Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]USO DE GEMELOS DIGITALES Y SENSORES IOT PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE GRÚAS EN CONSTRUCCIÓN

Use of Digital Twins and IoT Sensors for Energy Efficiency in Construction Cranes

Jhonattan G. Martinez
Aarhus University | Aarhus, Denmark | jgmartinez@cae.au.dk

Patrick Montanari
Aarhus University | Aarhus, Denmark | patrickm@cae.au.dk

Lorenzo Ivan Loyola
Aarhus University | Aarhus, Denmark | 202302954@post.au.dk

Saijal Singhal
Aarhus University | Aarhus, Denmark | 202403603@post.au.dk

RESUMEN

Este artículo presenta el diseño y la implementación de un gemelo digital para monitorear grúas en un sitio de construcción mediante sensores de Internet de las cosas (IoT) y una base de datos temporal InfluxDB. El objetivo principal fue analizar en tiempo real el consumo energético, identificar patrones de ineficiencia, especialmente durante el horario nocturno, y generar una base de conocimiento para decisiones operativas sostenibles. El estudio se llevó a cabo en Billund, Dinamarca, donde se monitorearon tres torres grúas durante un mes. Los resultados muestran importantes oportunidades de mejora en el uso eficiente de maquinaria y revelan patrones de consumo subóptimos durante horas inactivas

Palavras-chave: Gemelo digital; Sensores IoT, Grúas de construcción, Eficiencia energética.

ABSTRACT

This article presents the design and implementation of a digital twin for monitoring cranes on a construction site using IoT sensors and a time-series database (InfluxDB). The main objective was to analyze energy consumption in real-time, identify inefficiency patterns, opportunities for improving machinery efficiency and highlight suboptimal energy consumption patterns during idle hours.

Keywords: *Digital Twin; IoT Sensors; Construction Cranes; Energy Efficiency*

1 INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción se enfrenta a crecientes presiones para optimizar sus operaciones, aumentar la eficiencia y reducir su impacto ambiental (Teizer et al. 2020). En este contexto, el uso de gemelos digitales ha emergido como una solución innovadora que permite simular, analizar y optimizar activos físicos a partir de datos actualizados en tiempo real. Un gemelo digital se define como una representación virtual precisa de un objeto, proceso o sistema físico, la cual se actualiza continuamente mediante la integración de datos provenientes de sensores, dispositivos IoT y otras fuentes digitales (Agostino et al. 2020). En el ámbito de la construcción, un gemelo digital constituye una réplica virtual de un componente físico del proyecto, como una edificación, una máquina o una fase específica de la obra, que se enlaza con información recolectada en campo, incluyendo modelos BIM, datos de sensores, imágenes de drones y bases de datos operativas para monitorear, predecir y optimizar en tiempo real el desarrollo constructivo (Sacks et al. 2020). Esta tecnología no solo facilita una comprensión más profunda del comportamiento del sistema físico, sino que también habilita la toma de decisiones informadas orientadas a la sostenibilidad, la seguridad y la productividad en entornos complejos.

En los últimos años, el uso de gemelos digitales para maquinaria y equipos en la construcción ha recibido creciente atención debido a su potencial para mejorar la eficiencia operativa, reducir el consumo energético y optimizar la toma de decisiones en obra. Investigaciones como la de Zhong et al. (2023) han demostrado que la integración de modelos digitales con datos de sensores en tiempo real permite monitorear el estado de equipos de movimiento de tierras, facilitando el mantenimiento predictivo y la planificación logística. Del mismo modo, Babazadeh et al. (2023) desarrolló un método para generar mapas de ruido en obras de construcción mediante la combinación de datos de fuentes de ruido extraídos del modelo BIM y mediciones en tiempo real

[1]MARTINEZ, J. G.; MONTANARI, P.; LOYOLA, L. I.; SINGHAL, S. Uso de Gemelos Digitales y Sensores IoT para la Eficiencia Energética de Grúas en Construcción. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

capturadas con sensores IoT. El objetivo fue mejorar la planificación del sitio y controlar la exposición al ruido, protegiendo la salud de los trabajadores y de la comunidad cercana. Estas investigaciones sientan las bases

para la aplicación de gemelos digitales no solo a vehículos móviles, sino también a maquinaria estacionaria de alta criticidad, como las grúas torre.

Desde la perspectiva de la Construcción Esbelta, estas tecnologías representan una herramienta fundamental para reducir el desperdicio, mejorar el flujo de trabajo y aumentar el valor entregado al cliente. En particular, el monitoreo en tiempo real de grúas mediante gemelos digitales permite identificar y eliminar actividades que no agregan valor, como el consumo energético no productivo. En este marco, el concepto desperdicio (waste) se refiere a cualquier uso de recursos que no contribuye directamente al valor del producto final, incluyendo tiempos de espera, inactividad innecesaria, movimientos redundantes y consumo energético injustificado. Estos tiempos en las grúas se reconoce como una categoría específica de desperdicio operativo dentro del sistema Lean. Esta clasificación permite alinear el monitoreo energético de grúas con los principios fundamentales de Lean Construction, como la visibilidad operativa, la reducción de variabilidad y la mejora continua, facilitando así decisiones basadas en datos y estrategias de optimización adaptadas al contexto constructivo.

