

Estudio del paradigma Internet de las Cosas y tecnologías inalámbricas como arquitectura base de captación de datos en las fases de ejecución y mantenimiento de los proyectos de construcción

María Martínez-Rojas¹, Gregorio Corpas², Autilia Vitiello³, Giovanni Acampora³,
and José Manuel Soto-Hidalgo²

¹ Universidad de Málaga mmrojas@uma.es

² Universidad de Córdoba {i02coprg, jmsoto}@uco.es

³ Universidad Federico II, Nápoles
{autilia.vitiello, giovanni.acampora}@unina.it

Abstract. El paradigma de Internet de las Cosas está afianzándose como tecnología para mejorar la adquisición de datos y gestión de la información en el ámbito de la construcción. En general se consolida como tecnología emergente en todas las fases del ciclo de vida de los proyectos y en concreto, por su aplicabilidad y relevancia, en las fases de ejecución y mantenimiento. El sistema de captación y compartición de datos mediante dispositivos interconectados permite la adquisición de éstos en tiempo real que, posteriormente, pueden ser gestionados por sistemas para ofrecer un soporte inteligente en el proceso de toma de decisiones. El objetivo de este trabajo es realizar un estudio sobre las propuestas existentes en la literatura que utilicen estos enfoques y explorar las necesidades en las fases de ejecución y mantenimiento del ciclo de vida de los proyectos de construcción.

Keywords: Internet de las Cosas · Ciclo de vida proyectos Construcción · Fase de ejecución · Fase de mantenimiento

1 Introducción

Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) han tardado en adaptarse a la industria de la construcción por diversos motivos aunque principalmente todos ellos están relacionados con las características propias del sector [7]. Es decir, la temporalidad de los proyectos [38], el carácter tradicional [32], la simultaneidad de trabajos [2] o la singularidad de cada proyecto de construcción [30], etc. son los principales elementos limitantes de la integración de las TIC en este sector. Sin embargo, en la última década se ha experimentado una transformación importante en relación al uso de las nuevas tecnologías para dar soporte a la gestión de los proyectos de construcción [11, 1, 24].

El ciclo de vida de los proyectos de construcción contempla fases de diversa índole: (i) identificación de requisitos, (ii) planificación del proyecto, (iii) diseño (iv) ejecución, (v) mantenimiento y (vi) demolición. Dentro de estas fases, la que ocupa el periodo de

tiempo más largo del ciclo de vida de un edificio es la fase de mantenimiento [42]. Desde la perspectiva de la gestión, el objetivo en cada una de estas fases es diferente y requiere de diferentes herramientas. Por ejemplo, en las primeras etapas del proyecto es esencial la coordinación y colaboración entre las distintas partes involucradas, mientras que en la fase de ejecución el objetivo principal se centra en el control de costes, plazos, calidad y seguridad [34]. En la fase de mantenimiento es fundamental el control de diversos factores como la calidad del aire, el rendimiento energético o el propio mantenimiento del edificio, entre otros. Sin embargo, todas estas fases comparten la necesidad de un adecuado proceso de adquisición de datos así como técnicas que permitan gestionar dichos datos adecuadamente. En este sentido, la diversidad de sensores existentes así como la comunicación entre éstos son los que facilitan la captura de datos mientras que las diferentes técnicas de inteligencia artificial son las que posibilitan extraer información a partir de éstos para gestionar los datos y poder dar un soporte inteligente.

Este aspecto se ha visto potenciado por el paradigma conocido como Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) el cual describe un sistema de dispositivos de computación interrelacionados e identificados unívocamente que tienen la capacidad de transferir datos a través de una red, sin requerir de interacciones humanas [17]. Recientemente, este paradigma está siendo considerado por los investigadores en el ámbito de la construcción, en especial, en la fase de ejecución y mantenimiento mediante la sensorización de espacios físicos [39]. Internet de las Cosas aporta, entre otros aspectos, destacables beneficios en el ciclo de vida de la construcción, distinguiendo entre otros la reducción de costes, un incremento de la seguridad durante la ejecución de las obras, diseños más inteligentes y conocimiento sobre el entorno en tiempo real [23].

