

Validación de una metodología para la optimización de la capacidad instalada en servicios de salud mediante simulación de eventos discretos

Felix Badilla-Murillo

Escuela de Ingeniería en Producción Industrial
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ fbadilla@itcr.ac.cr

Oscar Viquez-Acuña

Escuela de Ingeniería en Computación
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica
✉ oviquez@itcr.ac.cr

Resumen

En todo el mundo, los sistemas de salud enfrentan un gran desafío: atender a más personas con recursos limitados. Las largas filas, la falta de espacio o personal, y los tiempos de espera son señales de que algo necesita mejorar. Para lograrlo, es fundamental conocer y optimizar lo que se llama capacidad instalada, es decir, todo lo que un hospital o centro de salud tiene disponible para atender a los pacientes de forma eficiente: camas, personal, equipos, salas, etc.

Este proyecto de investigación explora una herramienta muy útil para lograrlo: la simulación de eventos discretos. Aunque suene complejo, se trata de una técnica que permite crear modelos digitales del funcionamiento de un hospital, como si fuera un videojuego, donde se puede ver cómo se mueven los pacientes, cómo trabaja el personal y qué ocurre si cambian algunas condiciones.

Gracias a esta simulación, se pueden probar diferentes escenarios sin afectar la atención real: ¿qué pasaría si se aumenta el número de enfermeros?, ¿y si se reorganizan las salas? Así, se pueden tomar mejores decisiones antes de aplicar cambios costosos o arriesgados.

La investigación incluye una revisión de estudios recientes publicados en revistas científicas de alto nivel, lo que refuerza la utilidad de esta técnica. Los hallazgos demuestran que la simulación es una herramienta poderosa para planificar, identificar problemas y proponer mejoras en los servicios de salud, con beneficios tanto para los pacientes como para el personal médico.

Palabras claves: Simulación, ingeniería de procesos, mejora continua, gestión hospitalaria

Abstract

Worldwide, health systems face a major challenge: providing care to more people with limited resources. Long queues, lack of space or staff, and prolonged waiting times are clear signs that something needs improvement. To achieve this, it's essential to understand and optimize what is known as installed capacity, that is, everything a hospital or healthcare facility has available to efficiently serve patients: beds, staff, equipment, rooms, etc.

This research project explores a highly effective tool to accomplish this: discrete event simulation. Although it may sound complex, it is a technique that enables creating digital models of hospital operations, similar to a video game, where one can observe patient movements, staff activities, and what happens when conditions change.

Thanks to this simulation, different scenarios can be tested without affecting real-world patient care: What would happen if the number of nurses increased? What if the rooms were reorganized? Thus, better decisions can be made before implementing costly or risky changes.

The research includes a review of recent studies published in high-level scientific journals, reinforcing the usefulness of this technique. Findings demonstrate that simulation is a powerful tool for planning, identifying issues, and proposing improvements in healthcare services, benefiting both patients and medical staff.

Keywords: Simulation, process engineering, continuous improvement, hospital management

Introducción

Hoy en día, acceder a un servicio de salud de calidad y en el momento oportuno se ha vuelto una preocupación común en muchas partes del mundo. Largas listas de espera, falta de personal médico, equipos insuficientes y procesos lentos afectan directamente la experiencia y el bienestar de los pacientes. Estos problemas no son casuales: reflejan una realidad compleja en la que los sistemas de salud ya sean públicos o privados, deben funcionar como un engranaje preciso compuesto por muchos elementos que dependen unos de otros [1].

Comprender cómo funciona este sistema en su conjunto es un gran reto para quienes administran hospitales o toman decisiones sobre políticas de salud. Para ello, se han desarrollado herramientas que permiten analizar el sistema desde distintos ángulos y simular cómo se comportaría ante ciertos cambios. Una de estas herramientas es la simulación, que permite crear modelos virtuales del sistema de salud para estudiar su comportamiento sin interrumpir el servicio real [2].

Cuando se habla de capacidad instalada en salud, nos referimos a los recursos disponibles para brindar atención: desde la infraestructura y los equipos, hasta el personal médico y el tipo de procedimientos que se realizan [3]. Una adecuada planificación de esta capacidad es esencial para evitar el colapso del sistema, asegurar la atención oportuna de los pacientes y, al mismo tiempo, mantener la sostenibilidad financiera del servicio [4][5].



