [Online]. [57]
Available: <https://journal.lenterailmu.com/index.php/josapen>
- [46] H. T. Ibrahim, W. J. Mazher, and O. N. Ucan, “AIoT in
Healthcare: A Systematic Mapping Study,” in *2022
International Conference on Artificial Intelligence of Things
(ICAIoT)*, IEEE, Dec. 2022, pp. 1–6. doi: [58]
10.1109/ICAIoT57170.2022.10121743.
- [47] T. Malche *et al.*, “Artificial Intelligence of Things- (AIoT-)
Based Patient Activity Tracking System for Remote Patient
Monitoring,” *J Healthc Eng*, vol. 2022, pp. 1–15, Mar. 2022,
doi: 10.1155/2022/8732213. [59]
- [48] A. A. Pise *et al.*, “Enabling Artificial Intelligence of Things
(AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security
Issues,” *Comput Intell Neurosci*, vol. 2022, pp. 1–14, Aug. [60]
2022, doi: 10.1155/2022/8421434.
- [49] “1691479684”.
- [50] A. M. Said, A. Yahyaoui, and T. Abdellatif, “Efficient
Anomaly Detection for Smart Hospital IoT Systems,” [61]
Sensors, vol. 21, no. 4, p. 1026, Feb. 2021, doi:
10.3390/s21041026.
- K. Borges de Oliveira, E. F. dos Santos, A. F. Neto, V. H. de
Mello Santos, and O. J. de Oliveira, “Guidelines for efficient
and sustainable energy management in hospital buildings,” *J
Clean Prod*, vol. 329, Dec. 2021, doi:
10.1016/j.jclepro.2021.129644.
- H. Nagao, A. Uemichi, Y. Yamasaki, and S. Kaneko,
“Proposal of a decision scheme for installing a cogeneration
system considering disaster risks,” *Appl Therm Eng*, vol. 114,
pp. 1414–1423, 2017, doi:
10.1016/j.applthermaleng.2016.09.061.
- G. K. Alexis and P. Liakos, “A case study of a cogeneration
system for a hospital in Greece. Economic and environmental
impacts,” *Appl Therm Eng*, vol. 54, no. 2, pp. 488–496, 2013,
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.02.019.
- A. Ahmed *et al.*, “Predicting Energy Consumption in
Hospitals Using Machine Learning: A Data-Driven Approach
to Energy Efficiency in the USA,” 2025, doi: 10.32996/jests.
- R. Ji and S. Qu, “Investigation and evaluation of energy
consumption performance for hospital buildings in China,”
Sustainability (Switzerland), vol. 11, no. 6, 2019, doi:
10.3390/su11061724.
- A. González González, J. García-Sanz-Calcedo, and D. R.
Salgado, “A quantitative analysis of final energy
consumption in hospitals in Spain,” *Sustain Cities Soc*, vol.
36, pp. 169–175, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2017.10.029.
- “Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet MED-IEE :
Indicateurs d’Efficacité Energétique pour la Méditerranée
Avril 2014 Rapport élaboré par le réseau MEDENER Projet
MED-IEE : Indicateurs d’Efficacité Energétique pour la
Méditerranée,” 2014.
- M. U. Saleem *et al.*, “Integrating Smart Energy Management
System with Internet of Things and Cloud Computing for
Efficient Demand Side Management in Smart Grids,”
Energies (Basel), vol. 16, no. 12, Jun. 2023, doi:
10.3390/en16124835.
- A. Gambarotta *et al.*, “Demonstrating a smart controller in a
hospital integrated energy system,” *Smart Energy*, vol. 12,
Nov. 2023, doi: 10.1016/j.segy.2023.100120.
- H. Yoshino, T. Hong, and N. Nord, “IEA EBC annex 53:
Total energy use in buildings—Analysis and evaluation
methods,” *Energy Build*, vol. 152, pp. 124–136, Oct. 2017,
doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.038.
- V. Chobanov, “Renewable energy sources: Beneficial for the
climate, risky for the hospital energy supply in case of
pandemic,” in *Proceedings - 2020 International Conference
on Smart Grids and Energy Systems, SGES 2020*, Institute of

- Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, pp. 870–875. doi: 10.1109/SGES51519.2020.00160. [74]
- [62] “European Network of Transmission System Operators for Electricity MANAGING CRITICAL GRID SITUATIONS-SUCCESS & CHALLENGES ENTSO-E REPORT OF THE JANUARY 2017 COLD SPELL,” 2017. [75]
- [63] I. L. Taylor, “HURRICANE KATRINA’S IMPACT ON TULANE’S TEACHING HOSPITALS,” 2007.
- [64] “kumamot”. [76]
- [65] G. Kyriakarakos and A. Dounis, “Intelligent management of distributed energy resources for increased resilience and environmental sustainability of hospitals,” Sep. 01, 2020, *MDPI*. doi: 10.3390/SU12187379. [77]
- [66] H. Yoshino, T. Hong, and N. Nord, “IEA EBC annex 53: Total energy use in buildings—Analysis and evaluation methods,” *Energy Build*, vol. 152, pp. 124–136, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.07.038.
- [67] R. Ji and S. Qu, “Investigation and evaluation of energy consumption performance for hospital buildings in China,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 6, 2019, doi: 10.3390/su11061724. [78]
- [68] B. Nouridine and A. Saad, “Energy Consumption in Hospitals,” in *2020 International Conference on Electrical and Information Technologies, ICEIT 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2020. doi: 10.1109/ICEIT48248.2020.9113177. [79]
- [69] Y. Ma, S. Zedan, A. Liu, and W. Miller, “Impact of a Warming Climate on Hospital Energy Use and Decarbonization: An Australian Building Simulation Study,” *Buildings*, vol. 12, no. 8, Aug. 2022, doi: 10.3390/buildings12081275. [80]
- [70] K. J. Mejía, M. D. M. Barbero-Barrera, and M. R. Pérez, “Evaluation of the impact of the envelope system on thermal energy demand in hospital buildings,” *Buildings*, vol. 10, no. 12, pp. 1–17, Dec. 2020, doi: 10.3390/buildings10120250. [81]
- [71] T. Rohde and R. Martinez, “Equipment and energy usage in a large teaching hospital in Norway,” *J Healthc Eng*, vol. 6, no. 3, pp. 419–434, Aug. 2015, doi: 10.1260/2040-2295.6.3.419. [82]
- [72] P. Morgenstern, R. Raslan, and P. Ruyssevelt, “Reducing hospital electricity use: an end-use perspective.” [83]
- [73] J. García-Sanz-Calcedo, A. Al-Kassir, and T. Yusaf, “Economic and environmental impact of energy saving in healthcare buildings,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 3, Mar. 2018, doi: 10.3390/app8030440.
- F. Ibrahim, E. Z. Samsudin, A. R. Ishak, and J. Sathasivam, “The relationship between occupant behaviour and indoor air quality in Malaysian hospital outpatient departments: A multistage cross-sectional study,” *Heliyon*, vol. 10, no. 14, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e34454.
- J. P. K. B. Nyembwe, J. O. Ogundiran, B. Chenari, N. A. V. Simões, and M. Gameiro da Silva, “The Indoor Climate of Hospitals in Tropical Countries: A Systematic Review,” Apr. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16083513.
- P. F. da C. Pereira, E. E. Broday, and A. A. de P. Xavier, “Thermal comfort applied in hospital environments: A literature review,” Oct. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/app10207030.
- Y. Yu, “AI Chiller: An Open IoT Cloud Based Machine Learning Framework for the Energy Saving of Building HVAC System via Big Data Analytics on the Fusion of BMS and Environmental Data,” Oct. 2020, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2011.01047>
- J. K. C. Chen and H. H. Ho, “Asset Resource Optimization Solution for Smart Hospital Facilities and Energy Management through an Interpretive Structural Model,” *Buildings*, vol. 13, no. 12, Dec. 2023, doi: 10.3390/buildings13123064.
- A. Luschi, G. L. Daino, G. Ghisalbetti, V. Mezzatesta, and E. Iadanza, “Empowering Clinical Engineering and Evidence-Based Maintenance with IoT and Indoor Navigation †,” *Future Internet*, vol. 16, no. 8, Aug. 2024, doi: 10.3390/fi16080263.
- H. H. Hosamo, P. R. Svennevig, K. Svidt, D. Han, and H. K. Nielsen, “A Digital Twin predictive maintenance framework of air handling units based on automatic fault detection and diagnostics,” *Energy Build*, vol. 261, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111988.
- Y. Boutahri and A. Tilioua, “An artificial neural network-based system to estimate the thermal comfort of buildings with energy efficiency,” *ITM Web of Conferences*, vol. 52, p. 02003, 2023, doi: 10.1051/itmconf/20235202003.
- M. Alshamrani, “IoT and artificial intelligence implementations for remote healthcare monitoring systems: A survey,” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 8, pp. 4687–4701, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.06.005.
- I. H. Khan and Mohd. Javaid, “Role of Internet of Things (IoT) in Adoption of Industry 4.0,” *Journal of Industrial Integration and Management*, vol. 07, no. 04, pp. 515–533, Dec. 2022, doi: 10.1142/S2424862221500068.