Por consiguiente, la integración de tecnologías de captura de datos en fases del ciclo de vida de un proyecto de construcción con Internet de las Cosas plantea un reto interesante que puede proporcionar importantes beneficios para la toma de decisiones y gestión de las fases del ciclo de vida de un proyecto de construcción en tiempo real. Estos aspectos han motivado el presente trabajo, el cual radica en realizar un estudio preliminar de las propuestas existentes en la literatura sobre Internet de las Cosas en relación al uso de sensores para facilitar el seguimiento y toma de decisiones en las distintas fases del ciclo de vida de un proyecto de construcción, en concreto en la fase de ejecución y mantenimiento.

El trabajo se estructura como se detalla a continuación. En la sección 2 se presentan, de modo general, las distintas fases del ciclo de vida de un proyecto de construcción junto con las posibles necesidades tecnológicas de cada fase. En la sección 3 se presentan las tecnologías potenciales, desde el punto de vista de Internet de las Cosas mientras que en la sección 4 se realiza un análisis de aquellos trabajos más relevantes existentes en la literatura que integran dichas tecnologías aplicadas a las distintas fases. Finalmente, en la sección 5 se reflejan las principales conclusiones y futuros trabajos.

2 Fases del ciclo de vida en el ámbito de la construcción

La aparición de nuevos paradigmas en el sector de la construcción puede proporcionar ventajas importantes para diferentes tareas importantes en el ciclo de vida de los proyectos de construcción. En concreto, nos centraremos en la fase de ejecución y manten-

imiento, que son las que pueden obtener más beneficios de estas tecnologías. Por tanto, en esta sección, se analizan y detallan las diversas tareas para, posteriormente, analizar las tecnologías que se emplean en la actualidad para integrar y gestionar los datos en tiempo real.

1. **Fase de ejecución.** Durante la ejecución de los proyectos son de interés las siguientes tareas:
 - Monitorización de recursos y materiales. La monitorización y el seguimiento de los equipos y materiales puede aportar importantes beneficios para la ejecución del proceso, consiguiendo una reducción en los plazos así como en los costes de la obra [37].
 - Comunicación y colaboración. La gestión durante el proceso de construcción podría mejorarse utilizando la comunicación en tiempo real y la colaboración con dispositivos que integren tecnologías BIM e IoT [12].
 - Rendimiento del proceso de construcción y monitorización del progreso. Este aspecto puede aprovechar estas tecnologías en varios sentidos. En primer lugar, para conocer el estado actual del proceso de construcción en tiempo real. Por otro lado, para sincronizar la planificación de la obra en base a la monitorización del proceso [33].
 - Gestión de la Seguridad y Salud. Esta tarea es fundamental en las obras de construcción ya que la accidentalidad en este sector es muy elevado en comparación al de otros sectores. En este sentido, el uso de tecnologías que permitan monitorizar o detectar posibles riesgos en tiempo real puede resultar de mucho interés para evitar o reducir el número de accidentes [29].
2. **Fase de Mantenimiento.** En la fase de mantenimiento del edificio resultan interesantes las siguientes tareas:
 - Gestión de la ocupación de espacios. La monitorización y control en tiempo real de los espacios de un edificio puede resultar útil en varios sentidos. Por ejemplo, para adaptar las condiciones climáticas del espacio tales como ventilación, calefacción o refrigeración [18].
 - Mantenimiento. Permite el acceso a datos en tiempo real del comportamiento del edificio y la verificación de la mantenibilidad [16].
 - Gestión de la energía. Permite controlar el consumo de energía en tiempo real así como adaptarlo a las necesidades y características reales de cada edificio en cada momento del día. Gracias a este control se pueden disminuir los costes, disminuir el consumo de energía o crear valor con la información en tiempo real [35].
 - Respuesta a desastres y emergencias. Conocer cualquier alteración en las condiciones normales del edificio puede resultar de interés para detectar cualquier situación de emergencia, como por ejemplo, incendios, accidentes, etc. Además, puede ayudar a la hora de gestionar la evacuación mediante alternativas flexibles y adaptadas a la situación del edificio en el momento del incidente [10].