Imágenes con fines ilustrativos generados con IA

No es un secreto que los servicios de salud públicos suelen estar más saturados que los privados, lo que genera listas de espera cada vez más largas y mayor insatisfacción entre los usuarios [6][7]. Aunque existen opciones como convenios entre el Estado y hospitales privados, la solución de fondo requiere una mejor gestión y uso de los recursos disponibles [8].

En este contexto, la simulación de eventos discretos y otros modelos como la simulación híbrida o el modelado basado en agentes se han convertido en aliados poderosos para planificar y tomar decisiones informadas [9]. Estos modelos permiten analizar, por ejemplo, cuánto tiempo espera un paciente, cómo se distribuyen los recursos en un hospital, o qué pasaría si se reorganiza el personal médico. Dependiendo del tipo de modelo (determinista o estocástico), se pueden obtener estimaciones más simples o realistas del funcionamiento del sistema [10].

Este artículo tiene como propósito explicar, de forma clara y comprensible, cómo estas herramientas de simulación pueden ayudar a mejorar los servicios de salud, reducir los tiempos de espera y ofrecer una atención más eficiente a las personas que más lo necesitan.

Metodología

Para este estudio se diseñó y aplicó una metodología basada en el enfoque DMAIC de Six Sigma, con el objetivo de analizar y mejorar la capacidad instalada en servicios de salud mediante simulación de eventos discretos. La metodología fue probada en tres unidades reales del sistema hospitalario costarricense: una sala de angiografía, un laboratorio de citologías y un servicio de patología encargado del procesamiento de biopsias.

Cada uno de estos servicios presentaba retos distintos en cuanto a tiempos de atención, utilización de recursos y listas de espera. La metodología permitió estudiar estos procesos en profundidad y proponer mejoras sostenibles, combinando el uso de herramientas estadísticas, entrevistas al personal y la simulación de procesos clínicos complejos.

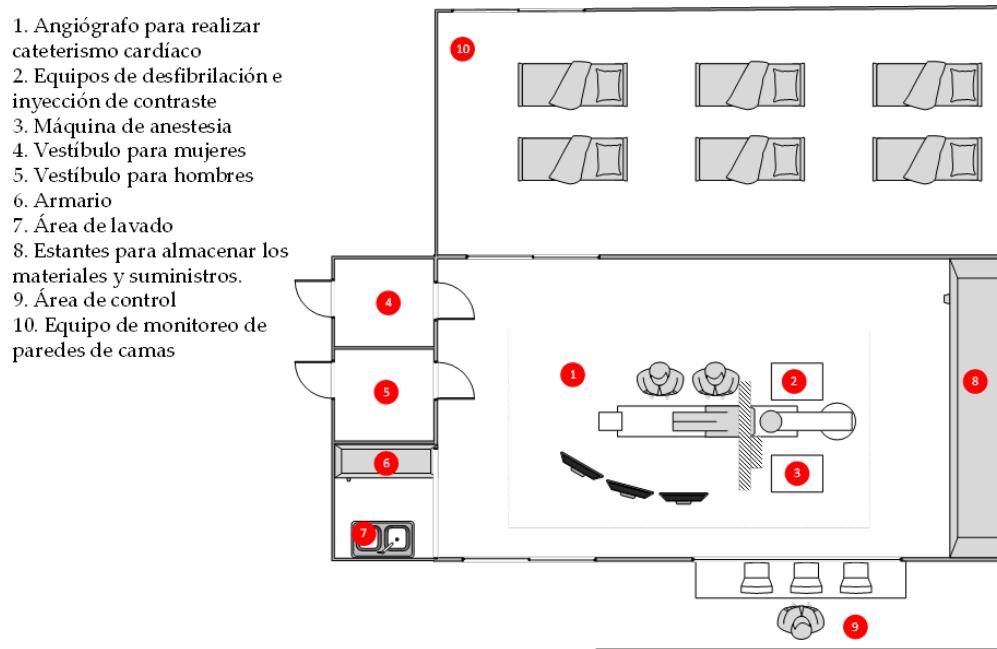


Figura 1: Sala de angiografía

La implementación se desarrolló a través de las siguientes etapas:

Definir: En cada uno de los tres servicios se identificó un problema operativo específico. Por ejemplo, en la sala de angiografía se abordó el exceso en los tiempos de espera por la alta demanda y complejidad de los procedimientos; en el laboratorio de citologías, se analizó la acumulación de muestras y su procesamiento; y en el servicio de patología, se estudió el retraso en la entrega de resultados de biopsias. Para definir los problemas se recurrió a entrevistas con el personal, análisis de la “voz del cliente” (pacientes y usuarios internos), y la elaboración de un Project Charter por unidad.