- [84] S. Kumar, P. Tiwari, and M. Zymbler, "Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review," *J Big Data*, vol. 6, no. 1, p. 111, Dec. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0268-2.
- [85] L. M. Joshi, R. K. Bharti, R. Singh, and P. K. Malik, "Real time monitoring of solid waste with customized hardware and Internet of Things," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 102, p. 108262, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108262.
- [86] A. Alabdulatif, I. Khalil, X. Yi, and M. Guizani, "Secure Edge of Things for Smart Healthcare Surveillance Framework," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 31010–31021, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2899323.
- [87] Md. Asif-Ur-Rahman *et al.*, "Toward a Heterogeneous Mist, Fog, and Cloud-Based Framework for the Internet of Healthcare Things," *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 3, pp. 4049–4062, Jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2876088.
- [88] A. Karahoca, D. Karahoca, and M. Aksöz, "Examining intention to adopt to internet of things in healthcare technology products," *Kybernetes*, vol. 47, no. 4, pp. 742–770, Mar. 2018, doi: 10.1108/K-02-2017-0045.
- [89] T. Muhammed, R. Mehmood, A. Albeshri, and I. Katib, "UbeHealth: A Personalized Ubiquitous Cloud and Edge-Enabled Networked Healthcare System for Smart Cities," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32258–32285, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2846609.
- [90] S. U. Amin, M. S. Hossain, G. Muhammad, M. Alhussein, and Md. A. Rahman, "Cognitive Smart Healthcare for Pathology Detection and Monitoring," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 10745–10753, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2891390.
- [91] A. Ghosh, D. Chakraborty, and A. Law, "Artificial intelligence in Internet of things," *CAAI Trans Intell Technol*, vol. 3, no. 4, pp. 208–218, Dec. 2018, doi: 10.1049/trit.2018.1008.
- [92] K. Petersen, S. Vakkalanka, and L. Kuzniarz, "Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update," *Inf Softw Technol*, vol. 64, pp. 1–18, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.infsof.2015.03.007.
- [93] Z. Chang, S. Liu, X. Xiong, Z. Cai, and G. Tu, "A Survey of Recent Advances in Edge-Computing-Powered Artificial Intelligence of Things," *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 18, pp. 13849–13875, Sep. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3088875.
- [94] M. O. Osifeko, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, "Artificial Intelligence Techniques for Cognitive Sensing in Future IoT: State-of-the-Art, Potentials, and Challenges," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 9, no. 2, p. 21, Apr. 2020, doi: 10.3390/jsan9020021.
- [95] C. Zhang, "Intelligent Internet of things service based on artificial intelligence technology," in *2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*, IEEE, Mar. 2021, pp. 731–734, doi: 10.1109/ICBAIE52039.2021.9390061.
- [96] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of Things (IoT) for Next-Generation Smart Systems: A Review of Current Challenges, Future Trends and Prospects for Emerging 5G-IoT Scenarios," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022–23040, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2970118.
- [97] F. Firouzi, B. Farahani, and M. N. Bojnordi, "The Smart 'Things' in IoT," in *Intelligent Internet of Things*, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 51–95, doi: 10.1007/978-3-030-30367-9_2.
- [98] D. Gkouskos and J. Burgos, "I'm in! Towards participatory healthcare of elderly through IOT.," *Procedia Comput Sci*, vol. 113, pp. 647–652, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.08.325.
- [99] M. Pasha and S. M. W. Shah, "Framework for E-Health Systems in IoT-Based Environments," *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2018, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1155/2018/6183732.
- [100] S. I. Siam *et al.*, "Artificial Intelligence of Things: A Survey," *ACM Trans Sens Netw*, Jan. 2024, doi: 10.1145/3690639.
- [101] S. Saba Raoof and M. A. S. Durai, "A Comprehensive Review on Smart Health Care: Applications, Paradigms, and Challenges with Case Studies," 2022, *Hindawi Limited*, doi: 10.1155/2022/4822235.
- [102] E. Villar, I. Martín Toral, I. Calvo, O. Barambones, and P. Fernández-Bustamante, "Architectures for Industrial AIoT Applications," *Sensors*, vol. 24, no. 15, Aug. 2024, doi: 10.3390/s24154929.
- [103] R. C. Schank, "What Is AI, Anyway?," 1987.
- [104] J. T. Dellosa and E. C. Palconit, "Artificial Intelligence (AI) in Renewable Energy Systems: A Condensed Review of its Applications and Techniques," in *21st IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 5th IEEE Industrial and Commercial Power System Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, doi: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584587.