Una vez detalladas las tareas fundamentales que pueden beneficiarse de estas tecnologías, la siguiente sección detalla las principales tecnologías utilizadas y reflejadas en la literatura.

3 Tecnologías para la adquisición de datos y toma de decisiones inteligente en el ciclo de vida de proyectos de construcción

En esta sección se detallan, algunas de las tecnologías que se han identificado en la literatura como relevantes para la adquisición de datos durante el ciclo de vida de un proyecto de construcción y partícipes en sistemas IoT.

Por un lado, toda propuesta basada en el paradigma de Internet de las Cosas requiere de una infraestructura que proporcione soporte al sistema de dispositivos de computación interrelacionados. Para ello, éstos tienen que tener la capacidad de transferir datos de manera automática e identificarse de forma unívoca. La Figura 1 ilustra, de manera general, un esquema común de infraestructura base con los distintos elementos que forman parte de ésta. En el nivel inferior se encuentran los sensores, como elementos de captación de datos y medición de condiciones físicas. En el nivel intermedio se encuentran los elementos de transmisión, en este caso redes e internet y en el nivel superior, elementos de cómputo.

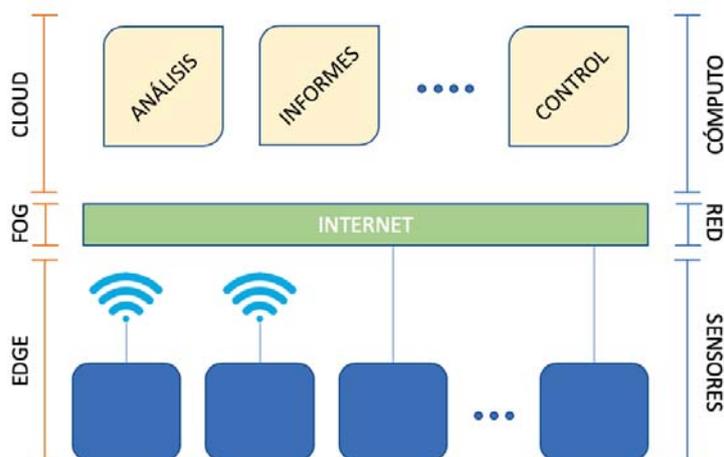


Fig. 1. Arquitectura IoT

Esta infraestructura permite ubicuidad de los dispositivos y/o elementos que la forman. En general, para gestionar la comunicación entre los elementos de la red, se suele hacer uso de protocolos de comunicación. Ejemplo de protocolo, por sus características de seguridad y interoperabilidad y generalidad es el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [13], el cuál simplifica las tareas de envío/recepción de mensajes, asegurando ambos mediante unas métricas de QoS (calidad de servicio). Los principales actores involucrados en la comunicación son los siguientes:

- Broker: Servicio encargado de recibir y redirigir los mensajes a los demás actores involucrados.

- Publicador: Servicio cliente que envía mensajes a un topic.
- Subscriptor: Servicio cliente que recibe mensajes de uno o varios topics.

La Figura 2 ilustra un esquema de comunicación del protocolo MQTT.

