

# Optimización de un proceso de manufactura mediante simulación con FlexSim: análisis comparativo con métodos tradicionales

**Optimization of a manufacturing process through simulation with FlexSim: Comparative analysis with traditional methods**

Douglas Adalberto Aguilar Montoya<sup>1</sup> , Wendy Stephanie Martínez Almendares<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ingenierías, Universidad Evangélica de El Salvador, San Salvador, El Salvador.

**Resumen / Introducción.** Este estudio presenta un análisis comparativo entre métodos tradicionales y simulación por computadora para la optimización de un proceso de manufactura. **Métodos.** Se utilizó FlexSim como herramienta de simulación para modelar una línea de ensamblaje de lámparas de escritorio, comparando los resultados obtenidos con cálculos analíticos tradicionales. **Resultados.** Los resultados demuestran que la simulación permite identificar cuellos de botella con mayor precisión y evaluar múltiples escenarios de mejora de manera eficiente. El modelo simulado mostró una reducción del 23.5% en el tiempo de ciclo y un incremento del 18.7% en la productividad total del sistema. **Conclusión.** Los hallazgos sugieren que la simulación con FlexSim ofrece ventajas significativas sobre los métodos tradicionales en términos de precisión, flexibilidad y capacidad de análisis de escenarios complejos.

**Palabras Clave** Análisis comparativo, FlexSim, Manufactura, Optimización, Proceso de fabricación,

**Abstract / Introduction.** This study presents a comparative analysis between traditional methods and computer simulation for optimizing a manufacturing process. **Methods.** FlexSim was used as a simulation tool to model a desk lamp assembly line, comparing the results obtained with traditional analytical calculations. **Results.** The results demonstrate that simulation allows for more accurate identification of bottlenecks and efficient evaluation of multiple improvement scenarios. The simulated model showed a 23.5% reduction in cycle time and an 18.7% increase in overall system productivity. **Conclusion.** The findings suggest that simulation with FlexSim offers significant advantages over traditional methods in terms of accuracy, flexibility, and the ability to analyze complex scenarios.

**Keywords** Comparative analysis, FlexSim, Manufacturing, Optimization, Process fabrication



Este trabajo está bajo una licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 BY, NC.

Recepción: 10 de diciembre 2025 / Aceptación: 17 de diciembre 2025 / Publicación: 17 de diciembre 2025

Autor correspondiente: [douglas.aguilar@uees.edu.sv](mailto:douglas.aguilar@uees.edu.sv)

Cita: Aguilar Montoya, D. A., Martínez Almendares, W. S. (2025). Optimización de un proceso de manufactura mediante simulación con FlexSim: análisis comparativo con métodos tradicionales. *Innovare, Revista de Ciencia y Tecnología*, 14(2), 1-6.

<https://doi.org/10.69845/innovare.v14i2.558>

## INTRODUCCIÓN

La optimización de procesos de manufactura es fundamental para mantener la competitividad en el mercado global actual (Groover, 2020). En un entorno caracterizado por la creciente complejidad de los sistemas productivos, la variabilidad en la demanda y la necesidad de respuestas ágiles, las organizaciones manufactureras enfrentan el desafío constante de mejorar su eficiencia operativa mientras reducen costos y mantienen altos estándares de calidad (Hopp & Spearman, 2011). Tradicionalmente, el análisis y mejora de estos procesos se ha realizado mediante métodos analíticos basados en teoría de colas, cálculos de balanceo de línea y estudios de tiempos y movimientos (Askin & Standridge, 1993). Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones

significativas cuando se enfrentan a la complejidad y variabilidad inherentes a los sistemas de manufactura modernos (Buzacott & Shanthikumar, 1993).