Uno de los activos más importantes en los proyectos de construcción vertical son las grúas torre, debido a su papel central en la manipulación y transporte de materiales pesados en altura. Estas máquinas determinan en gran medida el ritmo de avance del proyecto, influyen en la logística del sitio y representan un consumo energético significativo (Motyčka et al. 2022). A pesar de su importancia operativa, en muchos casos su uso no se gestiona de manera óptima, generando tiempos de inactividad elevados, consumo excesivo de energía y cuellos de botella en la cadena de suministro de materiales. Su correcta operación influye significativamente en el rendimiento de obra, la seguridad y el consumo energético del proyecto (Shapira and Ben-David 2017). Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado que las grúas en proyectos de construcción experimentan niveles considerables de tiempo inactivo o "idle time", lo cual impacta negativamente tanto en la eficiencia operativa como en la sostenibilidad ambiental del proyecto (Sacks et al. 2010).

Estudios como el de Hajjar and AbouRizk (2002) han evidenciado que el tiempo inactivo en grúas puede representar hasta un 40% del tiempo total de operación, asociado a deficiencias en la coordinación, espera de materiales o decisiones operativas tardías. Esta problemática se ve agravada por la falta de visibilidad en tiempo real sobre el uso efectivo del equipo, lo cual limita las posibilidades de intervención correctiva. Con el avance de la digitalización en la construcción, han surgido soluciones basadas en sensores IoT y sistemas de monitoreo que permiten registrar variables operativas clave, incluyendo consumo energético, ciclos de trabajo, y eventos de parada. La literatura reciente ha abordado el uso de tecnologías de monitoreo en equipos como excavadoras (Zankoul et al. 2015) o retroexcavadoras (Hong et al. 2024), pero los estudios centrados exclusivamente en grúas siguen siendo limitados, a pesar de su relevancia operativa.

Este artículo aborda dicha brecha mediante el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real para grúas utilizando sensores IoT e InfluxDB como base de datos temporal. El estudio se centra en un proyecto en Billund, Dinamarca, donde se monitorearon tres grúas durante un mes con el objetivo de analizar el comportamiento energético, identificar periodos de uso ineficiente y evaluar el potencial del gemelo digital como herramienta de gestión.

2 BRECHAS DE INVESTIGACIÓN

A pesar del creciente interés en la digitalización del sector de la construcción, existen notables brechas en la literatura respecto al monitoreo energético específico de grúas mediante gemelos digitales e IoT. La mayoría de los estudios actuales se centran en maquinaria móvil como excavadoras o camiones, dejando de lado el análisis detallado de grúas torre, a pesar de su rol crítico en obras verticales y su alto consumo energético. Además, pocos trabajos abordan la integración de datos operativos en tiempo real con sistemas de visualización interactiva que permitan una toma de decisiones inmediata. También se observa una falta de métricas estandarizadas para cuantificar el tiempo inactivo o evaluar la eficiencia energética de estos equipos. Estas carencias limitan la capacidad de los gestores de obra para implementar estrategias efectivas de control y optimización. En este contexto, la presente investigación busca contribuir al cierre de estas brechas mediante el desarrollo de un sistema integral que combine sensores IoT, análisis de datos y visualización dinámica para mejorar la gestión energética de grúas en construcción

3 METODOLOGIA

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar e implementar un sistema de gemelo digital que permita monitorear en tiempo real el comportamiento energético de grúas torre mediante sensores IoT y análisis de series temporales, con el fin de identificar patrones de ineficiencia operativa, cuantificar el tiempo inactivo y proponer estrategias orientadas a mejorar la eficiencia energética en proyectos de construcción. Este trabajo busca demostrar cómo la integración de tecnologías digitales puede transformar las grúas de simples activos operativos en nodos inteligentes dentro de un ecosistema de gestión sostenible de la obra. La metodología adoptada para la implementación del gemelo digital se desarrolló en cuatro etapas secuenciales:

1) *Diseño e instalación del sistema de sensores IoT:* Se seleccionaron sensores eléctricos compatibles con protocolos de comunicación MQTT para registrar consumo energético, tiempos de operación y actividad de izaje. Estos sensores fueron instalados en tres grúas torre en el sitio de construcción de Billund.

2) *Integración con base de datos temporal:* Se configuró un servidor InfluxDB para el almacenamiento de datos en tiempo real. La estructura de datos se organizó en series temporales que permitieron la consulta por grúa, fecha y tipo de operación.

3) *Visualización y análisis del gemelo digital:* Se desarrolló una interfaz gráfica que replicaba el estado y comportamiento de las grúas, permitiendo observar patrones de consumo, tiempos inactivos y alertas operativas.

4) *Evaluación de desempeño y patrones de uso*: Se analizaron los datos recolectados durante un periodo de 30 días, identificando tendencias de consumo nocturno, picos de actividad, y correlaciones entre operación y energía.