Medir: Se recopilaron datos cuantitativos y cualitativos en cada servicio, incluyendo tiempos de ciclo, tiempos de espera, número de casos procesados por día, y uso de recursos clave como equipos y personal. Además, se elaboraron mapas de proceso detallados. La información se analizó utilizando herramientas estadísticas descriptivas e inferenciales con el apoyo del software Minitab y el módulo Input Analyzer de Arena Simulation, ambos disponibles con licencia institucional en el Tecnológico de Costa Rica.

Analizar: A partir de los datos recolectados, se construyeron modelos de simulación de eventos discretos para cada uno de los tres servicios. Estos modelos permitieron reproducir virtualmente el comportamiento real de los procesos y fueron validados estadísticamente para confirmar que no existían diferencias significativas entre los resultados simulados y los datos reales. Esta etapa facilitó la identificación de cuellos de botella, sobrecargas de trabajo y momentos críticos en la atención.

Mejorar: Con los modelos validados, se realizaron análisis What-If, en los que se probaron distintos escenarios de mejora. Por ejemplo, se evaluaron alternativas como la redistribución del personal, cambios en los horarios de atención o el rediseño de flujos de trabajo. Las propuestas estuvieron inspiradas en principios del lean manufacturing, orientadas a reducir los tiempos de ciclo y mejorar la utilización de los recursos sin comprometer la calidad del servicio.

Controlar: Finalmente, se establecieron planes de seguimiento específicos para cada caso, incluyendo la definición de variables clave a monitorear, como la cantidad de casos procesados por semana, el tiempo de espera promedio y la carga de trabajo del personal. Estos planes permitieron asegurar que las mejoras implementadas pudieran mantenerse a lo largo del tiempo y servir como referencia para otros servicios similares.

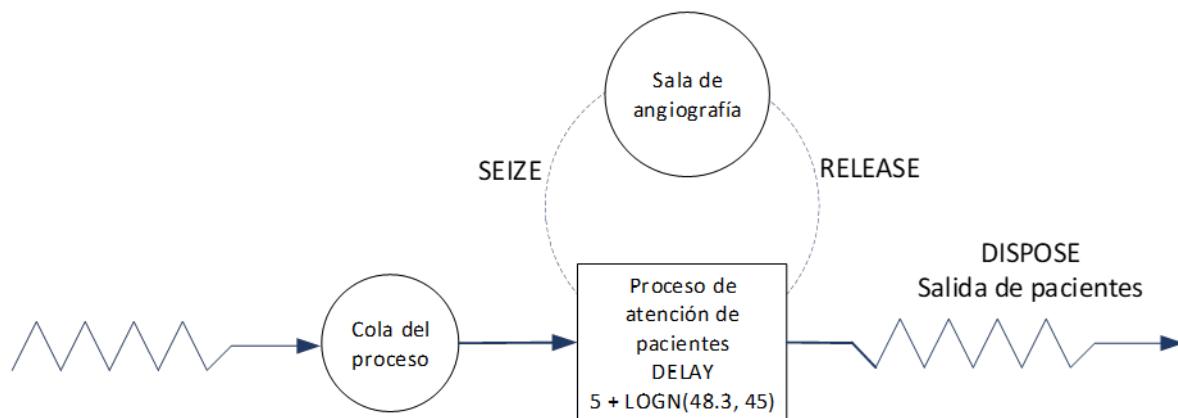


Figura 2: Modelo de simulación para la sala de angiografía

Resultados

Una vez aplicada la metodología fue posible evidenciar como los resultados obtenidos permitieron analizar en detalle el uso de los recursos en cada proceso y plantear escenarios de mejora realistas.

En la sala de angiografía, se determinó que la capacidad actual era insuficiente para atender la demanda, con una utilización cercana al 99%. Al simular un escenario donde se duplicaba la capacidad operativa, se logró reducir este indicador al 64%, lo que representa un uso más saludable de los recursos. Además, se comprobó que ofrecer un segundo turno de atención era una alternativa más rentable y rápida que construir una nueva sala, reduciendo considerablemente las listas de espera sin requerir grandes inversiones.

