

7. Simulación de eventos discretos: mejora de la productividad en empresas de calzado mexicanas

EVA SELENE HERNÁNDEZ GRESS*

RUBÉN CALDERÓN ANDRADE**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.235.07>

Resumen

Este capítulo tiene como objetivo destacar ejemplos donde la simulación de eventos discretos ha demostrado ser beneficiosa en la mejora de indicadores relacionados con la producción. En la revisión del estado del arte se exponen casos identificados desde 2015 hasta la fecha, analizando las áreas de oportunidad. Se presentan dos casos de estudio, detallando tanto su metodología, así como los resultados obtenidos en empresas mexicanas dedicadas a la fabricación de calzado. Finalmente, se aborda la discusión sobre la pertinencia de seguir aplicando la simulación y cómo esta podría contribuir a mejorar el funcionamiento de las empresas en la actualidad.

Palabras clave: *Simulación de eventos discretos, empresas de calzado, productividad.*

* Doctora en Ciencias en Ingeniería Industrial. Profesor-investigador, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Tecnológico de Monterrey, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8720-5997>

** Licenciado en Ingeniería Industrial. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Gerente de producción en Industrias Isar, México.

Introducción

La simulación de eventos discretos en el ámbito del calzado se refiere a la aplicación de la técnica para analizar y optimizar los procesos relacionados con la fabricación y la cadena de suministro de calzado. En este capítulo se emplean eventos discretos para representar eventos críticos en la producción como la elaboración y almacenamiento de calzado en el almacén de productos terminados, así como la llegada de materiales, el inicio de la producción, el control de calidad, el empaque y el envío al almacén, entre otros.

La simulación de eventos discretos en la industria del calzado puede ser de gran valor para la optimización de los procesos de producción, ya que permite evaluar cómo diferentes configuraciones de líneas de producción, procesos de ensamblaje y sistemas de control de calidad afectan el rendimiento y la eficiencia en la fabricación de calzado. En resumen, esta técnica se presenta como una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y facilitar la toma de decisiones informadas en un sector altamente competitivo.

La capacidad de las empresas del sector para modelar y analizar sus operaciones en un entorno virtual antes de implementar cambios en el mundo real constituye un beneficio significativo. Esto no sólo contribuye a una mayor rentabilidad, sino también a una mayor satisfacción del cliente al permitir ajustes precisos y estratégicos en los procesos de fabricación y gestión de la cadena de suministro. En última instancia, la simulación de eventos discretos se erige como una herramienta estratégica que posibilita a las empresas del sector anticipar escenarios, optimizar sus recursos y enfrentar los desafíos de manera más efectiva en un entorno empresarial dinámico y competitivo.

El capítulo se estructura de la siguiente manera: Inicialmente, se examinan los desafíos que enfrentan las empresas y su interés en la aplicación de la simulación de eventos discretos (SED). A continuación, se detalla la SED y se revisa su desarrollo actual, incluyendo ejemplos de implementación tanto a nivel internacional como en México, con un enfoque particular en la industria del calzado. Se destacan las aplicaciones prácticas de los autores,

enfaticando la metodología utilizada y los resultados obtenidos. El capítulo concluye con las reflexiones finales sobre el estudio realizado.

Motivación y problemas de las empresas

Las empresas eligen adoptar la simulación por diversas razones como la necesidad de tomar decisiones fundamentadas (Greer, 2017), el interés en incorporar la simulación en las actividades diarias (Hughes, 2009) y los posibles beneficios en la toma de decisiones en el ámbito manufacturero como probar ideas de producción o de Cadena de Suministro previo a la implementación (Hollocks, 1995).