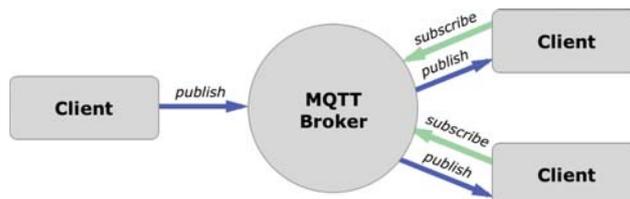


Fig. 2. Comunicación en el protocolo MQTT

En este sentido, y considerando la infraestructura IoT como base, podemos considerar como tecnologías de captación de datos: sensores, RFID y GPS. Los sensores pueden medir las condiciones físicas del mundo, como la posición, la ocupación, la aceleración, la velocidad, el movimiento, la temperatura, etc. Como se detallará a continuación, se han aplicado ampliamente para monitorear parámetros que incluyen el estado ambiental, el comportamiento de los ocupantes y el uso de energía en el interior de los edificios [22]. Mientras que la Identificación por Radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés) puede, mediante campos electromagnéticos, identificar y rastrear automáticamente las etiquetas adheridas a los objetos. Finalmente, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) permite determinar la posición de personas u objetos con gran precisión.

4 Análisis de tecnologías utilizadas en el ciclo de vida de la construcción

En esta sección se detallan algunas de las propuestas encontradas en la literatura dentro del marco del objetivo de este trabajo y se exploran las tecnologías más utilizadas. También, se detallan las fases del ciclo de vida, en concreto ejecución y mantenimiento, así como el objetivo específico para el que han sido diseñadas (gestión de la seguridad y salud, control, seguimiento del proceso o equipos/materiales).

Respecto a las tecnologías más utilizadas, dentro de los elementos de un sistema IoT, se consideran principalmente aquellas basadas en comunicación inalámbrica e internet así como distintos sensores, identificación por radio frecuencia (RFID) o sistemas de posicionamiento global (GPS). Los sensores se pueden aplicar por ejemplo para monitorear parámetros como el estado ambiental, el comportamiento de los ocupantes y el uso de energía en el interior de los edificios. La tecnología RFID se puede utilizar durante la fase de ejecución del edificio para tareas de seguimiento de material y para la gestión de la seguridad y salud, por ejemplo. Mientras que el GPS se puede utilizar para la localización de materiales y personas en tiempo real.

La Tabla 1 organiza varias propuestas de autores según lo indicado anteriormente, en primer lugar, se distinguen las tecnologías (sensores, RFID y GPS) y, en segundo lugar, se distingue si el objetivo de la propuesta se centra en la fase de ejecución o de mantenimiento. Dentro de la fase de ejecución, se han identificado tres actividades importantes en la gestión de los proyectos: seguimiento de materiales, control y gestión de la seguridad y salud. Tal y como se puede observar en la Tabla, la tecnología más utilizada es la de RFID, aunque la utilización de sensores está ganando mayor aceptación en los últimos años. En relación a las fases de la obra, la mayoría de las propuestas se centran en la fase de ejecución y, en concreto, para facilitar y mejorar la gestión de la seguridad durante el proceso de ejecución. Dentro de esta tarea, que es muy relevante en el sector de la construcción debido al alto índice de accidentalidad, las propuestas se centran principalmente en la identificación de riesgos y en alertar a los trabajadores para evitar los accidentes [8, 6, 36, 23]. De manera similar, el control de algunas actividades importantes como la planificación [9] o el estado de las estructuras de hormigón [16] han llamado la atención de la comunidad investigadora. En la fase de mantenimiento, las propuestas se centran en la gestión de la eficiencia energética [35], planificación en situaciones de emergencias [10] and estimación de ocupación para adaptar las condiciones climáticas [18].

Como se puede observar en la Tabla 1, las propuestas dedicadas a la gestión de la seguridad utilizan principalmente la tecnología de RFID, mientras que las propuesta centradas en la fase de mantenimiento hacen uso de sensores (temperatura, luz, humedad, etc). Todas las propuestas presentan tendencias del uso de estas tecnologías en las fases de los proyectos de construcción que, en conjunto con el despliegue bajo infraestructura IOT, plantean resultados prometedores.