En el servicio de patología, se identificó un importante cuello de botella en el almacenamiento de las placas que esperan ser diagnosticadas. Con dos patólogos disponibles, el modelo indicó que era posible procesar cerca de 8000 biopsias por año, siempre que se incorporaran ajustes en la programación y distribución de tiempos. El análisis de los tiempos de diagnóstico reveló que las estimaciones previamente utilizadas por el centro (2,5 biopsias por hora) no eran realistas, y que existían dos grupos de complejidad distintos, lo que permitió mejorar la planificación de tareas.

En el laboratorio de citologías, se aplicaron principios de lean manufacturing como trabajar una muestra a la vez en lugar de hacerlo por lotes. Esta medida redujo en un 66% el tiempo de procesamiento (valor agregado) y en un 44% los tiempos de espera, lo que en conjunto representó una mejora del 65% en el tiempo total de ciclo. Además, la capacidad instalada del laboratorio prácticamente se triplicó.

En todos los casos, los modelos de simulación desarrollados fueron validados estadísticamente comparando sus resultados con los datos reales. Los intervalos de confianza indicaron que no existían diferencias significativas, lo que demuestra que los modelos son confiables y representativos de los procesos reales.

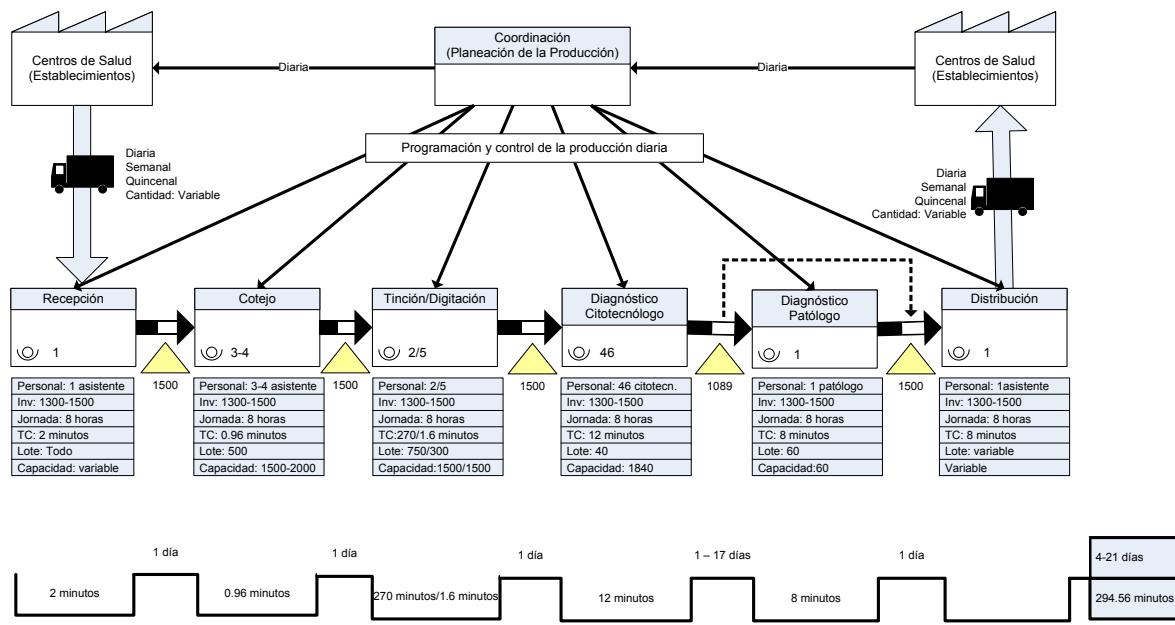


Figura 3: Mapa de flujo de valor para el laboratorio de citologías

Conclusiones

Este estudio demostró que la simulación de eventos discretos es una herramienta poderosa y accesible para mejorar los procesos en servicios de salud, al permitir analizar con detalle el comportamiento de sistemas complejos y proponer soluciones realistas antes de aplicarlas en la práctica.

El enfoque metodológico basado en DMAIC resultó especialmente útil para guiar el análisis en cada etapa: desde la identificación del problema hasta la implementación de mejoras y el diseño de estrategias de control. Combinado con principios de lean manufacturing, permitió reducir tiempos de espera, optimizar el uso de los recursos disponibles y aumentar la productividad de los servicios analizados.