3.1 DISEÑO EN INSTALACION DEL SISTEMA DE SENSORES IOT

El diseño inicial del sistema inició con un análisis funcional de los requerimientos de monitoreo energético y operativo de las grúas. Para ello, se seleccionaron sensores eléctricos de tipo clamp-on y medidores digitales con salida de datos Modbus RTU, compatibles con gateways MQTT. Estos sensores son capaces de medir variables como consumo en kWh, picos de corriente, estado de operación (ON/OFF), frecuencia de uso del sistema de izaje, y condiciones térmicas del ambiente inmediato. Se realizó una inspección técnica en cada grúa para definir puntos óptimos de instalación con criterios de accesibilidad, seguridad eléctrica y no interferencia con operaciones. Tabla 1 muestra las características técnicas de los sensores usados para el desarrollo del sistema.

Tabla 1. Características técnicas de los sensores IoT

Característica	Especificaciones
Rango de voltaje	100–500 V AC
Rango de corriente	hasta 1000 A (mediante transformadores de corriente)
Precisión	±1% en condiciones estándar
Frecuencia	50/60 Hz
Protocolo	MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)
Redes compatibles	Wi-Fi / LTE-M / NB-IoT
Frecuencia de muestreo	configurable (por ejemplo, 1 lectura cada 5 segundos)

La instalación fue ejecutada por técnicos certificados, asegurando calibración y verificación mediante pruebas de carga en vacío y en operación. El proceso de integración de los sensores se desarrolló en el marco de un proyecto de construcción ubicado en la ciudad de Billund, Dinamarca. Este proyecto, cuya fecha de inicio fue noviembre de 2024, contempla una superficie aproximada de 43,000 m² y consiste en una edificación híbrida que combina madera estructural y concreto armado. Actualmente, el proyecto se encuentra en la etapa de ejecución de fundaciones en las zonas 1 y 2 (Ver Ilustración 1), lo que implica un uso intensivo de maquinaria para movimientos de tierra, colocación de acero y vaciado de hormigón, actividades en las que se requiere una operación constante y coordinada de las grúas.

Ilustración 1. ubicación de las grúas en el sitio

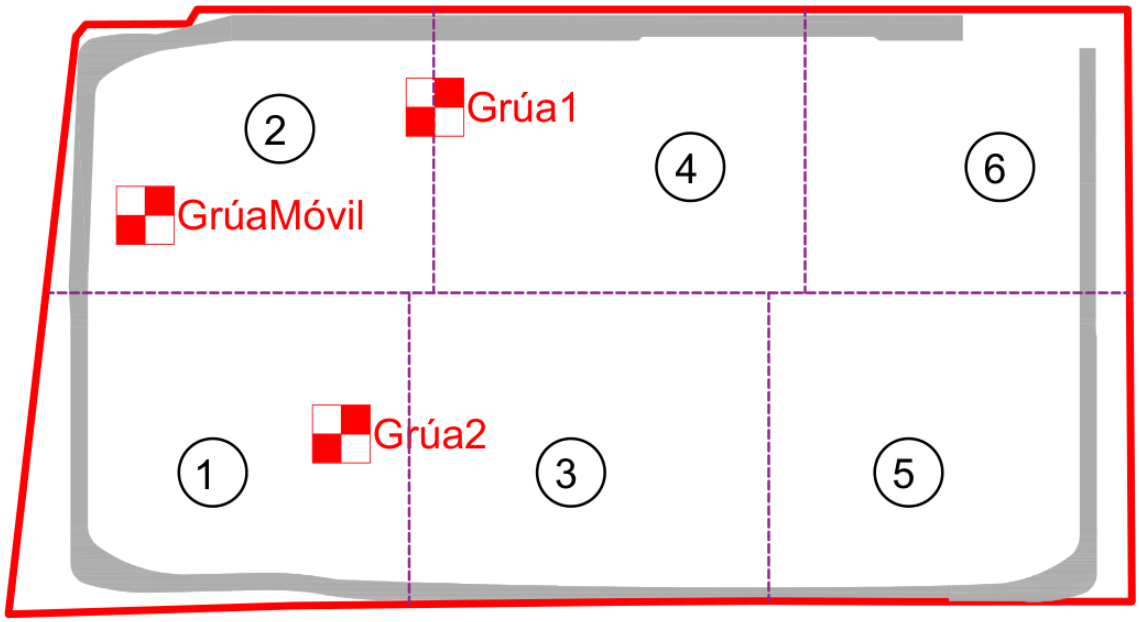


Tabla 2 muestra las características técnicas de las grúas que fueron monitoreadas durante el estudio.

Tabla 2. Listado de grúas monitorizadas

TAG	ID	Fabricante	Modelo
Grúa1	815789	Liebherr	125K
Grúa2	821126	Liebherr	125K
Grúa Móvil	821241	Manitowoc	IGO MA21

La fase de recolección de datos de las grúas se llevó a cabo entre los meses de febrero y marzo de 2025, coincidiendo con la ejecución de las actividades de excavación y construcción de las fundaciones. Esta etapa fue clave para evaluar el comportamiento energético de los equipos durante tareas intensivas de movimiento de materiales en las fases iniciales del proyecto. La ilustración 2 muestra las grúas que fueron utilizadas para el estudio.

