

## Evaluación del tiempo crítico para realizar acciones preventivas en el Servicio de Urgencias Hospitalarias

Mercedes Planas<sup>1</sup> , Eva Bruballa<sup>1</sup> , Emilio Luque<sup>2</sup> , Dolores Rexachs<sup>2</sup> ,  
Francisco Epelde<sup>3</sup>  y Armando De Giusti<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> Escoles Universitàries Gimbernat (EUG), Computer Science School, Universitat Autònoma de Barcelona, Sant Cugat del Vallès, Barcelona 08174, Spain

{[merce.planas@eug.es](mailto:merce.planas@eug.es), [eva.bruballa@eug.es](mailto:eva.bruballa@eug.es)}

<sup>2</sup> Department of Computer Architecture and Operating Systems, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, Barcelona 08193, Spain

{[emilio.luque@uab.cat](mailto:emilio.luque@uab.cat), [dolores.rexachs@uab.cat](mailto:dolores.rexachs@uab.cat)}

<sup>3</sup> Consultant Internal Medicine, University Hospital Parc Tauli, Universitat Autònoma de Barcelona, Sadadell, Barcelona 08208, Spain

{[fepelde@tauli.cat](mailto:fepelde@tauli.cat)}

<sup>4</sup> Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI), Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata, La Plata (CP 1900), Buenos Aires, Argentina

{ [adegiusti@lidi.info.unlp.edu.ar](mailto:adegiusti@lidi.info.unlp.edu.ar) }

**Abstract.** Los Servicios de Urgencias Hospitalarias (SUH) son esenciales para el sistema sanitario. Sin embargo, enfrentan problemas como la saturación del servicio y la gestión ineficiente del personal y los recursos. Abordar estos desafíos requiere enfoques integrales que abarquen desde mejoras en los recursos hasta cambios en las prácticas de gestión.

Nuestra investigación explora la aplicación de un Gemelo Digital (GD) en la gestión de un SUH, que simula sus operaciones para anticipar su comportamiento. El SUH mantendrá su funcionamiento normal, y el GD, que opera a mayor velocidad, permitirá anticipar escenarios futuros y prevenir problemas potenciales, como cuellos de botella, interrupciones y limitaciones de recursos.

El estudio presentado en este artículo se enfoca en cuantificar el tiempo disponible para intervenir antes de que las interrupciones se manifiesten en el SUH real. Este plazo es crucial para implementar acciones correctivas y prevenir interrupciones del servicio.

**Keywords:** Gemelo digital, Simulación, Servicio de Urgencias Hospitalarias, Prevención, Optimización, Toma de Decisiones.

### 1 Introducción

Si bien la disciplina de los Gemelos Digitales (GD) es relativamente nueva, su potencial es innegable. A pesar de la falta de un marco teórico completamente desarrollado y de una definición universalmente aceptada [1], podemos esbozar una conceptualización clara: Un GD es una réplica virtual dinámica e interactiva de un objeto, proceso o sistema físico. Esta réplica virtual, tiene la capacidad de reproducir el comportamiento de

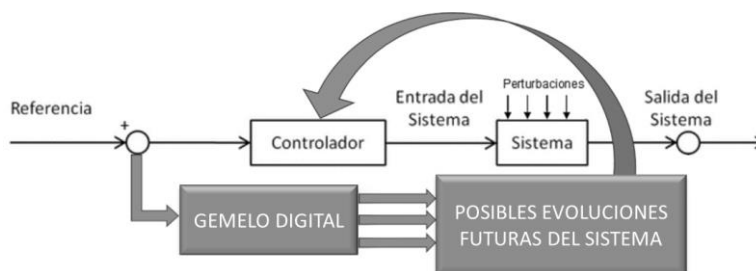
su homólogo físico ("gemelo físico" o "GF") en un entorno simulado, con el objetivo principal de monitorizar y analizar su comportamiento en diferentes escenarios para mejorar su rendimiento y eficiencia.

Aunque la definición de GD puede variar según el autor, todos coinciden en el objetivo que debe tener un GD: mejorar el uso de recursos del GF y prever situaciones futuras para poder actuar anticipadamente, evitando o minimizando situaciones críticas.