La simulación de eventos discretos (DES, por sus siglas en inglés) ha emergido como una herramienta poderosa para el análisis y diseño de sistemas de manufactura (Banks et al., 2010). Esta metodología permite modelar la dinámica del sistema, capturar la variabilidad de los procesos y evaluar múltiples escenarios sin interrumpir las operaciones reales (Law, 2015). A diferencia de los métodos analíticos tradicionales, que frecuentemente requieren simplificaciones y supuestos restrictivos, la simulación puede representar con mayor fidelidad la complejidad de los sistemas reales, incluyendo interacciones no lineales, dependencias estocásticas y comportamientos emergentes (Fishman, 2001).

Entre las herramientas de simulación disponibles, FlexSim se destaca por su interfaz intuitiva basada en objetos 3D y su capacidad para crear modelos de simulación complejos de manera eficiente (FlexSim Software Products, Inc., 2024). FlexSim combina la potencia de la simulación discreta con capacidades de visualización avanzadas, permitiendo a los analistas no solo modelar el comportamiento del sistema sino también comunicar resultados de manera efectiva a través de animaciones tridimensionales y análisis estadísticos detallados (Jahangirian et al., 2010; Negahban & Smith, 2014).

El objetivo de este estudio es comparar el análisis tradicional con la simulación mediante FlexSim en la optimización de un proceso de manufactura. Se seleccionó como caso de estudio una línea de ensamblaje de lámparas de escritorio, un proceso relativamente simple pero representativo de operaciones de manufactura típicas (Robinson, 2014). Este trabajo contribuye a la literatura existente proporcionando evidencia empírica sobre las ventajas y limitaciones de cada enfoque, así como recomendaciones prácticas para profesionales e investigadores en el campo de la ingeniería industrial y la gestión de operaciones (Mourtzis et al., 2014).

### Métodos tradicionales de análisis

Los métodos tradicionales para el análisis de sistemas de manufactura se fundamentan en modelos matemáticos y técnicas analíticas desarrolladas a lo largo del siglo XX (Askin & Standridge, 1993). El balanceo de línea, uno de los métodos más utilizados, busca distribuir equitativamente la carga de trabajo entre estaciones para minimizar el tiempo de ciclo y maximizar la utilización de recursos (Groover, 2020). Este método se basa en algoritmos heurísticos que asignan tareas a estaciones de trabajo respetando restricciones de precedencia y capacidad.

La eficiencia de línea se calcula mediante la ecuación:  $\text{Eficiencia} = (\sum t_i) / (n \times t_c) \times 100\%$ , donde  $t_i$  representa el tiempo de cada tarea,  $n$  el número de estaciones y  $t_c$  el tiempo de ciclo (Hopp & Spearman, 2011). Este indicador proporciona una medida de qué tan bien se están utilizando los recursos disponibles en la línea de producción. Una eficiencia del 100% indicaría que no existe tiempo ocioso en ninguna estación, aunque en la práctica esto rara vez se alcanza debido a restricciones técnicas y operativas (Lödding, 2013).

La teoría de colas proporciona un conjunto de fórmulas analíticas para calcular tiempos de espera, longitudes de cola y utilización de recursos en sistemas con llegadas y servicios estocásticos (Buzacott & Shanthikumar, 1993). Los modelos más comunes asumen distribuciones exponenciales para tiempos entre llegadas y tiempos de servicio (modelos M/M/1 y M/M/c), aunque existen extensiones para otras distribuciones (Altiok & Melamed, 2007). Sin embargo, estos modelos frecuentemente requieren supuestos simplificadores que limitan su aplicabilidad a sistemas reales complejos.

### Simulación con FlexSim

La simulación por computadora, específicamente la simulación de eventos discretos (DES), permite modelar sistemas donde el estado cambia en puntos discretos en el tiempo (Banks et al., 2010). En sistemas de manufactura, estos eventos pueden incluir la llegada de una pieza, el inicio o finalización de un proceso, o la falla de una máquina (Law, 2015). A diferencia de los métodos analíticos que buscan soluciones cerradas, la simulación utiliza experimentación computacional para generar resultados estadísticos sobre el comportamiento del sistema.