5 Conclusiones

El ciclo de vida del edificio incluye la identificación de requisitos, la planificación del proyecto, el diseño y la ingeniería, la construcción, las operaciones y el mantenimiento y la demolición. Aunque la industria de la construcción siempre ha tenido un carácter muy tradicional en el que intervienen muchas empresas pequeñas y en el que la tecnología no ha estado muy presente, hoy en día nuevos enfoques como el de Internet de las Cosas están jugando un papel fundamental para mejorar el proceso de toma de decisiones. Sin embargo, se han encontrado algunas limitaciones. Por ejemplo, durante la fase de construcción la mayoría de las propuestas proponen un marco de trabajo específico y en ocasiones realizado con prototipos o escenarios. En este sentido, es necesario desarrollar propuestas en proyectos reales para explorar la escalabilidad y confiabilidad de éstas [26].

Además, cuestiones como el engorroso diseño del proceso, la conversión manual de datos, la confiabilidad de los datos recopilados por el sensor para el cálculo de mecanismos aún deben ser simplificados y abordados [33]. No obstante, algunos estudios de investigación han tenido éxito en caso de uso específico, como por ejemplo, la visualización, el funcionamiento de la grúa, el seguimiento de la ubicación y la advertencia de riesgo [45].

Table 1. Propuestas según tecnologías y fases del ciclo de vida de los proyectos

	Tecnologías		Fases			Mantenimiento
	Sensores	RFID GPS	Seguimiento	Ejecución materiales Control	Seguridad	
[20]		x		x		
[19]	x					x
[40]		x			x	
[8]		x			x	
[45]		x			x	
[47]				x		
[37]		x	x			
[9]		x		x		
[46]		x			x	
[5]		x			x	
[31]		x			x	
[25]		x			x	
[41]			x		x	
[16]	x			x		
[21]						x
[35]			x			x
[36]		x			x	
[14]		x	x	x	x	
[44]			x		x	
[18]	x					x
[27]	x				x	
[43]	x				x	
[23]		x			x	
[29]				x		
[3]	x				x	
[4]	x				x	
[28]		x		x		
[15]		x			x	
[10]			x			x

References

1. Ahuja, V., Yang, J., Shankar, R.: Benefits of collaborative ict adoption for building project management. *Construction Innovation* **9**(3), 323–340 (2009)
2. Ansah, R.H., Sorooshian, S., Mustafa, S.B.: Lean construction: an effective approach for project management. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* **11**(3), 1607–1612 (2016)
3. Antwi-Afari, M.F., Li, H.: Fall risk assessment of construction workers based on biomechanical gait stability parameters using wearable insole pressure system. *Advanced Engineering Informatics* **38**, 683 – 694 (2018)
4. Awolusi, I., Marks, E., Hallowell, M.: Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices. *Automation in Construction* **85**, 96 – 106 (2018)