La implementación de esta metodología en tres entornos distintos —una sala de procedimientos cardíacos, un laboratorio de citologías y un servicio de patología— demostró su versatilidad y eficacia. Además, el uso de herramientas como ARENA y modelos desarrollados en VBA Excel permitió adaptar el análisis a diferentes niveles de complejidad y disponibilidad tecnológica.

Entre las principales conclusiones destacan:

La simulación evitó inversiones innecesarias, como la construcción inmediata de nueva infraestructura, al identificar alternativas más rentables como la implementación de turnos adicionales.

Se identificaron cuellos de botella y falsas suposiciones en los tiempos de atención que afectaban la eficiencia del servicio.

Se generaron planes de control que permiten dar seguimiento a los indicadores clave y sostener las mejoras en el tiempo.

Finalmente, este estudio abre la puerta a nuevas investigaciones que integren esta metodología en otros servicios hospitalarios como urgencias, farmacia o consulta externa. También sugiere la posibilidad de incorporar tecnologías emergentes como inteligencia artificial y big data para reforzar los modelos predictivos en la gestión hospitalaria. Los resultados del estudio son presentados a las autoridades competentes mediante informes técnicos y sesiones de presentación orientadas a la toma de decisiones.



Imágenes con fines ilustrativos generados con IA

Referencias

- [1] F. Senkubuge, M. Modisenyane and T. Bishaw, "Strengthening health systems by health sector reforms," *Global Health Action*, vol. 7, pp. 1-7, 2014.
- [2] G. Steigner, C. R. Doarn, M. Schuette, D. Matusiewicz and C. Thielscher, "Health Applications for Corporate Health Management," *Telemedicina and e-health*, vol. 23, no. 5, pp. 448-452, 2017.
- [3] G. Improta, G. Guizzi, C. Ricciardi, V. Giordano, A. M. Ponsiglione, G. Converso and M. Triasi, "Agile Six Sigma in Healthcare: Case Study at Santobono Pediatric Hospital," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, pp. 1-17, 2019.
- [4] M. Gómez-Chaparro, J. García-Sanz-Calcedo and J. Aunión-Villa, "Maintenance in hospitals with less than 200 beds: efficiency indicators," *Building Research and Information*, vol. 48, no. 5, pp. 526-537, 2020.
- [5] J. Aunión-Villa, M. Gómez-Chaparro and J. García-Sanz-Calcedo, "Assessment of the maintenance costs of electro-medical equipment in Spanish hospitals," *Expert Review of Medical Devices*, vol. 17, no. 8, pp. 855-865, 2020.
- [6] W. Chen, Z. G. Zhang and X. Chen, "On two-tier healthcare system under capacity constraint," *International Journal of Production Research*, vol. 58, no. 12, pp. 3744-3764, 2019.
- [7] A. Teymourifar, O. Kaya and G. Ozturk, "Contracting models for pricing and capacity decisions in healthcare systems," *Omega*, no. 102232, pp. 1-12, 202.
- [8] J. Chu, X. Li and Z. Yuan, "Emergency medical resource allocation among hospitals with non-regressive production technology: a DEA-based approach," *Computers & Industrial Engineering*, pp. 1-42, 2022.
- [9] M. Alvarado, M. Lawley and Y. Li, "Healthcare simulation tutorial: methods, challenges and opportunities," in *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, Las Vegas, 2016.
- [10] N. Sweilam, S. AL-Mekhlafi, S. Hassan, N. Alsenaidi and A. Radwan, "Numerical treatments for some stochastic-deterministic chaotic systems," *Results in Physics*, vol. 38, no. 105628, pp. 1-12, 2022.

Sobre los autores

Felix Badilla-Murillo

Ingeniero Industrial, con grado de doctorado, profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería en Producción Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su trabajo académico e investigativo se centra en simulación industrial, análisis y optimización de procesos en servicios de salud, aplicación de inteligencia artificial en gestión logística y automatización industrial. Actualmente, desarrolla proyectos enfocados en la mejora continua mediante técnicas avanzadas de simulación y análisis de capacidad instalada. Su ORCID: [0000-0002-7632-594X](https://orcid.org/0000-0002-7632-594X)

Oscar Víquez-Acuña

Ingeniero en Computación, con grado de maestría, profesor asociado e investigador en la Escuela de Ingeniería en Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Su trabajo académico e investigativo se centra en temas variados de Ingeniería de Software. ORCID: [0009-0005-5776-5455](https://orcid.org/0009-0005-5776-5455)