No obstante, se presentan desafíos, entre ellos la aceptación por parte del personal, la disponibilidad de datos y las expectativas de la alta dirección (Centeno, 2001); otro de los desafíos es enfocarse más en el diseño que en la toma de decisiones operativa (Bapat y Pruitte, 1998). El éxito en la implementación de la simulación radica en la efectiva gestión de estos desafíos (Centeno, 2001). La eficacia de la simulación se debe a su capacidad para abordar la realidad, permitiendo la evaluación de soluciones propuestas en comparación con las operaciones actuales (Pritsker, 1989). Además, el creciente uso de la simulación en el ámbito empresarial se atribuye al desarrollo de software de fácil manejo (Greasley, 2017).

La simulación ha sido usada por mucho tiempo debido a la popularidad de la reingeniería de procesos, el desarrollo de softwares amigables al usuario y el soporte proporcionado por las empresas que ofrecen softwares de simulación (Greasley, 2017). Adicionalmente, su capacidad para administrar el cambio en un ambiente complejo (Bapat y Pruitte, 1998) ofrecen la posibilidad a las empresas de explorar diferentes escenarios, tomando en cuenta lo que otras metodologías no hacen, como la reducción de los costos (Ingallis, 1998).

Con la industria 4.0, la simulación tuvo aún más auge pues abarca un conjunto indispensable de herramientas y métodos tecnológicos para la implementación exitosa de la fabricación digital, ya que permite la experimentación y validación del diseño y configuración de productos, procesos y sistemas (Mourtzis, 2014). Especialmente en el entorno de fabricación ac-

tual, que se ve afectado por mega tendencias como la globalización y requisitos cada vez mayores de personalización y adaptación del producto, se hace evidente el valor de la simulación. La simulación de sistemas de fabricación se presenta como una herramienta poderosa para diseñar y evaluar sistemas de fabricación debido a su bajo costo, análisis rápido, bajo riesgo e información significativa (Mourtzis, 2020). El impulso hacia la digitalización de la fabricación en el contexto de la cuarta Revolución Industrial ha dado forma a la simulación en el diseño y la operación de sistemas de fabricación, dando lugar a nuevos enfoques en la literatura especializada. Las tecnologías en las fábricas digitalizadas del futuro están ganando terreno en las aplicaciones industriales de la simulación, ofreciendo múltiples ventajas.

Por estas razones, cada vez más empresas incorporan a su práctica diaria el uso de la simulación, ya sea utilizando un servicio externo y/o desarrollando sus propios modelos, esto tiene que ver con los costos y las habilidades del personal al hacer simulación (Greer y Franklin, 2017).

Simulación de eventos discretos

La simulación de eventos discretos es una técnica de modelado diseñada para sistemas con cambios de estado discretos que tuvo sus inicios a finales de la década de 1950 y ha sido ampliamente empleada en diversas industrias desde entonces (Hollocks, 2006). Ha experimentado una evolución notable, incorporando avances recientes como el modelado visual interactivo, la optimización de simulaciones y la integración con otros programas (Robinson, 2005). A pesar de los desafíos enfrentados, especialmente en el ámbito de la manufactura global y la economía del conocimiento, sigue siendo una herramienta valiosa para respaldar la toma de decisiones (Ing *et al.*, 2007). Existe una llamada a desarrollar una nueva generación de software para simulación de eventos discretos (Ing *et al.*, 2007) que incorpore cada vez más restricciones, y se ha resaltado la aplicación de esta técnica en el modelado del rendimiento humano y los procesos de toma de decisiones en sistemas híbridos de manufactura y servicios (Babulak, 2008).

Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos modelos ma-

temáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo (Coss, 2013). La simulación se define como una representación de los acontecimientos en un sistema real. Cuando se cuentan con datos precisos, es posible inferir cómo opera dicho sistema. Un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados que persiguen un objetivo común, según lo señalado por Checkland (2000). En términos de clasificación, los sistemas pueden dividirse en determinísticos y estocásticos. Mientras que los primeros permanecen constantes en el tiempo, los segundos están sujetos a la aleatoriedad. Además, existe la clasificación entre sistemas discretos y continuos; los primeros describen variables aleatorias con particiones definidas en el tiempo, mientras que los segundos se centran en variables aleatorias continuas o con un tiempo determinado en un intervalo.