En la era de la digitalización, el concepto de GD emerge como una herramienta innovadora para optimizar el control y la gestión de organizaciones complejas [2]. Estos sistemas automatizan el proceso de toma de decisiones basándose en los datos recopilados, reduciendo así la necesidad de intervención humana. Los GD representan un nuevo paradigma en la toma de decisiones, permitiendo una transición de la reactividad a la proactividad en la gestión de sistemas complejos.

Nuestra investigación se centra en la aplicación de un GD para mejorar la gestión de un Servicio de Urgencias Hospitalarias (SUH). La gestión de un SUH funciona de manera similar a un sistema de control de lazo cerrado tradicional: cuando se detectan salidas no deseadas, el gestor o administrador del servicio debe tomar decisiones y actuar para solucionar el problema. No obstante, en lugar de reaccionar a los problemas a medida que surgen, se propone realizar el control mediante un GD (Fig.1). Este enfoque permitirá anticipar y prevenir situaciones críticas, mejorando así la eficiencia del SUH y optimizando la toma de decisiones.

El GD permite una supervisión continua, lo que facilita la detección temprana de posibles fallos o ineficiencias antes de que se conviertan en problemas graves. La simulación es el núcleo de un GD [3]. Para prever situaciones futuras y evaluar las acciones a tomar, es necesario reproducir diversos escenarios. Asimismo, para anticiparse al comportamiento del GF antes de que ocurra una situación crítica, será fundamental realizar múltiples simulaciones.



**Fig. 1.** Control con Gemelo Digital. Adaptación de Lazo\_de\_control\_realimentado de [Jejosadap, CC BY-SA 4.0.](#)

En este artículo nos enfocamos en la identificación de la ventana de intervención, que corresponde al tiempo que transcurre desde que surge un problema hasta que se refleja en el sistema real. Determinar esta ventana es crucial, ya que permitirá conocer el margen disponible para intervenir antes de que el problema impacte en el funcionamiento del SUH, posibilitando así acciones preventivas más efectivas.

La estructura del artículo es la siguiente: en el apartado 2 se presenta el objetivo de la investigación y el marco en el que se desarrolla este artículo. En el apartado 3 se revisa la literatura sobre los GD en el ámbito sanitario. El apartado 4 expone el estudio realizado para este artículo y, por último, el apartado 5 presenta las conclusiones y las líneas de investigación abiertas.

## 2 Servicio de Urgencias Hospitalarias

Un Servicio de Urgencias Hospitalarias es una unidad médica enfocada en la prestación de atención inmediata. Este servicio está diseñado para operar continuamente, las 24 horas del día, los 7 días de la semana, actuando como el principal punto de acceso para individuos que requieren atención médica de urgencia en un entorno hospitalario.

Dada su naturaleza, el SUH representa una de las unidades más críticas dentro de la estructura de un hospital, ya que en su funcionamiento intervienen múltiples elementos que interactúan de manera dinámica. Además, su eficiencia y calidad de servicio (QoS) tiene una gran influencia en el rendimiento general de todo el sistema sanitario.

La problemática inherente a los SUH es compleja y abarca diferentes áreas, desde la sobrecarga o congestión del servicio hasta la gestión ineficiente de recursos y la escasez de personal. Estos desafíos no solo afectan la capacidad operativa de los SUH, sino que también impactan en la calidad de la atención médica proporcionada y en la satisfacción de los pacientes. Para abordar estos problemas de manera efectiva, es necesario adoptar enfoques integrales que pueden implicar desde mejoras en los recursos a cambios en las prácticas de gestión existentes.

El objetivo de la investigación es mejorar la gestión de un SUH mediante un GD que simula sus operaciones para anticipar su comportamiento (como muestra la Fig. 2).