- [105] A. Thacharodi *et al.*, “Revolutionizing healthcare and medicine: The impact of modern technologies for a healthier future—A comprehensive review,” Oct. 01, 2024, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/hcs2.115.
- [106] M. Fatehijananloo, H. Stopps, and J. J. McArthur, “Exploring Artificial Intelligence Methods for Energy Prediction in Healthcare Facilities: An In-Depth Extended Systematic Review.”
- [107] K. Razzaq and M. Shah, “Machine Learning and Deep Learning Paradigms: From Techniques to Practical Applications and Research Frontiers,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/computers14030093.
- [108] L. Alzubaidi *et al.*, “Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions,” *J Big Data*, vol. 8, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40537-021-00444-8.
- [109] H. O. Garcés *et al.*, “Monitoring of Thermal Comfort and Air Quality for Sustainable Energy Management inside Hospitals Based on Online Analytical Processing and the Internet of Things,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/ijerph191912207.
- [110] M. S. Al-kahtani, F. Khan, and W. Taekeun, “Application of Internet of Things and Sensors in Healthcare,” Aug. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22155738.
- [111] H. Kuchuk and E. Malokhvii, “INTEGRATION OF IOT WITH CLOUD, FOG, AND EDGE COMPUTING: A REVIEW,” *Advanced Information Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 65–78, Jun. 2024, doi: 10.20998/2522-9052.2024.2.08.
- [112] Y. Himeur, K. Ghanem, A. Alsalemi, F. Bensaali, and A. Amira, “Artificial Intelligence based Anomaly Detection of Energy Consumption in Buildings: A Review, Current Trends and New Perspectives,” Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116601.
- [113] S. Mischos, E. Dalagdi, and D. Vrakas, “Intelligent energy management systems: a review,” *Artif Intell Rev*, vol. 56, no. 10, pp. 11635–11674, Oct. 2023, doi: 10.1007/s10462-023-10441-3.
- [114] J. S. Yalli *et al.*, “A Systematic Review for Evaluating IoT Security: A Focus on Authentication, Protocols and Enabling Technologies,” *IEEE Internet Things J*, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3545737.
- [115] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [116] I. Bala, I. A. Pindoo, M. M. Mijwil, M. Abotaleb, and W. Yundong, “Ensuring Security and Privacy in Healthcare Systems: A Review Exploring Challenges, Solutions, Future Trends, and the Practical Applications of Artificial Intelligence,” *Jordan Med J*, vol. 58, no. 2, pp. 250–270, 2024, doi: 10.35516/jmj.v58i2.2527.
- [117] V. F. Rodrigues, R. da R. Righi, C. A. da Costa, and R. S. Antunes, “Smart Hospitals and IoT Sensors: Why Is QoS Essential Here?,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 3, Sep. 2022, doi: 10.3390/jsan11030033.
- [118] Y. A. Al-Khassawneh, “A Review of Artificial Intelligence in Security and Privacy: Research Advances, Applications, Opportunities, and Challenges,” *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 79–96, 2023, doi: 10.17509/ijost.v8i1.52709.
- [119] Ida Syafiza M. Isa, Taisir E.H. El-Gorashi, Mohamed O.I. Musa, and Jaafar M.H. Elmirghani, “Energy Efficient Fog-Based Healthcare Monitoring Infrastructure,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197828–197852, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033555.
- [120] M. A. Jan, F. Khan, S. Mastorakis, M. Adil, A. Akbar, and N. Stergiou, “LightIoT: Lightweight and Secure Communication for Energy-Efficient IoT in Health Informatics,” Apr. 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2104.14906>
- [121] M. Fatehijananloo, H. Stopps, and J. J. McArthur, “Exploring Artificial Intelligence Methods for Energy Prediction in Healthcare Facilities: An In-Depth Extended Systematic Review.”
- [122] B. Brik, M. Esseghir, L. Merghem-Boulahia, and A. Hentati, “Providing Convenient Indoor Thermal Comfort in Real-Time Based on Energy-Efficiency IoT Network†,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15030808.
- [123] R. Frassanito *et al.*, “How IoT and Artificial Intelligence can improve energy efficiency in hospitals - A North Italian case study,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Mar. 2022. doi: 10.1051/e3sconf/202234302001.
- [124] X. Liang, F. de Nijs, B. Say, and H. Wang, “Human-in-the-Loop AI for HVAC Management Enhancing Comfort and Energy Efficiency,” in *Proceedings of the 16th ACM International Conference on Future and Sustainable Energy Systems*, New York, NY, USA: ACM, Jun. 2025, pp. 359–370. doi: 10.1145/3679240.3734587.