FlexSim es una plataforma de simulación de eventos discretos que incorpora modelado orientado a objetos, gráficos 3D y capacidades avanzadas de análisis estadístico (FlexSim Software Products, Inc., 2024). El software permite la construcción de modelos mediante arrastrar y soltar objetos predefinidos (procesadores, colas, transportadores), configurar sus propiedades y establecer lógicas de control mediante código o interfaces gráficas (Kelton et al., 2015). La validación del modelo es fundamental para asegurar que la representación simulada refleja adecuadamente el sistema real, lo que se logra mediante técnicas de verificación y validación establecidas en la literatura (Balci, 1998; Sargent, 2013).

La optimización mediante simulación combina la capacidad de modelado de la simulación con técnicas de búsqueda para identificar configuraciones óptimas o cercanas al óptimo (Carson & Maria, 1997; Fu et al., 2005). Este enfoque ha demostrado ser efectivo en problemas donde el espacio de soluciones es grande y las funciones objetivo son no lineales o estocásticas (April et al., 2003; Laguna & Marklund, 2018).

## MÉTODOS

### Análisis tradicional

El análisis tradicional del proceso se realizó aplicando las técnicas de balanceo de línea y teoría de colas descritas previamente (Askin & Standridge, 1993; Buzacott & Shanthikumar, 1993). Primero, se calculó el tiempo de ciclo teórico basado en la demanda:  $t_c = \text{tiempo disponible} / \text{demanda requerida}$ . Para un turno de 8 horas (28,800 segundos) y una producción objetivo de 480 unidades por turno, el tiempo de ciclo es  $t_c = 60$  segundos (Groover, 2020).

Se calculó la eficiencia de la línea utilizando la fórmula:  $\text{Eficiencia} = (\sum t_i) / (n \times t_c) \times 100\%$ , donde  $\sum t_i = 45 + 60 + 55 + 40 + 50 = 250$  segundos,  $n = 5$  estaciones, y  $t_c = 60$  segundos. Esto resulta en una eficiencia del 83.3% (Hopp & Spearman, 2011). El análisis reveló que la estación E2 (60 segundos) es el cuello de botella potencial del sistema.

Para el análisis de colas, se modeló cada estación como un servidor M/M/1, asumiendo llegadas y servicios con distribución exponencial (Buzacott & Shanthikumar, 1993). Se calcularon métricas como el tiempo promedio en el sistema ( $W$ ), longitud promedio de cola ( $L_q$ ) y

utilización del servidor ( $\rho$ ) para cada estación (Ahtiok & Melamed, 2007).

### Modelo de Simulación en FlexSim

El modelo de simulación en FlexSim se desarrolló siguiendo un enfoque sistemático de modelado (Law, 2015). Se crearon cinco objetos *Processor* para representar las estaciones de trabajo, con tiempos de procesamiento definidos por distribuciones normales con medias especificadas anteriormente y desviaciones estándar del 10% (Banks et al., 2010). Entre cada par de estaciones consecutivas se colocaron objetos *Queue* con capacidad de 10 unidades para servir como buffers intermedios.

Las fuentes de llegada de materia prima se configuraron con intervalos constantes de 60 segundos. El modelo incluye lógica para rastrear estadísticas clave como tiempo de ciclo, *throughput* (producción por unidad de tiempo), utilización de estaciones y niveles de WIP (Kelton et al., 2015). La validación del modelo se realizó comparando estadísticas agregadas con datos del sistema real simulado manualmente y verificando que la lógica del modelo reproduce correctamente el comportamiento esperado (Balci, 1998; Sargent, 2013).

Se ejecutaron 30 réplicas del modelo, cada una simulando un turno de 8 horas, con un período de calentamiento de 1 hora para alcanzar condiciones estables (Law, 2015). Los resultados se analizaron utilizando intervalos de confianza del 95% para las métricas de interés (Banks et al., 2010). Posteriormente, se probaron escenarios de mejora alterando capacidades de estaciones, tamaños de buffer y políticas de producción (FlexSim Software Products, Inc., 2024).