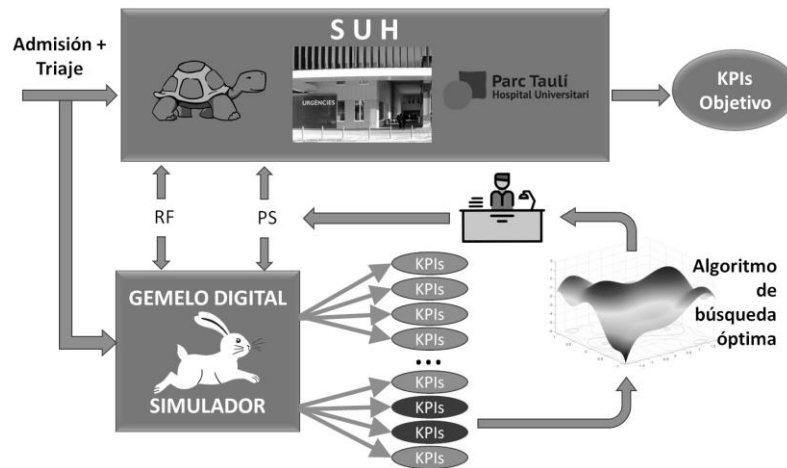
El GD empleado es el simulador desarrollado por el grupo de investigación High Performance Computing For Efficient Applications and Simulation (HPC4EAS). Este simulador utiliza la técnica de modelado y simulación basada en agentes, lo que le permite replicar el funcionamiento de un SUH real [4], facilitando la predicción de su comportamiento.

Se deben tener en cuenta las entradas y salidas que estarán involucradas en el sistema final. El SUH tienen una serie de parámetros de entrada que serán significativos:

- Entrada de pacientes, clasificados según el Sistema Español de Triaje [5].
- Recursos físicos (RF): número de camas, laboratorios, unidades de imagen ...
- Personal sanitario (PS): doctores/as, enfermeros/as ...

Las salidas asociadas al comportamiento del sistema de interés serán los diferentes indicadores de rendimiento o KPIs (Key Performance Indicators) [6]. Sus valores permitirán valorar el efecto de las medidas propuestas para la mejora de la QoS.

- Relacionados con el paciente y la calidad: Length of Stay (LoS), Length of Wait (LoW) ...
- Significativos para la Gestión: Ocupación de doctores/as, de enfermeros/as, de laboratorios, de unidades de imagen ...



**Fig. 2.** Control del Servicio de Urgencias Hospitalarias con Gemelo Digital.

El SUH recibe una cantidad de pacientes de entrada clasificados según su nivel de triaje y funciona con normalidad, con el objetivo de mantener un funcionamiento que cumpla los KPIs objetivo.

El GD estará configurado con la combinación de valores para PS y RF iguales a las características del SUH, y recibirá la misma entrada de pacientes. El GD, que funciona a mayor velocidad que el SUH, permite lanzar muchos y diferentes escenarios mirando hacia el futuro. Se necesitarán una gran cantidad de simulaciones con diferentes semillas para analizar todas las posibilidades y detectar si se puede producir alguna situación problemática.

Ante una situación problemática, se realizará una búsqueda de la mejor solución, para ayudar en la gestión y mejorar la toma de decisiones. Debido a la interacción entre los diferentes parámetros del sistema final [7], la búsqueda será un problema complejo, ya que se tendrá que realizar en un espacio  $N$  dimensional, donde cada dimensión será uno de los parámetros tratados y cada punto del espacio será una posible solución.

### 3 Estado del arte

Las soluciones basadas en GD están revolucionando industrias como la manufacturera, optimizando procesos y reduciendo costes. De forma similar, están generando un gran interés en el sector sanitario, ante la necesidad de mejorar la eficiencia y calidad de la atención [8].

Los GD pueden aplicarse en múltiples ámbitos del sistema sanitario, como el pronóstico de productos y equipos, la medicina personalizada, la predicción de enfermedades, la simulación de tratamientos y la mejora de las operaciones hospitalarias, optimizando procesos y la gestión de recursos.

La aplicación en el pronóstico de productos y equipos incluye cualquier dispositivo médico, desde un implante a un equipo de imagen. Los GD permiten simular su

funcionamiento, predecir fallos y optimizar su mantenimiento [9]. En el caso de los dispositivos inteligentes de monitorización, los datos recopilados contribuyen significativamente a la prestación de atención médica [10].

Las aplicaciones que se centran en la mejora de la salud de pacientes incluyen la simulación y personalización de tratamientos médicos [11], la predicción de enfermedades y la investigación y desarrollo farmacéutico. Existen proyectos para digitalizar órganos específicos como el hígado [12] y el corazón [13],[14], el modelo Living Heart [13] se está utilizando en todo el mundo para crear nuevas formas de diseñar y probar nuevos dispositivos y tratamientos farmacológicos. La digitalización completa del cuerpo humano todavía tiene un largo camino que recorrer [15],[16].