Ilustración 2. Torres grúas utilizadas para el estudio



3.2 INTEGRACIÓN CON BASE DE DATOS TEMPORAL

La arquitectura de datos incluyó la creación de un servidor InfluxDB para el almacenamiento eficiente de

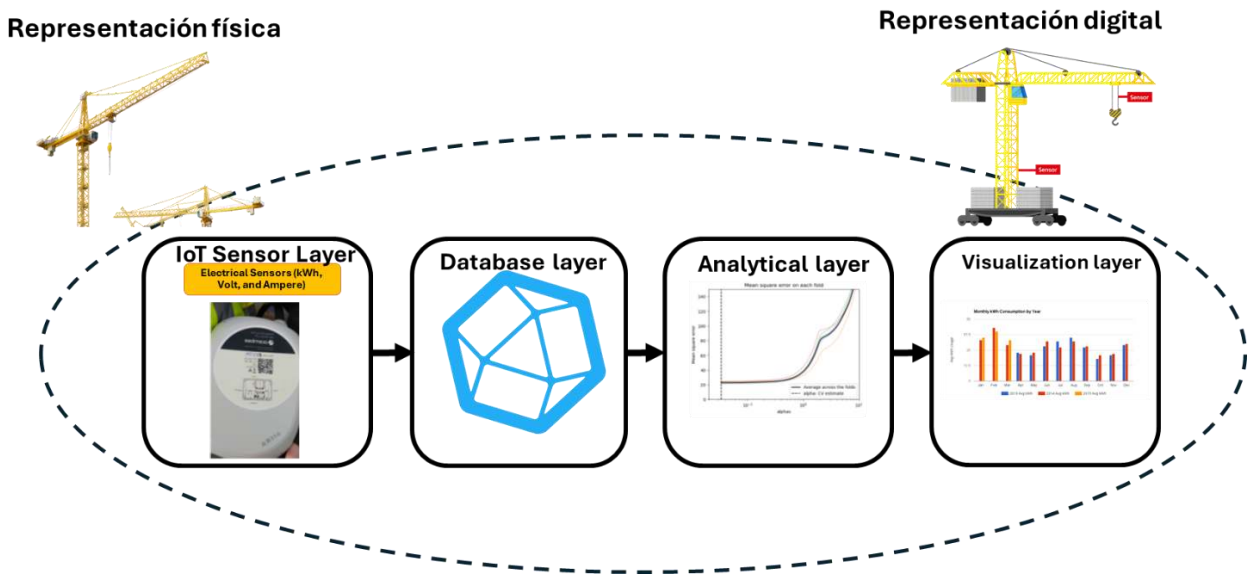
información en forma de series temporales, complementado con un respaldo en la nube mediante scripts de sincronización implementados en AWS (Amazon Web Servicie). Los datos fueron organizados un bucket para todas las grúas monitoreada, estructurados por número de identificación, fecha, tipo de métrica (consumo energético, estado operativo, ciclos de izaje, temperatura) y origen del sensor, permitiendo consultas flexibles y de bajo costo computacional.

Los sensores eléctricos utilizados fueron integrados al sistema mediante una combinación de protocolos MQTT para la transmisión inicial de datos y REST API para la escritura y consulta directa en la base de datos. En particular, se emplearon endpoints de la API de InfluxDB para realizar peticiones POST con datos codificados en formato JSON, los cuales fueron validados y transformados previamente mediante un pipeline de procesamiento desarrollado en Python. Este pipeline incluyó el uso de bibliotecas como paho-mqtt para la suscripción a los tópicos de sensores, pandas para la limpieza y transformación de los datos, y influxdb-client para su envío seguro y estructurado a la base de datos.

Además, se implementaron mecanismos de control de errores y persistencia temporal en dispositivos edge para mitigar la pérdida de datos ante fallas de conectividad. Se definieron políticas de retención diferenciadas: los datos en alta resolución (1 dato cada 5 segundos) se almacenaron por un periodo de 30 días, mientras que los agregados por hora fueron preservados durante seis meses para análisis históricos y generación de indicadores clave de desempeño (KPIs). Esta configuración permitió mantener un equilibrio entre granularidad de los datos y eficiencia en el uso del almacenamiento.

Para garantizar la seguridad en la transmisión de datos y la integridad del sistema, se implementaron protocolos de autenticación robustos en el acceso a la API de InfluxDB. Cada sensor y gateway fue configurado con tokens de autenticación individuales, generados desde el servicio de gestión de usuarios de InfluxDB, lo que permitió un control granular sobre los permisos de lectura y escritura por dispositivo. Asimismo, todas las comunicaciones REST fueron realizadas a través de conexiones cifradas mediante HTTPS, asegurando la protección de los datos durante el tránsito. Ilustración 3 muestra la sincronización entre todos los componentes del sistema.