5. Barro-Torres, S., Fernández-Caramés, T.M., Pérez-Iglesias, H.J., Escudero, C.J.: Real-time personal protective equipment monitoring system. *Computer Communications* **36**(1), 42 – 50 (2012)
6. Carbonari, A., Giretti, A., Naticchia, B.: A proactive system for real-time safety management in construction sites. *Automation in Construction* **20**(6), 686 – 698 (2011), selected papers from the 26th ISARC 2009
7. Cárcel-Carrasco, F.J., Peñalvo-López, E.: El uso de las tic para la formación en smart meters a los jefes de obra de edificación. un proyecto europeo. In: libro de resúmenes del 1er congreso internacional online del uso de las tic en la sociedad, la educación y la empresa. vol. 5, p. 43. *3Ciencias* (2016)
8. Chae, S., Yoshida, T.: Application of rfid technology to prevention of collision accident with heavy equipment. *Automation in Construction* **19**(3), 368 – 374 (2010), 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction
9. Cheng, M.Y., Chen, J.C.: Integrating barcode and gis for monitoring construction progress. *Automation in Construction* **11**(1), 23 – 33 (2002)
10. Chou, J.S., Cheng, M.Y., Hsieh, Y.M., Yang, I.T., Hsu, H.T.: Optimal path planning in real time for dynamic building fire rescue operations using wireless sensors and visual guidance. *Automation in Construction* **99**, 1 – 17 (2019)
11. Chung, J.K., Kumaraswamy, M.M., Palaneeswaran, E.: Improving megaproject briefing through enhanced collaboration with ict. *Automation in construction* **18**(7), 966–974 (2009)
12. Dave, B., Buda, A., Nurminen, A., Främbling, K.: A framework for integrating bim and iot through open standards. *Automation in Construction* **95**, 35–45 (2018)
13. Dizdarević, J., Carpio, F., Jukan, A., Masip-Bruin, X.: A survey of communication protocols for internet of things and related challenges of fog and cloud computing integration. *ACM Computing Surveys (CSUR)* **51**(6), 116 (2019)
14. Fang, Y., Cho, Y.K., Zhang, S., Perez, E.: Case study of bim and cloud-enabled real-time rfid indoor localization for construction management applications. *Journal of Construction Engineering and Management* **142**(7), 05016003 (2016)
15. de Gabriel, J.M.G., Fernández-Madrugal, J.A., López-Arquillos, A., Rubio-Romero, J.C.: Monitoring harness use in construction with ble beacons. *Measurement* **131**, 329 – 340 (2019)
16. Ham, S., Popovics, J.S.: Application of contactless ultrasound toward automated inspection of concrete structures. *Automation in Construction* **58**, 155 – 164 (2015)
17. Hassan, Q.: *Internet of Things A to Z: Technologies and Applications*. Wiley (2018)
18. Huang, Q., Mao, C.: Occupancy estimation in smart building using hybrid co2/light wireless sensor network. *Journal of Applied Sciences and Arts* **1**(2), 5 (2017)
19. Jang, W.S., Healy, W.M., Skibniewski, M.J.: Wireless sensor networks as part of a web-based building environmental monitoring system. *Automation in Construction* **17**(6), 729 – 736 (2008)
20. Jaselskis, E.J., El-Misalami, T.: Implementing radio frequency identification in the construction process. *Journal of Construction Engineering and Management* **129**(6), 680–688 (2003)
21. Jia, M., Srinivasan, R.S.: Occupant behavior modeling for smart buildings: A critical review of data acquisition technologies and modeling methodologies. In: 2015 Winter Simulation Conference (WSC). pp. 3345–3355 (Dec 2015)
22. Jia, M., Srinivasan, R.S.: Occupant behavior modeling for smart buildings: A critical review of data acquisition technologies and modeling methodologies. In: Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference. pp. 3345–3355. IEEE Press (2015)
23. Kanan, R., Elhassan, O., Bensalem, R.: An iot-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. *Automation in Construction* **88**, 73 – 86 (2018)