La aplicación de GD en áreas específicas del hospital, como las áreas quirúrgicas [17],[18], los laboratorios, ensayos y otras instalaciones, así como los centros hospitalarios en general [19],[20], contribuyen a una gestión más eficiente de los recursos, mejorando la planificación, los flujos de trabajo y la prestación de servicios [8].

El GD del área de radiología creado por el Hospital Privado Mater de Dublín y Siemens Healthineers demostró el potencial de los GD para reducir significativamente los tiempos de espera de los pacientes y los costos asociados con las horas extras del personal, evidenciando así el impacto positivo que puede tener esta tecnología en la gestión hospitalaria y en la experiencia del paciente [21].

Existe un gran potencial para mejorar la operativa de las instalaciones sanitarias sin incrementar los recursos. Al optimizar la asignación de recursos y rediseñar las rutas de los pacientes, los hospitales pueden ofrecer servicios de salud más eficientes y centrados en el paciente [19],[22].

Nuestra investigación se centra en el uso de GD en la gestión de un sistema de urgencias hospitalarias, marcando un camino hacia la optimización de los procesos asistenciales y la mejora de la eficiencia operativa.

#### 4 Identificación y cuantificación de la ventana de intervención

Este artículo se centra en determinar cuánto tiempo se tiene disponible para actuar en el sistema real y tomar las medidas correctivas oportunas ante una situación problemática (ventana de intervención).

Con el objetivo de identificar el tiempo que tarda en reflejarse una situación anómala en el sistema real, el GD simulará un día en dicho sistema, monitorizando los indicadores (KPI) a lo largo del tiempo para establecer el período en el que se pueden hacer correcciones. Como punto de partida para nuestro análisis, se ha seleccionado el indicador LoS (Length of Stay), un parámetro fundamental en la gestión de servicios de urgencias que permite evaluar tanto la eficiencia operativa como la calidad asistencial.

La simulación se realizará para diferentes escenarios de entrada de pacientes, introduciendo perturbaciones en la entrada para observar en qué momento se produce un cambio que derive en una situación anómala. Los escenarios de entrada incluyen:

- **Entrada estándar de pacientes:** conjunto de datos obtenidos de los históricos del Hospital Taulí de Sabadell (Fig. 3). Los resultados proporcionan una referencia o salida estándar, que sirve de base para comparar con los resultados de las simulaciones con perturbaciones, permitiendo así evaluar su impacto.

- **Carga fija:** aumento elevado en la entrada de pacientes durante todas las horas del día (simulando una epidemia de gripe) (Fig. 4).
- **Carga puntual:** llegada de pacientes inesperada en momentos determinados del día (simulando un accidente grave) (Fig. 5).

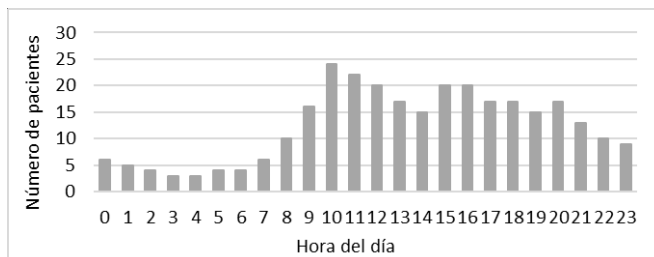


Fig. 3. Entrada estándar de pacientes.

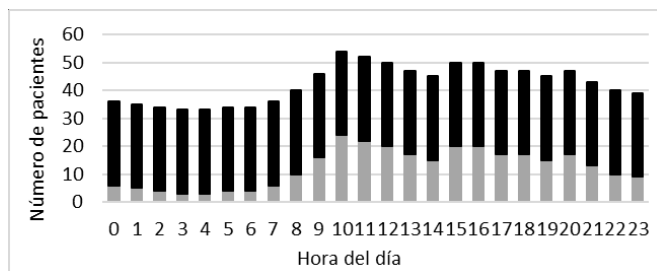


Fig. 4. Entrada de pacientes carga fija.

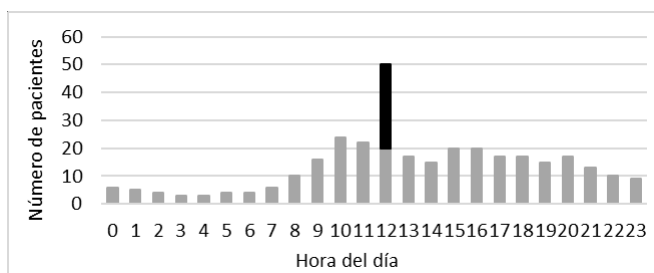


Fig. 5. Entrada de pacientes con una carga puntual: pico de pacientes a las 12h.