Ilustración 3. Arquitectura del sistema



3.3 Visualización y análisis del gemelo digital

La visualización del gemelo digital se diseñó como una interfaz dinámica e interactiva que permite representar en tiempo real el estado operativo de cada grúa monitoreada. Para ello, se utilizó la plataforma Grafana, configurada con acceso restringido por roles, permitiendo a distintos perfiles del proyecto (por ejemplo, dirección de obra, supervisión técnica, equipo de mantenimiento) consultar información relevante según sus

necesidades operativas. Los tableros de decisiones incluyeron visualizaciones de series de tiempo para variables clave como consumo energético (kWh), estados de operación (ON/OFF), frecuencia de izaje y condiciones térmicas.

El sistema de monitoreo se concibió como una herramienta central dentro del gemelo digital, permitiendo la supervisión continua de variables críticas del funcionamiento de las grúas en obra. Esta capacidad de observación en tiempo real es fundamental para detectar desviaciones respecto a los parámetros óptimos de operación, emitir alertas tempranas y generar reportes periódicos para la gestión energética. A través del monitoreo, se busca transformar los datos operativos en conocimiento procesable, fortaleciendo la toma de decisiones tanto en el corto como en el mediano plazo.

Asimismo, se incorporaron indicadores clave de desempeño (KPIs) calculados automáticamente a partir de los datos, tales como el factor de inactividad, el número de ciclos de trabajo por hora y las horas acumuladas en estado inactivo. Estas métricas fueron agregadas a distintos niveles (por grúa, por día, por turno) para facilitar comparaciones temporales y entre equipos. Este enfoque de monitoreo continuo sienta las bases para el desarrollo de un gemelo digital completo, capaz de integrar análisis predictivos y recomendaciones automáticas a futuro. La estructura implementada permite escalar hacia un sistema de gestión inteligente, donde los datos operativos no solo se visualizan, sino que guían decisiones proactivas dentro del ciclo de vida del proyecto.

3.4 Evaluación de desempeño y análisis de patrones de uso

La fase de evaluación de desempeño consistió en el análisis sistemático de más de 16 mil registros recopilados durante un periodo de observación de 30 días. Los datos fueron sometidos a un proceso de limpieza, transformación y validación, eliminando valores atípicos y normalizando unidades métricas para asegurar consistencia analítica. Se aplicaron técnicas de análisis de series temporales, estadísticas descriptivas y visualizaciones comparativas entre las distintas grúas para identificar tendencias y anomalías operativas. Se empleó la métrica de "idle factor" definida como el porcentaje de tiempo con consumo, pero sin operación de izaje, comparando entre grúas para establecer parámetros de referencia internos. También se identificaron correlaciones entre condiciones térmicas y variabilidad operativa. Los resultados fueron presentados semanalmente a los gestores del proyecto como informes visuales.

4 RESULTADOS

Las diferencias de consumo entre las grúas permiten clasificar su uso operativo. Como era esperable, la Grúa Móvil (Ver Ilustración 4) presentó un consumo horario promedio significativamente menor (cercano a los 47 kWh), en contraste con los valores constantes superiores a 370 kWh observados en Grúa1 y Grúa2 (ver Ilustraciones 5 y 6). Esta diferencia se explica en parte por el tipo de maquinaria, ya que las grúas torre, al ser estructuras estáticas de mayor capacidad, tienden a consumir más energía.

No obstante, considerando que las tres grúas estaban asignadas a tareas similares durante la etapa de construcción de las fundaciones en las zonas 1 y 2 (ver Ilustración 1), surge como primera observación la pertinencia del uso de la Grúa Móvil como alternativa más eficiente desde el punto de vista energético. Aún más relevante, los datos evidencian que Grúa1 y Grúa2 experimentaron periodos prolongados de consumo sin operación de izaje, lo cual se traduce en tiempo inactivo. Esta condición sugiere que sería oportuno replantear la asignación de tareas, priorizando el uso de la grúa móvil cuando sea posible y aplicando estrategias de control energético diferenciado entre equipos.

El análisis del consumo promedio por hora reveló un patrón consistente de actividad energética durante las horas nocturnas (22:00–06:00), incluso en ausencia de operación física de izaje. Por ejemplo, la Grúa1 (ver Ilustración 7) presentó un consumo estable cercano a 383 kWh entre las 0:00 y las 6:00, sin descensos significativos respecto al periodo diurno. Este comportamiento se repitió en las otras dos grúas (ver Ilustraciones 8 y 9), lo que indica una falta de protocolos de apagado automático o una planificación deficiente del uso energético fuera del horario de operación. La persistencia de este consumo representa una carga innecesaria tanto en términos económicos como ambientales.