- [125] A. Kumar, M. Masud, M. H. Alsharif, N. Gaur, and A. Nanthamornphong, "Integrating 6G technology in smart hospitals: challenges and opportunities for enhanced healthcare services," *Front Med (Lausanne)*, vol. 12, 2025, doi: 10.3389/fmed.2025.1534551.
- [126] P. R. Chai *et al.*, "Internet of things buttons for real-time notifications in hospital operations: Proposal for hospital implementation," *J Med Internet Res*, vol. 20, no. 8, Aug. 2018, doi: 10.2196/jmir.9454.
- [127] J. Dong, C. Winstead, J. Nutaro, and T. Kuruganti, "Occupancy-based HVAC control with short-term occupancy prediction algorithms for energy-efficient buildings," *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 9, Sep. 2018, doi: 10.3390/en11092427.
- [128] A. A. Pise *et al.*, "Enabling Artificial Intelligence of Things (AIoT) Healthcare Architectures and Listing Security Issues," *Comput Intell Neurosci*, vol. 2022, pp. 1–14, Aug. 2022, doi: 10.1155/2022/8421434.
- [129] E. T. Maddalena, S. A. Müller, R. M. dos Santos, C. Salzmann, and C. N. Jones, "Experimental data-driven model predictive control of a hospital HVAC system during regular use," *Energy Build*, vol. 271, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112316.
- [130] L. Cao, Y. Li, J. Zhang, Y. Jiang, Y. Han, and J. Wei, "Electrical load prediction of healthcare buildings through single and ensemble learning," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2751–2767, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.10.005.
- [131] A. M. Said, A. Yahyaoui, and T. Abdellatif, "Efficient anomaly detection for smart hospital iot systems," *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 4, pp. 1–24, Feb. 2021, doi: 10.3390/s21041026.
- [132] S. Saba Raoof and M. A. S. Durai, "A Comprehensive Review on Smart Health Care: Applications, Paradigms, and Challenges with Case Studies," 2022, *Hindawi Limited*. doi: 10.1155/2022/4822235.
- [133] C. Li, J. Wang, S. Wang, and Y. Zhang, "A review of IoT applications in healthcare," *Neurocomputing*, vol. 565, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2023.127017.
- [134] J. Luo, "A Bibliometric Review on Artificial Intelligence for Smart Buildings," Aug. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/su141610230.
- [135] D. M. T. E. Ali, V. Motuzienė, and R. Džiugaitė-Tumėnienė, "AI-Driven Innovations in Building Energy Management Systems: A Review of Potential Applications and Energy Savings," Sep. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17174277.
- [136] P. Pariso, M. Picariello, and A. Marino, "AI integration in energy management: enhancing efficiency in Italian hospitals," *Health Econ Rev*, vol. 15, no. 1, p. 40, May 2025, doi: 10.1186/s13561-025-00638-3.
- [137] R. Frassanito *et al.*, "How IoT and Artificial Intelligence can improve energy efficiency in hospitals - A North Italian case study," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Mar. 2022. doi: 10.1051/e3sconf/202234302001.
- [138] N. Burgu, H. Gözde, and M. C. Taplamacioğlu, "International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Volume : 3 Number: 1 Efficiency Optimization Of Combined Heat And Power System Integrated With Renewable Energy For A Hospital."
- [139] "Total Energy Use in Buildings: Analysis and Evaluation Methods (Annex 53)," 2016.
- [140] A. Wagner, E. Gossauer, C. Moosmann, T. Gropp, and R. Leonhart, "Thermal comfort and workplace occupant satisfaction-Results of field studies in German low energy office buildings," *Energy Build*, vol. 39, no. 7, pp. 758–769, Jul. 2007, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.013.
- [141] C. Marantos, C. P. Lampracos, V. Tsoutsouras, K. Siozios, and D. Soudris, "Towards plug&play smart thermostats inspired by reinforcement learning," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Oct. 2018, pp. 39–44. doi: 10.1145/3285017.3285024.
- [142] F. Auffenberg, S. Snow, S. Stein, and A. Rogers, "A comfort-based approach to smart heating and air conditioning," *ACM Trans Intell Syst Technol*, vol. 9, no. 3, Dec. 2017, doi: 10.1145/3057730.
- [143] S. Zhayida, S. Burgess, Y. Kuang, and K. Åström, "TOA-Based Self-Calibration of Dual-Microphone Array," *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, vol. 9, no. 5, pp. 791–801, Aug. 2015, doi: 10.1109/JSTSP.2015.2417117.
- [144] G. Hunt, G. Letey, and E. B. Nightingale, "The Seven Properties of Highly Secured Devices (2nd Edition) 1,2."
- [145] H. D. Vu *et al.*, "Data driven chiller plant energy optimization with domain knowledge," in *International Conference on Information and Knowledge Management, Proceedings*, Association for Computing Machinery, Nov. 2017, pp. 1309–1317. doi: 10.1145/3132847.3132860.
- [146] S. Shoar and N. Chileshe, "Exploring the causes of design changes in building construction projects: An interpretive structural modeling approach," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2021, doi: 10.3390/su13179578.