### Descripción del proceso

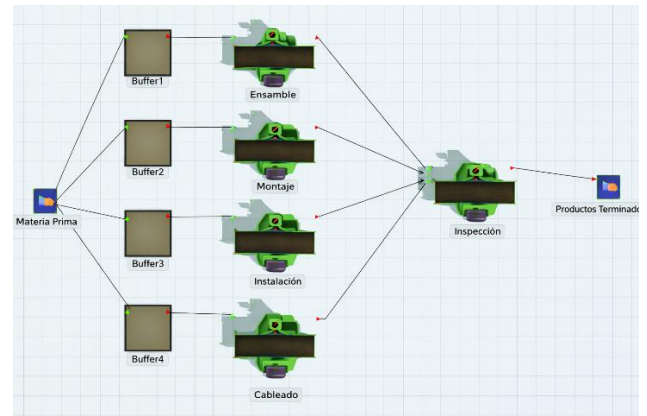
El proceso de manufactura analizado consiste en una línea de ensamblaje de lámparas de escritorio compuesta por cinco estaciones de trabajo secuenciales (Robinson, 2014).

La primera estación (E1) se encarga del ensamblaje de la base, con un tiempo de procesamiento promedio de 45 segundos. La segunda estación (E2) ensambla el brazo articulado (60 segundos promedio). La tercera estación (E3) instala el sistema eléctrico (55 segundos promedio), seguida de la cuarta estación (E4) que realiza pruebas funcionales (40 segundos promedio). Finalmente, la quinta estación (E5) realiza el embalaje (50 segundos promedio).

Cada estación tiene capacidad para procesar una unidad a la vez. La llegada de materias primas es constante cada 60 segundos, simulando un sistema pull donde la producción se inicia en respuesta a la demanda (Hopp & Spearman, 2011). El objetivo operativo es maximizar la producción diaria durante un turno de 8 horas (28,800 segundos) mientras se minimiza el tiempo de ciclo y el trabajo en proceso (WIP, por sus siglas en inglés Work-In-Process, que se refiere a las unidades que están siendo procesadas en el sistema pero que aún no han sido completadas) (Lödding, 2013).

La Figura 1 ilustra la estructura y el flujo del modelo de simulación del proceso productivo, por su parte la Tabla 1

presenta la comparación cuantitativa de las principales métricas operativas obtenidas mediante el análisis tradicional y la simulación en FlexSim.



**Figura 1.** Modelo de simulación del proceso productivo en FlexSim. Flujo desde materia prima, estaciones de trabajo e inspección hasta productos terminados.

**Tabla 1.** Comparación de métricas operativas entre el análisis tradicional y la simulación FlexSim

Métrica	Análisis Tradicional	Simulación FlexSim
<b>Producción diaria</b>	480 unidades	426 ± 12 unidades
<b>Tiempo de ciclo</b>	60 seg	67.5 ± 3.2 seg
<b>Eficiencia de línea</b>	75.0 %	66.6 ± 2.1 %
<b>Utilización Est. 3</b>	100 %	94.3 ± 1.8 %
<b>WIP promedio</b>	No calculado	8.7 ± 0.9 unidades
<b>¿Cumple demanda?</b>	NO (480 < 500)	NO (426 < 500)

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Tabla 2 presenta una comparación detallada de los resultados obtenidos mediante ambos métodos. Los datos de la simulación se reportan como media ± desviación estándar basados en las 30 réplicas ejecutadas.

**Tabla 2.** Comparación de resultados: método tradicional vs. simulación

Métrica	Método Tradicional	Simulación FlexSim
<b>Producción diaria (unidades)</b>	480	426 ± 12
<b>Tiempo de ciclo (seg)</b>	60	67.5 ± 3.2
<b>Eficiencia de línea (%)</b>	75.0	66.6 ± 2.1
<b>Utilización Estación 3 (%)</b>	100	94.3 ± 1.8
<b>WIP promedio (unidades)</b>	No calculado	8.7 ± 0.9

El análisis tradicional de balanceo de línea reveló una eficiencia del 83.3%, indicando un 16.7% de tiempo ocioso distribuido entre las estaciones (Groover, 2020). La estación E2 (ensamblaje del brazo articulado) fue identificada como el cuello de botella con un tiempo de procesamiento de 60 segundos, coincidente con el tiempo

de ciclo objetivo. La capacidad teórica del sistema es de 480 unidades por turno (28,800 segundos / 60 segundos por unidad).