La variable aleatoria, por su parte, se define como un número real que cuantifica una característica de interés en un experimento aleatorio. Se trata de una función en la que cada elemento del espacio muestral se corresponde con un valor específico de la variable. Para ilustrar este concepto, se presenta a continuación un cuadro que ejemplifica el significado de variable aleatoria.

Cuadro 7.1. *Variable aleatoria*

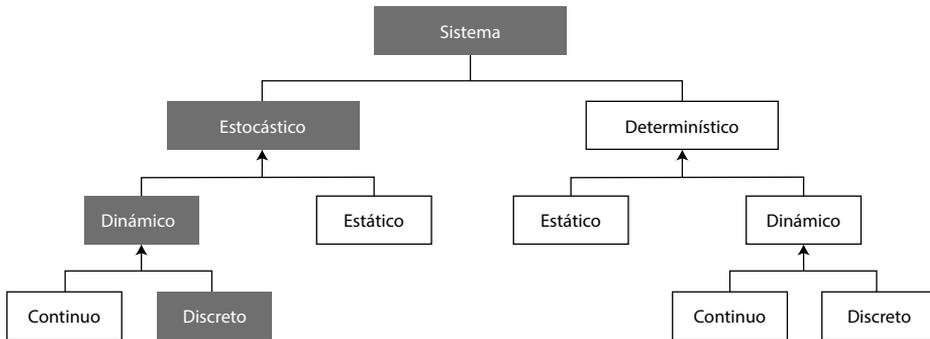
<i>Experimento aleatorio</i>	<i>Lanzar dos monedas</i>
Espacio muestral (Ω): Todos los resultados del experimento aleatorio	
Variable aleatoria (X): tiene 3 características: Es un resultado de interés del experimento aleatorio. Es un número real (ω). Es una función donde a cada elemento (ω) le corresponde uno de (X) Para este caso, sea (X) el número de soles encontrados en el lanzamiento de las dos monedas.	Variable aleatoria discreta: Toma valores aislados. Variable aleatoria continua: Toma valores en el

Fuente: elaboración propia.

Las variables que se describen mediante la simulación de eventos discretos son, como su nombre indica, variables discretas. En este contexto, se realiza una partición específica en el tiempo para detallar en qué estado se encuentra el sistema. Para comprender los tipos de sistemas que se abordan

a través de eventos discretos, observe la figura 7.1, el ejemplo es un sistema estocástico desde el punto de vista que los tiempos en que se realizan los procesos están sujetos a la aleatoriedad, es dinámico, pues cambia con el tiempo, no es lo mismo lo que sucede en el minuto 3 que, en el 100, y es discreto pues se realizan particiones específicas en el tiempo para observar y describir los procesos.

Figura 7.1. Clasificación de sistemas



Fuente: elaboración propia tomando como base Rossetti (2016).

La simulación, según Rossetti (2016), no sólo puede ser estocástica, dinámica y discreta, sino que también se puede clasificar como descriptiva o predictiva. El enfoque descriptivo se centra en la descripción detallada del sistema y sus interacciones. Tomando como ejemplo un sistema de manufactura, esta modalidad de simulación permite visualizar el movimiento de los productos a lo largo de las operaciones, la participación de los recursos (máquinas y obreros), y facilita la identificación de operaciones subutilizadas o sobre utilizadas. Al simular a lo largo de un periodo extenso, se obtiene una comprensión del tiempo promedio que tarda un producto en ser procesado desde que ingresa al sistema hasta que sale del mismo. Además, proporciona el promedio del número de productos que pueden completarse en un turno de trabajo (productividad). Estos indicadores resultan cruciales para la toma de decisiones y la comprensión global del sistema.