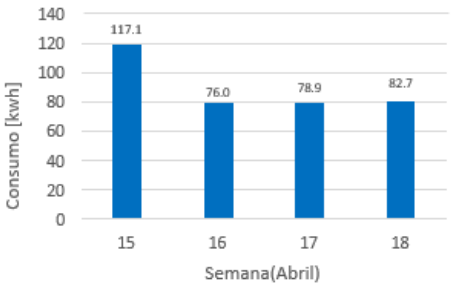


Ilustración 4. Consumo Grúa 1

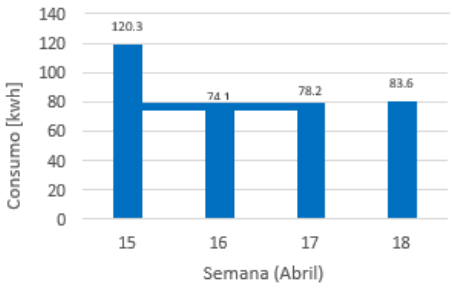


Ilustración 5. Consumo Grúa2

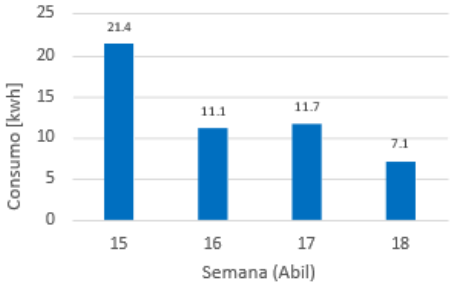


Ilustración 6. Consumo Grua Movil

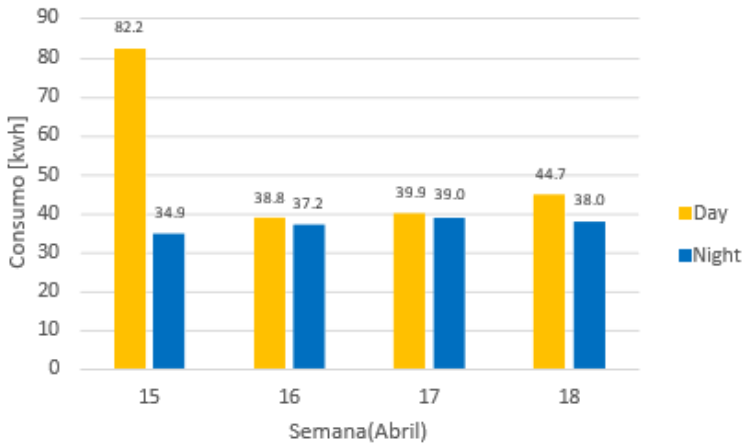


Ilustración 7. Consumo día/noche Grúa1

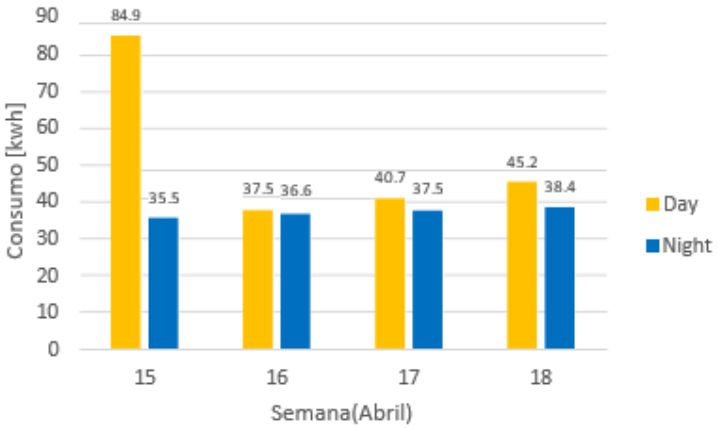


Ilustración 8. Consumo día/noche Grúa2

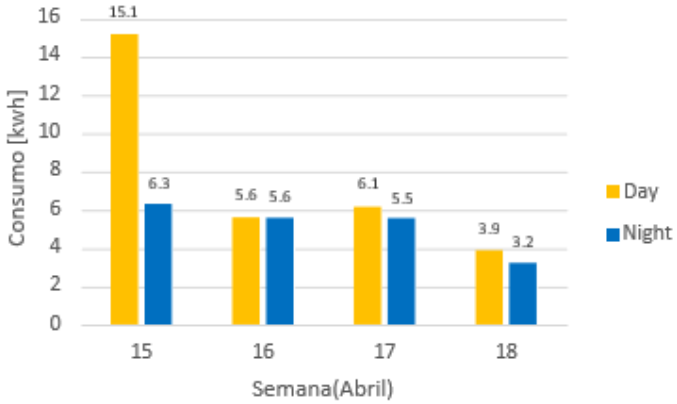


Ilustración 9. Consumo día/noche Grúa Móvil

Al comparar los patrones de consumo con los registros de actividad del sistema de izaje, se identificaron periodos prolongados donde las grúas consumían energía sin realizar operaciones de carga. Esta condición fue cuantificada como tiempo inactivo, y se estimó que entre el 30% y el 40% del tiempo total registrado correspondía a este tipo de ineficiencia. El "factor de inactividad" calculado permitió establecer un comparativo entre grúas y horarios, identificando franjas específicas del día (por ejemplo, entre 11:00 y 13:00, y nuevamente entre 16:00 y 18:00) donde se acumulaban estos comportamientos. Esta información es esencial para implementar acciones correctivas como rutinas de apagado automático, redistribución de tareas o alertas de eficiencia operativa en tiempo real