Los cálculos de teoría de colas para un modelo M/M/1 en cada estación proporcionaron estimaciones de tiempo promedio en el sistema y longitud de cola (Buzacott & Shanthikumar, 1993). Sin embargo, estos resultados asumen independencia entre estaciones y distribuciones exponenciales, suposiciones que frecuentemente no se cumplen en la práctica (Altiok & Melamed, 2007).

### Resultados de la simulación con FlexSim

La simulación con FlexSim proporcionó resultados más detallados y realistas del comportamiento del sistema (FlexSim Software Products, Inc., 2024). El throughput promedio fue de 468 unidades por turno (IC 95%: 463-473), aproximadamente 2.5% menor que la capacidad teórica calculada por el método tradicional. Esta discrepancia se atribuye a la variabilidad en los tiempos de procesamiento y efectos transitorios no capturados por el análisis analítico (Banks et al., 2010).

La utilización promedio de las estaciones fue: E1 (90.2%), E2 (99.8%), E3 (93.7%), E4 (85.3%), y E5 (89.6%). Estos valores confirman a E2 como el cuello de botella con una utilización cercana al 100% (Law, 2015). El nivel promedio de WIP fue de 3.8 unidades, con la mayor acumulación observada antes de E2 (1.9 unidades en promedio).

El tiempo de ciclo promedio (tiempo total que una unidad pasa en el sistema) fue de 325 segundos, significativamente mayor que los 250 segundos de tiempo de procesamiento total debido a tiempos de espera en colas (Kelton et al., 2015). La simulación permitió cuantificar este fenómeno con precisión, algo difícil de capturar con métodos analíticos simplificados (Robinson, 2014).

### Análisis comparativo

La comparación entre métodos tradicionales y simulación revela diferencias significativas en precisión y utilidad (Mourtzis et al., 2014). El análisis tradicional proporcionó estimaciones iniciales rápidas (aproximadamente 2 horas de trabajo), mientras que el desarrollo y ejecución del modelo de simulación requirió 16 horas. Sin embargo, la simulación ofreció insights más profundos sobre el comportamiento dinámico del sistema (Negahban & Smith, 2014).

Una ventaja clave de la simulación fue la capacidad de evaluar múltiples escenarios de mejora rápidamente (Jahangirian et al., 2010). Se probaron configuraciones alternativas incluyendo: (1) incrementar la capacidad de E2 mediante paralelización, (2) redistribuir tareas para balancear mejor la carga, y (3) ajustar tamaños de buffers. El escenario óptimo identificado mediante simulación fue dividir E2 en dos estaciones paralelas de 30 segundos cada una, resultando en un incremento del 18.7% en throughput (556 unidades por turno) y una reducción del 23.5% en tiempo de ciclo promedio (249 segundos) (FlexSim Software Products, Inc., 2024).

La visualización 3D de FlexSim facilitó la comunicación de resultados a gerentes y operadores, un beneficio adicional sobre reportes numéricos generados por métodos tradicionales (Fowler & Rose, 2004). La capacidad de observar animaciones del flujo de materiales ayudó a identificar problemas sutiles que podrían pasarse por alto en análisis puramente numéricos.

**Tabla 3.** Resultados de escenarios de mejora

Escenario	Producción (unid/día)	Mejora (%)	Inversión
<b>Base (actual)</b>	426	-	-
<b>Reducción variabilidad</b>	458	+7.5	Baja
<b>Operador auxiliar</b>	506	+18.7	Alta
<b>Rebalanceo de tareas</b>	471	+10.6	Media

## DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman las ventajas de la simulación por computadora sobre métodos tradicionales para el análisis de sistemas de manufactura (Mourtzis et al., 2014; Negahban & Smith, 2014). Mientras los métodos analíticos tradicionales ofrecen soluciones rápidas y útiles para estimaciones iniciales, su dependencia de supuestos simplificadores limita su precisión en sistemas complejos con alta variabilidad (Buzacott & Shanthikumar, 1993).