En contraste, la simulación predictiva se basa en la prueba de diversos escenarios. En el contexto de un sistema de manufactura, implica la evaluación de diferentes cantidades de recursos (máquinas u obreros) o la varia-

ción en la disposición de las máquinas. La comparación de estos escenarios permite determinar cuál opción resulta más conveniente en términos de indicadores específicos. Este enfoque encarna el principio de optimización en la simulación, que consiste en buscar la mejor solución posible entre diversas alternativas. Este proceso implica la realización de múltiples simulaciones con configuraciones o parámetros variables, evaluando de manera sistemática el rendimiento de cada opción para identificar la más eficiente o efectiva con el propósito de mejorar el rendimiento o alcanzar objetivos predefinidos en el sistema.

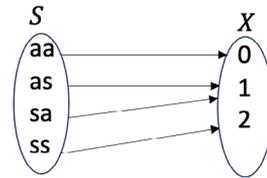
El método de la transformada inversa para hacer simulación

En numerosas situaciones de la vida real, los procesos de llegada y servicio suelen suceder de manera aleatoria, y esta variabilidad puede ser modelada de manera efectiva. La estrategia óptima consiste en construir un modelo de probabilidad basado en datos históricos. Utilizando números aleatorios distribuidos uniformemente en el intervalo $(0,1)$, se puede recrear de manera precisa el comportamiento real de estos procesos. Este enfoque no sólo permite capturar la naturaleza aleatoria de las ocurrencias, sino que también proporciona una representación fiel de la variabilidad inherente a las situaciones del mundo real. La utilización de datos históricos y la generación de números aleatorios proporciona una herramienta valiosa para simular y comprender la complejidad de los eventos aleatorios en diversos contextos, contribuyendo así a una modelización más precisa y útil de fenómenos realistas.

Para explicar un poco cómo funciona el concepto de transformada inversa, tomaremos como base el ejemplo del experimento aleatorio que consiste en el lanzamiento de dos monedas del cuadro 7.1. El siguiente paso consiste en construir la función de densidad de probabilidad utilizando el concepto de probabilidad frecuentista, y posteriormente construir la función de densidad acumulada, este cálculo depende de si la variable aleatoria es discreta o continua, y a partir de esta acumulada se construye el método de la transformada para hacer simulación como se muestra en la cuadro 7.2.

Cuadro 7.2. Método de la transformada inversa

Variable aleatoria: sea X (el número de soles encontrados en el lanzamiento de las dos monedas.



Función de densidad de probabilidad en este caso los eventos del espacio muestral Ω son en total 4. Se revisan los eventos equivalentes, es decir, que 0 soles, es el evento $\{aa\}$, como en este caso es 1 solo en el evento la probabilidad frecuentista es 1 entre 4. En el caso de 1 sol, son 2 eventos $\{as, sa\}$, por lo tanto, la probabilidad es $2/4$.

0	1/4
1	1/2
2	1/4

Función de densidad de probabilidad acumulada como es el caso discreto, simplemente se suman las probabilidades es decir

0	1/4	1/4
1	1/2	3/4
2	1/4	1

Método de la transformada inversa: aprovechando que la $F(x)$ está definida entre 0 y 1, se generan números aleatorios uniformemente distribuidos entre 0 y 1 y si el valor entre 0 y el primer valor de la $F(x)$ entonces el valor de la variable aleatoria es x es decir que de las dos monedas lanzadas son 1 sol y 1 águila en los dos lanzamientos.

Transformada inversa

0.18	0
0.83	2

Entonces si genero los siguientes aleatorios entre cero 1 el valor de variable X simulada (sin hacer ningún lanzamiento) es:

Fuente: elaboración propia.

Revisión del estado del arte

La simulación de eventos discretos (SED) se ha aplicado con éxito en diversos aspectos de las empresas manufactureras. Johansson (2002) y Vaidyanathan (1998) han demostrado su potencial para mejorar el rendimiento y la programación de la producción, respectivamente. Sin embargo, la complejidad de la tecnología de SED puede convertirse en un obstáculo para su pleno aprovechamiento (Johansson, 2009). Semini (2006) y Qiao (2021) ofrecen una visión integral de sus aplicaciones en la toma de decisiones logísticas de manufactura y en el software de simulación de plantas, respectivamente. Además, Hussain

(2019) y Smith (1994) resaltan su papel en el respaldo a la metodología Seis Sigma y en el control del piso de producción en organizaciones manufactureras.