La visualización de los datos a través del gemelo digital permitió a los gestores de obra detectar estas ineficiencias de manera inmediata. La interfaz 2D y los tableros de decisiones integrados facilitaron la toma de decisiones informadas sobre cuándo y dónde intervenir. Se generaron informes semanales con sugerencias automáticas para reducir el consumo nocturno, priorizar el uso de grúas menos activas en nuevas tareas y establecer horarios óptimos de operación. Esto demuestra el potencial del gemelo digital no solo como herramienta de monitoreo, sino como un sistema activo de gestión energética y de mejora continua

5. DISCUSION

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la implementación de un gemelo digital alimentado por sensores IoT permite visibilizar patrones de ineficiencia energética que tradicionalmente

pasan desapercibidos en la operación de grúas torre. El hallazgo de consumos energéticos significativos durante horas nocturnas, sin actividad productiva asociada, revela la existencia de pérdidas energéticas sistemáticas que podrían ser corregidas mediante la adopción de rutinas automatizadas de apagado, ajustes en la configuración de los sistemas eléctricos o mejores prácticas de operación. Esta situación es consistente con lo señalado por Talmaki et al. (2015), quienes subrayan que la falta de visibilidad operativa en tiempo real es una de las principales causas de ineficiencia en maquinaria de obra.

Asimismo, la variabilidad entre grúas en cuanto a consumo promedio y tiempo inactivo resalta la necesidad de estrategias de gestión personalizadas, basadas en datos empíricos y análisis comparativo. Este enfoque contrasta con los métodos tradicionales de control de equipos, frecuentemente basados en estimaciones generales o experiencia previa. La introducción del "factor de inactividad" como métrica cuantitativa de desempeño representa una contribución relevante, ya que permite establecer parámetros de referencia internos y orientar intervenciones específicas para cada unidad. Estos resultados se alinean con los principios de modelado propuestos por Bolton et al. (2018), que destacan la necesidad de una integración coherente entre datos en tiempo real, modelado digital y soporte a la toma de decisiones.

Desde el punto de vista práctico, la visualización del gemelo digital a través de interfaces gráficas interactivas contribuyó a la adopción rápida de las recomendaciones operativas por parte del personal de obra. Esto sugiere que la tecnología no solo actúa como herramienta de monitoreo pasivo, sino que activa un proceso de aprendizaje organizacional que puede fortalecer la cultura de eficiencia energética en proyectos de construcción. Esta capacidad de traducir datos técnicos en acciones concretas y comprensibles para diversos actores en la obra es uno de los elementos diferenciadores más valiosos del sistema desarrollado.

Finalmente, esta investigación aporta evidencia empírica sobre la viabilidad técnica y el impacto operativo del uso de gemelos digitales en grúas torre, una categoría de maquinaria hasta ahora poco abordada en la literatura científica. Aunque estudios previos como los de Wang et al (2015) y Baqqal et al. (2023) han avanzado en la digitalización de maquinaria móvil y la simulación de operaciones de izaje, pocos han integrado de manera efectiva el monitoreo energético en tiempo real como un componente clave del desempeño. En este sentido, los hallazgos de este estudio abren nuevas líneas de investigación relacionadas con la predicción del consumo energético, la optimización del uso de equipos mediante aprendizaje automático, y la evaluación del impacto ambiental asociado al uso prolongado de maquinaria pesada en obra.

6. LIMITACIONES Y CONCLUSIONES

Este estudio demostró el potencial del uso de gemelos digitales y sensores IoT como herramientas clave para mejorar la eficiencia energética de grúas en entornos de construcción. La implementación del sistema permitió registrar y analizar en tiempo real variables operativas críticas, como el consumo eléctrico y los tiempos de inactividad, ofreciendo a los gestores de obra una visión más precisa del desempeño de los equipos.

Los resultados revelaron un consumo energético significativo durante horas sin actividad productiva, lo que representa una oportunidad clara para reducir costos y emisiones mediante políticas de apagado automático o ajustes en la planificación operativa. Asimismo, se identificó que cerca del 37% del tiempo de operación no estaba vinculado a actividades efectivas, lo que subraya la importancia de tecnologías de monitoreo continuo para optimizar el uso de maquinaria pesada. Esto esta alineado con el estudio realizado por Neve et al. (2022), el cual encontró patrones similares en el comportamiento de maquinaria pesada en la construcción. El gemelo digital desarrollado no solo permitió visualizar el comportamiento energético de las grúas en tiempo real, sino que también facilitó la generación de indicadores e informes útiles para la toma de decisiones operativas. Esta capacidad de diagnóstico representa un avance relevante hacia una gestión más sostenible y basada en datos dentro del sector construcción.