24. Kasim, N.: Ict implementation for materials management in construction projects: case studies. *Journal of Construction Engineering and Project Management* **1**(1), 31–36 (2011)
25. Kelm, A., Laußat, L., Meins-Becker, A., Platz, D., Khazaei, M.J., Costin, A.M., Helmus, M., Teizer, J.: Mobile passive radio frequency identification (rfid) portal for automated and rapid control of personal protective equipment (ppe) on construction sites. *Automation in Construction* **36**, 38 – 52 (2013)
26. Kim, K., Cho, Y., Zhang, S.: Integrating work sequences and temporary structures into safety planning: Automated scaffolding-related safety hazard identification and prevention in bim. *Automation in Construction* **70**, 128 – 142 (2016)
27. Lee, W., Lin, K.Y., Seto, E., Migliaccio, G.C.: Wearable sensors for monitoring on-duty and off-duty worker physiological status and activities in construction. *Automation in Construction* **83**, 341 – 353 (2017)
28. Li, C.Z., Xue, F., Li, X., Hong, J., Shen, G.Q.: An internet of things-enabled bim platform for on-site assembly services in prefabricated construction. *Automation in Construction* **89**, 146 – 161 (2018)
29. Louis, J., Dunston, P.S.: Integrating iot into operational workflows for real-time and automated decision-making in repetitive construction operations. *Automation in Construction* **94**, 317 – 327 (2018)
30. Lu, Y., Li, Y., Skibniewski, M., Wu, Z., Wang, R., Le, Y.: Information and communication technology applications in architecture, engineering, and construction organizations: A 15-year review. *Journal of Management in Engineering* **31**(1) (2014)
31. Marks, E.D., Teizer, J.: Method for testing proximity detection and alert technology for safe construction equipment operation. *Construction Management and Economics* **31**(6), 636–646 (2013)
32. Martínez-Rojas, M., Marín, N., Vila, M.A.: The role of information technologies to address data handling in construction project management. *Journal of Computing in Civil Engineering* **30**(4), 04015064 (2016)
33. Matthews, J., Love, P.E., Heinemann, S., Chandler, R., Rumsey, C., Olatunji, O.: Real time progress management: Re-engineering processes for cloud-based bim in construction. *Automation in Construction* **58**, 38 – 47 (2015)
34. M.Martínez-Rojas, N.Marín, C.Molina, M.Vila: Cost analysis in construction projects using fuzzy overlap cubes. In: 2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). pp. 1–8 (Aug 2015). <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2015.7338048>
35. Pan, J., Jain, R., Paul, S., Vu, T., Saifullah, A., Sha, M.: An internet of things framework for smart energy in buildings: designs, prototype, and experiments. *IEEE Internet of Things Journal* **2**(6), 527–537 (2015)
36. Park, J., Marks, E., Cho, Y.K., Suryanto, W.: Performance test of wireless technologies for personnel and equipment proximity sensing in work zones. *Journal of Construction Engineering and Management* **142**(1) (2016)
37. Sardroud, J.M.: Influence of rfid technology on automated management of construction materials and components. *Scientia Iranica* **19**(3), 381 – 392 (2012)
38. Shokri, S., Ahn, S., Lee, S., Haas, C.T., Haas, R.C.G.: Current status of interface management in construction: Drivers and effects of systematic interface management. *Journal of Construction Engineering and Management* **142**(2), 04015070 (2016). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001035](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001035)
39. Solanki, A., Nayyar, A.: Green Building Management and Smart Automation. *Advances in Civil and Industrial Engineering*, IGI Global (2019)
40. Teizer, J., Allread, B.S., Fullerton, C.E., Hinze, J.: Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system. *Automation in Construction* **19**(5), 630 – 640 (2010), *building Information Modeling and Collaborative Working Environments*

41. Teizer, J., Cheng, T.: Proximity hazard indicator for workers-on-foot near miss interactions with construction equipment and geo-referenced hazard areas. *Automation in Construction* **60**, 58 – 73 (2015)
42. Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., Gambao, E.: Extending automation of building construction — survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in Construction* **36**, 168 – 178 (2013)
43. Valero, E., Sivanathan, A., Bosché, F., Abdel-Wahab, M.: Analysis of construction trade worker body motions using a wearable and wireless motion sensor network. *Automation in Construction* **83**, 48 – 55 (2017)
44. Wang, J., Razavi, S.N.: Low false alarm rate model for unsafe-proximity detection in construction. *Journal of Computing in Civil Engineering* **30**(2), 04015005 (2016)
45. Wu, W., Yang, H., Chew, D.A., Hua Yang, S., Gibb, A.G., Li, Q.: Towards an autonomous real-time tracking system of near-miss accidents on construction sites. *Automation in Construction* **19**(2), 134 – 141 (2010)
46. Yang, H., Chew, D.A., Wu, W., Zhou, Z., Li, Q.: Design and implementation of an identification system in construction site safety for proactive accident prevention. *Accident Analysis & Prevention* **48**, 193 – 203 (2012), intelligent Speed Adaptation + Construction Projects
47. Yang, J., Cheng, T., Teizer, J., Vela, P., Shi, Z.: A performance evaluation of vision and radio frequency tracking methods for interacting workforce. *Advanced Engineering Informatics* **25**(4), 736 – 747 (2011), special Section: Advances and Challenges in Computing in Civil and Building Engineering