Qiao y Wang (2021) realizan una revisión de las aplicaciones del software Plant Simulation que es un software de eventos discretos que se usa en sistemas de manufactura, observando que las aplicaciones son principalmente en configuración de las áreas de producción, ruteo, distribución del material desde inventarios hasta producción, etc. Sin embargo, marcan como área de oportunidad, la optimización de parámetros de producción, incorporar más restricciones que incorporen escenarios reales, entre otras. Este fue una de las áreas de oportunidad observadas cuando se implementó la SED en los casos que presentamos a continuación.

La utilización de la simulación de eventos discretos en empresas mexicanas es un ámbito que no ha sido ampliamente estudiado. Sin embargo, diversos autores han resaltado los beneficios potenciales de esta tecnología en la toma de decisiones, reducción de costos y optimización de procesos en diversas industrias (Castrillón, 2008; Lendermann *et al.*, 2003; Rincón y Perez, 2004; Goti, 2010; Ing *et al.*, 2005; Hussain *et al.*, 2019). Se ha aplicado con éxito en la industria del mueble (Castrillón, 2008) y la industria petrolera (Rincón y Perez, 2004; Ing *et al.*, 2005), y se ha recomendado su uso en la gestión de cadenas de suministro (Lendermann *et al.*, 2003; Wang e Ingham, 2008) y la mejora de procesos en organizaciones manufactureras (Hussain *et al.*, 2019). A pesar de ello, se ha subrayado la necesidad de desarrollar una nueva generación de software de simulación de eventos discretos (Goti, 2010; Ing *et al.*, 2007).

Algunos trabajos encontrados de aplicaciones en empresas mexicanas del 2018 a la fecha se muestran a continuación. Muñoz-Villamizar *et al.* (2021) desarrollan un modelo de simulación de eventos discretos para entender y comparar el impacto de ciertos parámetros (ventanas de entrega, políticas de gestión de inventario, tipo de camión) en la sostenibilidad de la logística de entrada. Se valida con el mayor minorista de México para analizar la sostenibilidad del envío rápido y reducir su impacto ambiental.

González-Resendíz *et al.* (2018) definen un costo de distribución óptimo para productos enviados a clientes mayoristas en diferentes ciudades de México desde una planta en Tijuana. Utilizan simulación de eventos discretos para modelar virtualmente el proceso logístico, permitiendo experimen-

tos con diseño de superficie de respuesta para optimizar parámetros clave. Villagómez *et al.* (2019) demuestran cómo la simulación de eventos discretos con ciclos de investigación-acción respalda la toma de decisiones en la mejora de procesos en el sector automotriz, considerando el consumo de energía, estrategias de mantenimiento y procesos sostenibles.

Chavarría-Barrientos *et al.* (2018) presentan herramientas emergentes para el soporte de decisiones en la fabricación digital, proponiendo una metodología para guiar el diseño y la operación de sistemas de producción mediante la simulación de eventos discretos. González *et al.* (2018) ofrecen un enfoque aplicable para la optimización simultánea de variables de respuesta en un proceso de almacén, utilizando simulación y la metodología de superficie de respuesta para modelar y analizar eficientemente un sistema multivariado.