El teorema central del límite establece que, dada una muestra aleatoria suficientemente grande de una población, la distribución de las medias muestrales tenderá a seguir una distribución normal. Durante la experimentación se ha observado que, al

aumentar progresivamente el número de simulaciones, la distribución normal se manifiesta a partir de aproximadamente 100 simulaciones.

Los resultados se han calculado sobre los datos generados por estas 100 simulaciones para obtener un intervalo de confianza, representando la media del valor del indicador LoS de los diferentes tipos de pacientes generados por el simulador en cada hora correspondiente.

Los gráficos de las Fig. 6 a Fig. 9 presentan los resultados de la simulación del sistema real para varias entradas de pacientes con distintas perturbaciones. En cada gráfica se muestra como referencia la evolución de la media del indicador LoS por hora para una entrada de pacientes estándar (línea continua), comparada con la evolución de la media del LoS para una entrada con perturbación (línea discontinua). La línea vertical continua indica el momento de la perturbación, mientras que las líneas verticales discontinuas marcan los instantes en los que se hace evidente el efecto de la perturbación, estableciendo así la ventana de intervención.

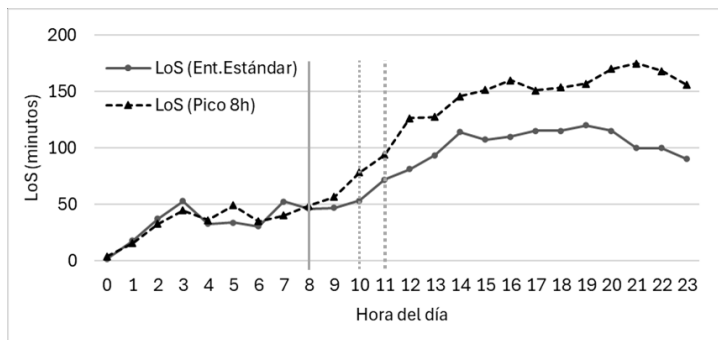


Fig. 6. Comparativa de los valores del indicador LoS obtenidos entre la simulación de datos estándar y la simulación con una carga puntual de pacientes a las 8h.

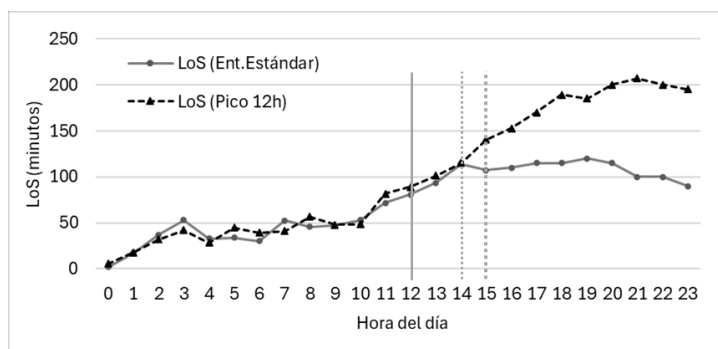
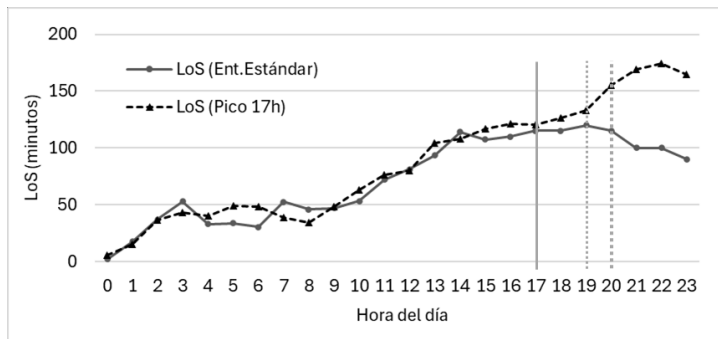
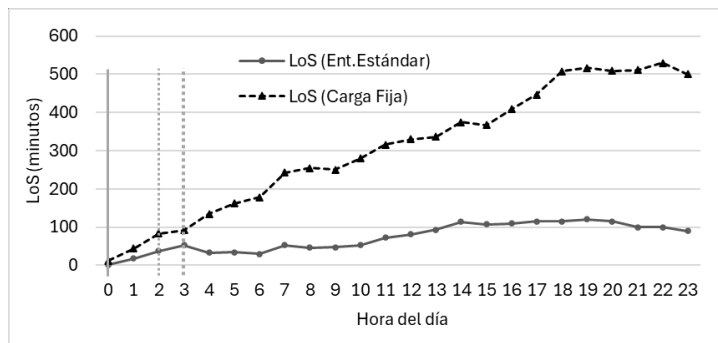