- [147] S. Tang, D. R. Sheldon, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi, and X. Gao, “A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends,” May 01, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.020.
- [148] B. Dong, Q. Shi, Y. Yang, F. Wen, Z. Zhang, and C. Lee, “Technology evolution from self-powered sensors to AIoT enabled smart homes,” *Nano Energy*, vol. 79, p. 105414, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105414.
- [149] C. Shen, K. Zhao, J. Ge, and Q. Zhou, “Analysis of building energy consumption in a hospital in the hot summer and cold winter area,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 3735–3740. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.883.
- [150] K. Bawaneh, F. G. Nezami, M. Rasheduzzaman, and B. Deken, “Energy consumption analysis and characterization of healthcare facilities in the United States,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12193775.
- [151] T. Rohde and R. Martinez, “Equipment and energy usage in a large teaching hospital in Norway,” *J Healthc Eng*, vol. 6, no. 3, pp. 419–434, Aug. 2015, doi: 10.1260/2040-2295.6.3.419.



Universidad
LATINA de Panamá
SUMMUM DESIDERIUM SAPIENTIA

SEDE CENTRAL

FORMULARIO DE ENTREGA DE PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN

Nota: Llenar este formulario a máquina de escribir. Entregar este formulario junto con el Proyecto Final de Graduación y los Paz y Salvo

Por este medio, notifico que el Proyecto

Titulado: "SISTEMAS INTELIGENTES PARA GESTIÓN ENERGÉTICA DE INFRAESTRUCTURAS HOSPITALARIAS"

Correspondiente al estudiante: Lidianeth De Gracia Suárez

De la carrera: Licenciatura en Ingeniería Biomédica e Instrumentación

Doy fe que he revisado y autorizado la entrega del Proyecto Final de Graduación (Documento Final), a Secretaría Académica, por reunir los requisitos y acatamientos exigidos por la Universidad Latina de Panamá y sugiere se le asigne la fecha para su defensa oral (sustentación).

Autorización del Director del Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor Director: Dr. Luis Estrada Petrocelli

Firma de Autorización:

Teléfono: 6721-8204

Autorización del Profesor responsable del Curso Proyecto Final de Graduación:

Nombre del Profesor: Mgtr. Alfredo Lescher

Firma de Autorización

Teléfono: 6126-3467

En caso de revisión de un Profesor de Español

Notifico que doy fe que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Nombre del Profesor de español: Eira Yanira Martínez de Muñoz

Autorización: Eira M. de Muñoz

Firma del Estudiante Lidianeth De Gracia S. Fecha de Entrega: 20/08/2025

Recibido por _____ Fecha _____



Carta de revisión del Profesor de Español

Panamá, 05 de agosto del 2025

Señores:

UNIVERSIDAD LATINA DE PANAMÁ

E. S. D.

Estimados Señores:

La suscrita Eira Yanira Martínez de Muñoz con cédula de identidad personal 5-10-188 notifico haber revisado por solicitud del estudiante Lidianeth De Gracia Suárez, con cédula de identidad personal número 8-935-1302, el proyecto final de graduación titulado “Sistemas Inteligentes de Gestión Energética para Infraestructuras Hospitalarias” y a su vez doy fe que el documento cumple satisfactoriamente con todos los requisitos formales de ortografía y de redacción exigidos por el idioma español.

Atentamente,

Eira M. de Muñoz



REPÚBLICA DE PANAMÁ
DOCUMENTO DE IDENTIDAD

100554



Eira Yanira
Martinez Franco de Muñoz

NOMBRE USUAL

FECHA DE NACIMIENTO: 10-may-1954

LUGAR DE NACIMIENTO: DARIÉN

SEXO: F TIPO DE SANGRE: ♥

EMPEZADA: 14-mar-2023 EXPIRA: 14-mar-2038

Eira M. de Muñoz

100554

5-10-188

UNIVERSIDAD DE PANAMA

LA FACULTAD DE

Filosofía, Letras y Educación

EN VIRTUD DE LA POTESTAD QUE LE CONFIEREN LA LEY Y EL ESTATUTO UNIVERSITARIO,
HACE CONSTAR QUE

Gira Martínez Franco de Muñoz

HA TERMINADO LOS ESTUDIOS Y CUMPLIDO CON LOS REQUISITOS
QUE LE HACEN ACREEDOR AL TITULO DE

*Licenciada en Filosofía y Letras
con Especialización en Español*

Y EN CONSECUENCIA, SE LE CONCEDE TAL GRADO CON TODOS LOS DERECHOS,
HONORES Y PRIVILEGIOS RESPECTIVOS, EN TESTIMONIO DE LO CUAL SE LE EXPIDE
ESTE DIPLOMA EN LA CIUDAD DE PANAMA A LOS
DIAS DEL MES DE *diciembre* DE MIL NOVECIENTOS *veintiseis* *ochenta y cuatro*.

Secretaría General

Diploma N° 12456

Identificación Personal

5-10-198

[Signature]
Votano

[Signature]
Rector

UNIVERSIDAD DE PANAMA
SECRETARIA GENERAL
ES FIEL COPIA DE SU ORIGEN
09 DIC 2008
Fecha: _____

[Signature]
Dra. Manuela Foster
Sub Secretaria General
Universidad de Panamá