Estos trabajos muestran la efectividad de la SED en casos aplicadas, especialmente aplicados a procesos relacionados con sistemas de producción. En cuanto a las empresas de calzado industrial en México se encontró el primer caso de estudio que explicaremos a continuación (Calderón-Andrade *et al.*, 2020). Woldemicael (2019) presenta un estudio a nivel internacional sobre la reducción de perturbaciones en la producción de una industria de fabricación de calzado mediante la simulación de eventos discretos. El estudio se lleva a cabo en la fábrica de calzado Peacock, ubicada en Addis Abeba, Etiopía. La fábrica enfrenta problemas de equilibrio de líneas que afectan la producción en sus líneas de ensamblaje. Se realiza un estudio detallado del tiempo para un modelo de calzado seleccionado utilizando un cronómetro. Se utiliza un gráfico de proceso de ensamblaje para comprender la secuencia cronológica de las operaciones. Se emplea el analizador de entrada de Arena para ajustar los datos de entrada y se realiza una prueba K-S para validar la bondad del ajuste. Así, se desarrolla un modelo de simulación para las líneas de ensamblaje existentes de costura, duración y acabado, considerando suposiciones básicas de simulación.

Amjad *et al.* (2022) utilizaron la simulación de eventos discretos para mejorar la productividad laboral en una destacada empresa de fabricación de calzado en Pakistán. El estudio se centró en el departamento de duración, abarcando diecinueve procesos vitales necesarios para lograr la forma final del calzado. Se realizó un análisis exhaustivo de todas las operaciones y se reco-

pilaron datos confiables sobre los tiempos de ciclo. Se llevó a cabo un análisis estadístico para determinar la distribución sugerida de todos los procesos.

Casos de estudio en empresas de calzado mexicanas

Empresa 1

Es una empresa con tradición zapatera de más de 75 años de experiencia, dedicados a la fabricación de calzado de seguridad en el estado de Hidalgo, México. Se solicitó realizar un estudio debido a las deficiencias que presentaba el Área de decorado, siendo ésta la penúltima área de producción dentro de la empresa x (por motivos de confidencialidad se nombra expresa x). Durante los cuatro meses, se observaron los procesos, el personal, la maquinaria, y el equipo adicional del proceso; se recolectó información y conforme avanzó la estadía en la empresa, se observó un mal flujo de materiales que ocasionaba retrasos, se realizó la toma tiempos de cada actividad que conformaba este proceso; pero en ese momento no se encontró una metodología que permitiera dar solución a dicho problema y que además sustentara teóricamente cualquier decisión que fuera a tomarse.

El enfoque de este trabajo fue práctico, orientado a mejorar los procesos. Se realizó un análisis exhaustivo del proceso actual y sus deficiencias mediante la reingeniería, que luego se utilizaron para proponer un cambio. La propuesta fue evaluada mediante Simulación. Este método de fusión de reingeniería y simulación puede ser aplicado en otras empresas, especialmente en pequeñas y medianas, con adaptaciones necesarias, para más información puede revisar el trabajo de Calderón-Andrade *et al.* (2020).

Metodología

Como se mencionó, el problema de la baja productividad en la Línea 1 de Decoración fue abordado mediante la reingeniería del proceso. Se propuso mejorar indicadores como la cantidad de productos al final del turno, uso de recursos e inventario en cada actividad. Se recolectaron datos y se reali-

zaron análisis estadísticos para establecer patrones de comportamiento. Los tiempos de producción de la Línea 1 fueron utilizados en la Simulación para comparar el diseño actual con la propuesta.

Análisis del proceso y propuesta

La propuesta surgida en esta fase consideró la fusión de ambas líneas de decoración debido a su viabilidad económica. Se descartaron otras ideas que podrían generar problemas entre los trabajadores o costos económicos no asumibles en ese momento. La distribución de maquinaria y equipos en la propuesta cambió, creando un nuevo diseño de planta con un flujo más lógico y eficiente. La propuesta fue validada mediante Simulación en el software Arena™.