Fig. 7. Comparativa de los valores del indicador LoS obtenidos entre la simulación de datos estándar y la simulación con una carga puntual de pacientes a las 12h.



**Fig. 8.** Comparativa de los valores del indicador LoS obtenidos entre la simulación de datos estándar y la simulación con una carga puntual de pacientes a las 17h.



**Fig. 9.** Comparativa de los valores del indicador LoS obtenidos entre la simulación de datos estándar y la simulación con una carga fija de pacientes en todas las horas.

Es importante identificar el cambio en el indicador lo antes posible. Como se puede observar, este cambio en el indicador LoS se empieza a hacer evidente entre la segunda y la tercera hora después de producirse la perturbación. Este intervalo representa la ventana de oportunidad para poder intervenir y hacer correcciones necesarias, evitando así que se produzca la situación problemática (ventana de intervención). De este modo, podemos anticiparnos y prevenir la aparición de la situación problemática.

### 5 Conclusiones y líneas de investigación abiertas

Esta investigación explora la aplicación de Gemelos Digitales (GD) en los Servicios de Urgencias Hospitalarias (SUH). El objetivo central es utilizar las simulaciones de GD para gestionar de forma proactiva el flujo de pacientes y la asignación de recursos, mejorando así la calidad de la atención.



Los GD pueden emplearse para simular las operaciones del SUH en el mundo real y predecir posibles cuellos de botella o interrupciones del servicio.

Al simular diversos escenarios, los gestores de los SUH pueden desarrollar planes de contingencia para abordar aumentos repentinos de pacientes, escasez de personal y otros desafíos.

El artículo determina el tiempo que tardan las desviaciones de los patrones estándar de llegada de pacientes en manifestarse en el sistema real. Este marco de tiempo es crucial para implementar acciones correctivas y prevenir interrupciones del servicio en el SUH.

En esencia, los GD ofrecerán un enfoque prometedor para optimizar las operaciones del SUH y garantizar una atención oportuna a los pacientes.

Este trabajo es un primer paso hacia el objetivo final de mejorar la gestión de un SUH mediante un GD. En futuros trabajos se estudiará qué cambios deberían realizarse en la configuración de los parámetros del sistema real del SUH para poder corregir el sistema y evitar que se produzca la situación problemática. Para que la solución sea viable, será necesario tener en cuenta las limitaciones de los recursos disponibles en el sistema real. Además, se deberá identificar el momento adecuado para implementar los cambios y calcular el tiempo requerido para que surtan efecto, garantizando así la factibilidad de las correcciones.

**Agradecimientos.** A la Agencia Estatal de Investigación (AEI), Spain y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) UE bajo contrato PID2020-112496GB-I00.