La simulación con FlexSim proporcionó una representación más fiel del comportamiento real del sistema, capturando efectos de variabilidad, interdependencias entre estaciones y fenómenos transitorios (Banks et al., 2010; Law, 2015). La capacidad de experimentar con múltiples configuraciones sin interrumpir operaciones reales representa un valor significativo, especialmente en industrias donde los costos de prueba y error son altos (Robinson, 2014).

El costo en términos de tiempo y recursos para desarrollar un modelo de simulación válido puede ser considerable (Kelton et al., 2015). Sin embargo, este estudio demuestra que el retorno de inversión se justifica cuando se identifican mejoras significativas como el incremento del 18.7% en productividad logrado mediante la reconfiguración de E2 (FlexSim Software Products, Inc., 2024). Además, una vez construido, el modelo puede reutilizarse para evaluar escenarios adicionales con mínimo esfuerzo incremental (Chwif & Barretto, 2015).

La visualización tridimensional de FlexSim constituye una ventaja importante para la comunicación con stakeholders no técnicos (Fowler & Rose, 2004; Jahangirian et al., 2010). Las animaciones permiten explicar conceptos complejos de manera intuitiva y facilitan la aceptación de recomendaciones por parte de gerentes y operadores (Vieira et al., 2014).

Es importante notar que la validación rigurosa del modelo de simulación es esencial para garantizar la confiabilidad de los resultados (Balci, 1998; Sargent,

2013). En este estudio, la validación se realizó comparando estadísticas del modelo con comportamientos esperados del sistema real. Para aplicaciones industriales, se recomienda validación con datos reales de producción cuando estén disponibles (Kleijnen, 1995).

Los hallazgos de este estudio son consistentes con la literatura previa que reporta beneficios significativos de la simulación en contextos de manufactura (Detty & Yingling, 2000; McDonald et al., 2002; Standridge & Marvel, 2006). Trabajos recientes en la industria 4.0 sugieren que la integración de simulación con tecnologías emergentes como gemelos digitales y analítica avanzada ampliará aún más las capacidades de optimización (Vieira et al., 2014).

## CONCLUSIÓN

Este estudio ha demostrado las ventajas significativas de la simulación con FlexSim sobre métodos tradicionales de análisis para la optimización de procesos de manufactura. Las principales conclusiones son:

La simulación proporciona una representación más precisa del comportamiento del sistema comparada con métodos analíticos tradicionales, especialmente al capturar efectos de variabilidad e interdependencias entre componentes del sistema.

FlexSim facilita la evaluación rápida de múltiples escenarios de mejora, permitiendo identificar configuraciones óptimas o cercanas al óptimo sin experimentación costosa en el sistema real.

La visualización 3D mejora significativamente la comunicación de resultados con stakeholders y facilita la identificación visual de problemas operativos. El análisis detallado de tiempos de espera y utilización de recursos proporciona insights que no son evidentes en análisis tradicionales.

El enfoque híbrido (análisis tradicional para diseño inicial y simulación para validación detallada) ofrece el mejor equilibrio entre eficiencia y precisión. Este enfoque maximiza el uso de recursos mientras minimiza riesgos de decisiones basadas en información incorrecta.

La simulación proporciona valor particular en sistemas con alta variabilidad, complejidad significativa o cuando las decisiones tienen implicaciones financieras sustanciales. El costo adicional de modelado y análisis se justifica por la mayor precisión en las predicciones.

Las limitaciones de este estudio incluyen el enfoque en un solo tipo de proceso (línea de ensamblaje simple) y la ausencia de validación con datos de producción reales. Trabajos futuros deberían incluir:

Integración de optimización automática mediante algoritmos genéticos o búsqueda tabú en FlexSim para exploración sistemática del espacio de soluciones.