Simulación

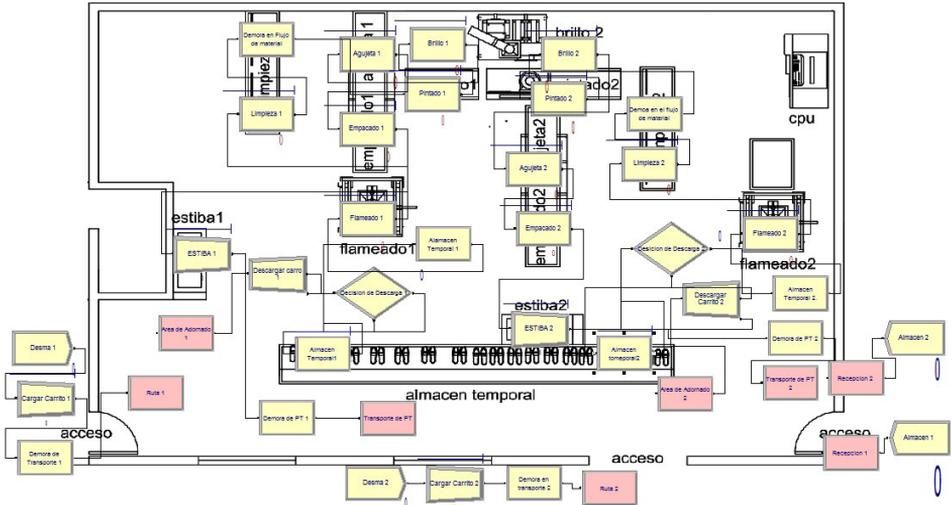
Para comparar el proceso actual con la propuesta, se ejecutó una simulación utilizando la metodología sugerida por Kelton(2008). Esta metodología Se definieron sistemas para replicar el proceso actual y la propuesta. Se formularon modelos conceptuales para cada situación y se recopilieron datos de tiempos durante febrero a abril de 2019. La implementación de la Simulación se realizó en el software Arena™.

Implementación

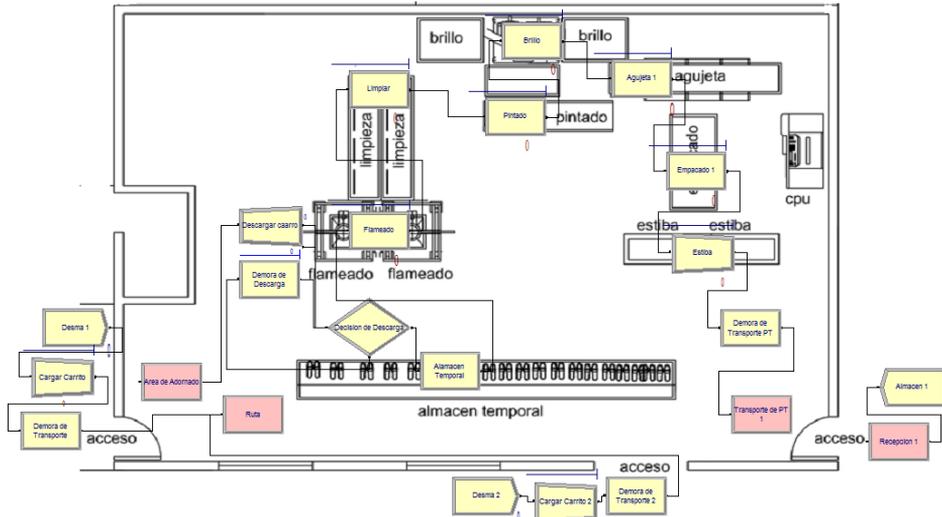
La propuesta fue validada a través de simulación y se llevó a cabo una reunión para discutir la necesidad de rediseñar el área de decoración. Se formó un equipo de reingeniería, liderado por el gerente de calidad, con representantes de ingeniería, recursos humanos y almacenes. La implementación se realizó en 35 días, siguiendo un plan detallado que incluía la redistribución de recursos y cambios en el flujo de trabajo. A continuación, se muestran en el figura 7.2 el modelo inicial (a) y la propuesta (b) realizados en el software Arena™.