## Referencias

1. Kuehner, K. J., Scheer, R., Strassburger, S.: Digital twin: finding common ground—a meta-review. *Procedia CIRP*, 104, 1227-1232 (2021)
2. Moyaux, T., Liu, Y., Bouleux, G., & Cheutet, V.: An agent-based architecture of the Digital Twin for an Emergency Department. *Sustainability*, 15(4), 3412 (2023)
3. Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., Dassisti, M.: Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Comput. Ind.* 2021, 130, 103469 (2021)
4. Taboada, M., Cabrera, E., Epelde, F., Iglesias-Lepine, M.L., Luque, E.: Sistema de ayuda a la toma de decisiones para servicios de urgencias hospitalarios diseñado mediante técnicas de modelado orientado a individuos. *Emergencias*, vol. 24, pp. 189–195, (2012)
5. Unidad de urgencias hospitalaria Estándares y recomendaciones, <https://www.sanidad.gob.es/areas/calidadAsistencial/excelenciaClinica/docs/UUH.pdf> (2011)
6. Welch, S.J., Asplin, B.R., Stone-Griffith, S., Davidson, S.J., Augustine, J., Schuur, J.: Emergency Department Benchmarking Alliance. Emergency department operational metrics, measures and definitions: results of the Second Performance Measures and Benchmarking Summit. *Ann Emerg Med.* 2011 Jul;58(1):33-40. doi: 10.1016/j.annemergmed.2010.08.040. Epub 2010 Nov 10. PMID: 21067846 (2011)
7. Liu, Z., Cabrera, E., Rexachs, D., Epelde, F., Luque, E.: Simulating the Micro-level Behavior of Emergency Department for Macro-level Features Prediction. 10.13140/RG.2.1.3018.1202 (2015)
8. Mohsen, A., Bilge G. C.: Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities, *Decision Analytics Journal*, Volume 6, 2023, 100165, ISSN 2772-6622, (2023)

9. El Saddik, A: Digital twins: The convergence of multimedia technologies. *IEEE multimedia*, 25(2), 87-92 (2018)
10. Javaid, S., Zeadally, S., Fahim, H., He, B.: Medical Sensors and Their Integration in Wireless Body Area Networks for Pervasive Healthcare Delivery: A Review. *IEEE Sens. J.* 2022, 22, 3860–3877 (2022)
11. Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., Wang, F., Liu, R., Pang, Z., Deen, M.J.: A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin. *IEEE Access* 2019, 7, 49088–49101 (2019)
12. Subramanian, K.: Digital Twin for Drug Discovery and Development—The Virtual Liver. *J. Indian Inst. Sci.* 2020, 100, 653–662 (2020)
13. Baillargeon, B., Rebelo, N., Fox, D.D., Taylor, R.L., Kuhl, E.: The Living Heart Project: A robust and integrative simulator for human heart function. *Eur. J. Mech. A/Solids* 2014, 48, 38–47 (2014)  
The living heart project, <https://www.3ds.com/products-services/simulia/solutions/life-sciences-healthcare/the-living-heart-project/> (2022)
14. Martinez-Velazquez, R., Gamez, R., El Saddik, A.: Cardio Twin: A Digital Twin of the human heart running on the edge. In Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Istanbul, Turkey, 26–28 June 2019. IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019, pp. 1–6 (2019)
15. Barnabas, J., Raj, P.: The human body: A digital twin of the cyber physical systems. In Advances in Computers. Elsevier, Volume 117, Issue 1, pp. 219–246 (2020)
16. Shengli, W.: Is human digital twin possible? *Comput. Methods Programs Biomed. Update* 2021, 1, 100014 (2021)
17. Mao, R.Q., Lan, L., Kay, J., Lohre, R., Ayeni, O.R., Goel, D.P.: Immersive virtual reality for surgical training: A systematic review. *J. Surg. Res.* 2021, 268, 40–58 (2021)
18. Bjelland, Q., Rasheed, B., Schaathun, H.G., Pedersen, M.D., Steinert, M., Hellevik, A.I., Bye, R.T.: Towards a Digital Twin for Arthroscopic Knee Surgery: A Systematic Review. *IEEE Access* 2022, 10, 45029–45052 (2022)
19. Karakra, A., Fontanili, F., Lamine, E., Lamothe, J.: HospiT’Win: A predictive simulation-based digital twin for patients pathways in hospital. In Proceedings of the 2019 IEEE EMBS international conference on biomedical health informatics (BHI), Chicago, IL, USA, 19–22 May 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 1–4 (2019)
20. Lamb, K.; Barrett, M.; Pilosof, N.; Fenby-Taylor, H.; Walters, A. Digital Twin Journeys: The Journey to the Smart Hospital of the Future; Centre for Digital Built Britain: Cambridge, UK, 2021 (2021)
21. Siemens Health-ineers: From Digital Twin to Improved Patient Experience, <https://www.siemens-healthineers.com/perspectives/mso-digital-twin-mater.html> (2018)
22. Hu, X., Cao, H., Shi, J., Dai, Y., Dai, W.: Study of hospital emergency resource scheduling based on digital twin technology. 2021 IEEE 2nd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA), Chongqing, China, 2021, pp. 1059–1063, doi: 10.1109/ICIBA52610.2021.9688239 (2021)