A pesar de los resultados prometedores, esta investigación presenta algunas limitaciones. En primer lugar, el estudio se limitó a tres grúas en un único proyecto de construcción durante un periodo de un mes, lo que restringe la generalización de los hallazgos. Además, el análisis se centró exclusivamente en datos energéticos sin considerar factores contextuales como la programación de obra, condiciones climáticas o el tipo específico de tareas ejecutadas. Finalmente, el sistema de visualización aún depende de consultas manuales y no incorpora alertas automatizadas ni capacidades predictivas. Como trabajo futuro, se propone

ampliar la duración del monitoreo, incluir diferentes tipos de maquinaria, e integrar modelos BIM y algoritmos de inteligencia artificial para anticipar patrones de uso y optimizar la planificación de recursos de forma automatizada.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el programa Femern Fyrtårn 2.0 – Femern Lighthouse, a través del proyecto con número de subvención RFPRO-23-0059. Los autores agradecen este apoyo, que ha sido fundamental para el desarrollo y ejecución del estudio.

REFERENCIAS

Agostino, Í. R. S., E. Broda, E. M. Frazzon, and M. Freitag. 2020. “Using a Digital Twin for Production Planning and Control in Industry 4.0.” *Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing*, International Series in Operations Research & Management Science, B. Sokolov, D. Ivanov, and A. Dolgui, eds., 39–60. Cham: Springer International Publishing.

Babazadeh, N., J. Teizer, H.-J. Bargstädt, and J. Melzner. 2023. “Digital Twin for Control of Noise Emissions from Heavy Equipment on Construction Sites: CIB W099 & W123 Annual International Conference.” *Proceedings of the CIBW099W123*, (E. Fidelis, F. Sherratt, and A. Soeiro, eds.), 211–221.

Baqqal, I., Mouatassim, S., Benabbou, R., & Benhra, J. (2023, February). Digital Twin Design for Monitoring System–A Case Study of Bucket Wheel Excavator. In *International Conference on Artificial Intelligence & Industrial Applications* (pp. 156-166). Cham: Springer Nature Switzerland.

Bolton, R. N., J. R. McColl-Kennedy, L. Cheung, A. Gallan, C. Orsingher, L. Witell, and M. Zaki. 2018. “Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms.” *Journal of Service Management*, 29 (5): 776–808. Emerald Publishing Limited. https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113.

Hajjar, D., and S. M. AbouRizk. 2002. “Unified Modeling Methodology for Construction Simulation.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 128 (2): 174–185. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:2(174).

Hong, K., A. Apostolidis, and J. Teizer. 2024. “Discrete Event Simulation to Predict Construction Equipment Emissions on a Digital Twin Platform.” Lille, France.

Motyčka, V., J. Gašparík, O. Přibyl, M. Štěrba, D. Hořínková, and R. Kantová. 2022. “Effective Use of Tower Cranes over Time in the Selected Construction Process.” *Buildings*, 12 (4): 436. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/buildings12040436.

Neve, H., Wandahl, S., Lindhard, S., Teizer, J. & Lerche, J. (2022). Learning to see value-adding and non-val

ue- adding work time in renovation production systems. *Production Planning & Control* **33**, 790–802.

Sacks, R., I. Brilakis, E. Pikas, H. S. Xie, and M. Girolami. 2020. “Construction with digital twin information systems.”

Data-Centric Engineering, 1. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/dce.2020.16.

Sacks, R., M. Radosavljevic, and R. Barak. 2010. “Requirements for building information modeling based lean production management systems for construction.” *Automation in Construction*, Building Information Modeling and Collaborative Working Environments, 19 (5): 641–655. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.02.010.

Shapira, A., and A. Ben-David. 2017. “Characteristics of Equipment Planning for Multi-Crane Building Construction Sites.”

Buildings, 7 (3): 81. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/buildings7030081.

Talmaki, S., V. R. Kamat, and K. Saidi. 2015. “Feasibility of real-time graphical simulation for active monitoring of

visibility-constrained construction processes.” *Engineering with Computers*, 31 (1): 29–49. https://doi.org/10.1007/s00366-013-0323-0.

Teizer, J., H. Neve, H. Li, S. Wandahl, J. König, B. Ochner, M. König, and J. Lerche. 2020. “Construction resource efficiency improvement by Long Range Wide Area Network tracking and monitoring.” *Automation in Construction*, 116: 103245. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103245.

Wang, J., Zhang, X., Shou, W., Wang, X., Xu, B., Kim, M. J., & Wu, P. (2015). A BIM-based approach for automated tower crane layout planning. *Automation in Construction*, *59*, 168-178.

Zankoul, E., H. Khoury, and R. Awwad. 2015. “Evaluation of Agent-Based and Discrete-Event Simulation for Modeling Construction Earthmoving Operations.” *2015 Proceedings of the 32nd ISARC, Oulu, Finland*. https://doi.org/10.22260/ISARC2015/0014.

Zhong, D., Z. Xia, Y. Zhu, and J. Duan. 2023. “Overview of predictive maintenance based on digital twin technology.”

Heliyon, 9 (4): e14534. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534.