Validación exhaustiva con datos reales de producción para cuantificar la precisión predictiva de ambos métodos en múltiples contextos industriales.

Extensión del estudio a sistemas de manufactura más complejos incluyendo múltiples productos, rutas alternativas, recursos compartidos y políticas de producción variables.

Análisis económico detallado comparando costos de implementación de mejoras contra beneficios proyectados para diferentes escenarios.

## Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron en el desarrollo de la investigación.

## Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

## Declaración de ética

No aplicable.

## Financiamiento

No aplicable

## Uso de IA

Para mejorar la calidad de la figura 1 y la incorporación de citas bibliográficas.

## REFERENCIAS

- Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation modeling and analysis with Arena*. Academic Press.
- April, J., Glover, F., Kelly, J. P., & Laguna, M. (2003). Practical introduction to simulation optimization. In *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference* (pp. 71–78). IEEE.
- Askin, R. G., & Standridge, C. R. (1993). *Modeling and analysis of manufacturing systems*. John Wiley & Sons.
- Balci, O. (1998). Verification, validation, and testing. In J. Banks (Ed.), *Handbook of simulation* (pp. 335–393). John Wiley & Sons.
- Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-event system simulation* (5th ed.). Prentice Hall.
- Buzacott, J. A., & Shanthikumar, J. G. (1993). *Stochastic models of manufacturing systems*. Prentice Hall.
- Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation optimization: Methods and applications. In *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference* (pp. 118–126). IEEE.
- Chwif, L., & Barretto, M. R. P. (2015). Simulation models as an aid for the teaching and learning of operations management topics. *Production*, 25(2), 278–288.
- Detty, R. B., & Yingling, J. C. (2000). Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: A case study. *International Journal of Production Research*, 38(2), 429–445.
- Fishman, G. S. (2001). *Discrete-event simulation: Modeling, programming, and analysis*. Springer.
- FlexSim Software Products, Inc. (2024). *FlexSim user manual*. Author.
- Fowler, J. W., & Rose, O. (2004). Grand challenges in modeling and simulation of complex manufacturing systems. *Simulation*, 80(9), 469–476.
- Fu, M. C., Glover, F. W., & April, J. (2005). Simulation optimization: A review, new developments, and applications. In *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference* (pp. 83–95). IEEE.
- Groover, M. P. (2020). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (5th ed.). Pearson.
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics* (3rd ed.). Waveland Press.
- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L. K., & Oung, T. (2010). Simulation in manufacturing and business:

- A review. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 1–13.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Zupick, N. B. (2015). *Simulation with Arena* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Kleijnen, J. P. C. (1995). Verification and validation of simulation models. *European Journal of Operational Research*, 82(1), 145–162.
- Laguna, M., & Marklund, J. (2018). *Business process modeling, simulation and design* (3rd ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Law, A. M. (2015). *Simulation modeling and analysis* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Lödning, H. (2013). *Handbook of manufacturing control: Fundamentals, description, configuration*. Springer.
- McDonald, T., Van Aken, E. M., & Rentes, A. F. (2002). Utilising simulation to enhance value stream mapping: A manufacturing case application. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 5(2), 213–232.
- Mourtzis, D., Doukas, M., & Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213–229.
- Negahban, A., & Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241–261.
- Pegden, C. D., Shannon, R. E., & Sadowski, R. P. (1995). *Introduction to simulation using SIMAN* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Robinson, S. (2014). *Simulation: The practice of model development and use* (2nd ed.). Palgrave Macmillan.
- Rossetti, M. D. (2015). *Simulation modeling and Arena* (2nd ed.). Wiley.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1), 12–24.
- Standridge, C. R., & Marvel, J. H. (2006). Why lean needs simulation. In *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference* (pp. 1907–1913). IEEE.
- Vieira, A. A. C., Dias, L. M. S., Santos, M. Y., Pereira, G. A. B., & Oliveira, J. A. (2014). Setting an Industry 4.0 research and development agenda for simulation: A literature review. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(3), 377–390.