Figura 7.2. Modelo en Arena™ (a) sistema actual con dos líneas diferentes, (b) en la propuesta las dos líneas se fusionan en forma de U

a)



b)



Fuente: elaboración propia.

Resultados

La empresa sólo permitió discutir la implementación de manera general, pero los resultados históricos mostraron un aumento de productividad superior al pronosticado por la simulación. El cuadro 7.3 se muestra una comparación entre el sistema inicial y la propuesta en términos de producción promedio por día.

Cuadro 7.3. Comparación de indicadores del proceso, producción promedio por día: actual-propuesta

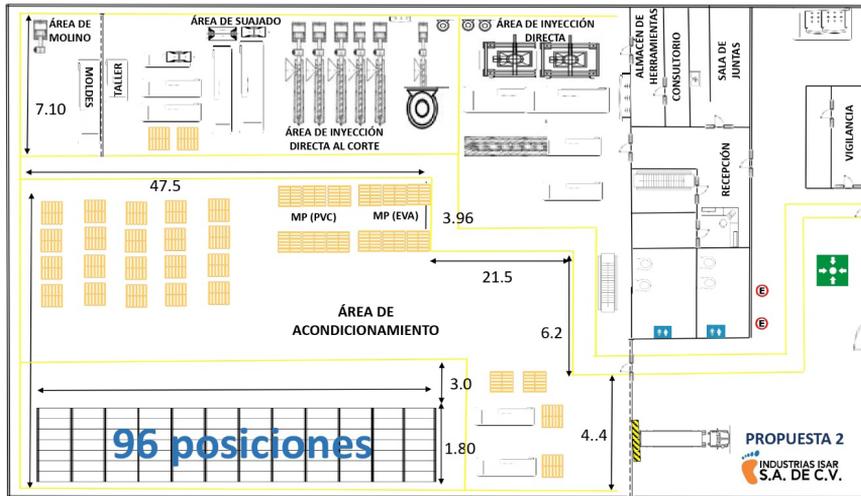
<i>Producción promedio por día</i>				
Actividad	<i>Proceso Actual</i>			<i>Propuesta</i>
	Línea 1	Línea 2	Total	Utilizando mismos recursos humanos
Flameado	975.00	991.00	1966.00	2856.00
Limpieza	834.00	863.00	1697.00	2154.00
Pintura	816.00	850.00	1666.00	2144.00
Brillo	816.00	840.00	1656.00	2142.00
Colocación agujeta	814.00	848.00	1662.00	2139.00
Empaque	814.00	847.00	1661.00	2138.00

Fuente: elaboración propia tomando en consideración los resultados proporcionados por Arena™.

Empresa 2

La empresa Industrias Isar se posiciona como un referente destacado en la industria del calzado de playa (aquashoes) destacando por su compromiso con la calidad, el diseño innovador y su enfoque sostenible. Fundada en 2017, la compañía ha experimentado un crecimiento constante, consolidándose como una marca confiable y respetada en el mercado.

Figura 7.3. Plano 1, instalaciones antes de realizar la mejora



Fuente: elaboración propia.

Metodología

En este caso también se utilizó la metodología de Kelton(2008) para realizar la simulación que consiste de los siguientes pasos:

- Definición del problema y objetivos:* A partir de la observación, análisis y trabajo colaborativo se llegó al problema: estaciones de trabajo sobrecargadas, aumento de costos operativos y falta de eficiencia en la producción. El objetivo es la mejora de distribución, reducción de demoras, control de costos operativos e incremento de la eficiencia general con el objetivo de lograr la mejora continua.
- Desarrollo del modelo conceptual:* En este punto se identificaron las estaciones de trabajo, recepción de corte, máquina de inyección directa al corte, detallado de calzado, suajado de plantilla, área de colocación de transfer y emplantillado, envío de producto terminado al almacén. En este paso, también se definen los parámetros: tiempo de procesamiento en estaciones de trabajo, tiempos de espera en colas y tiempos de transporte.

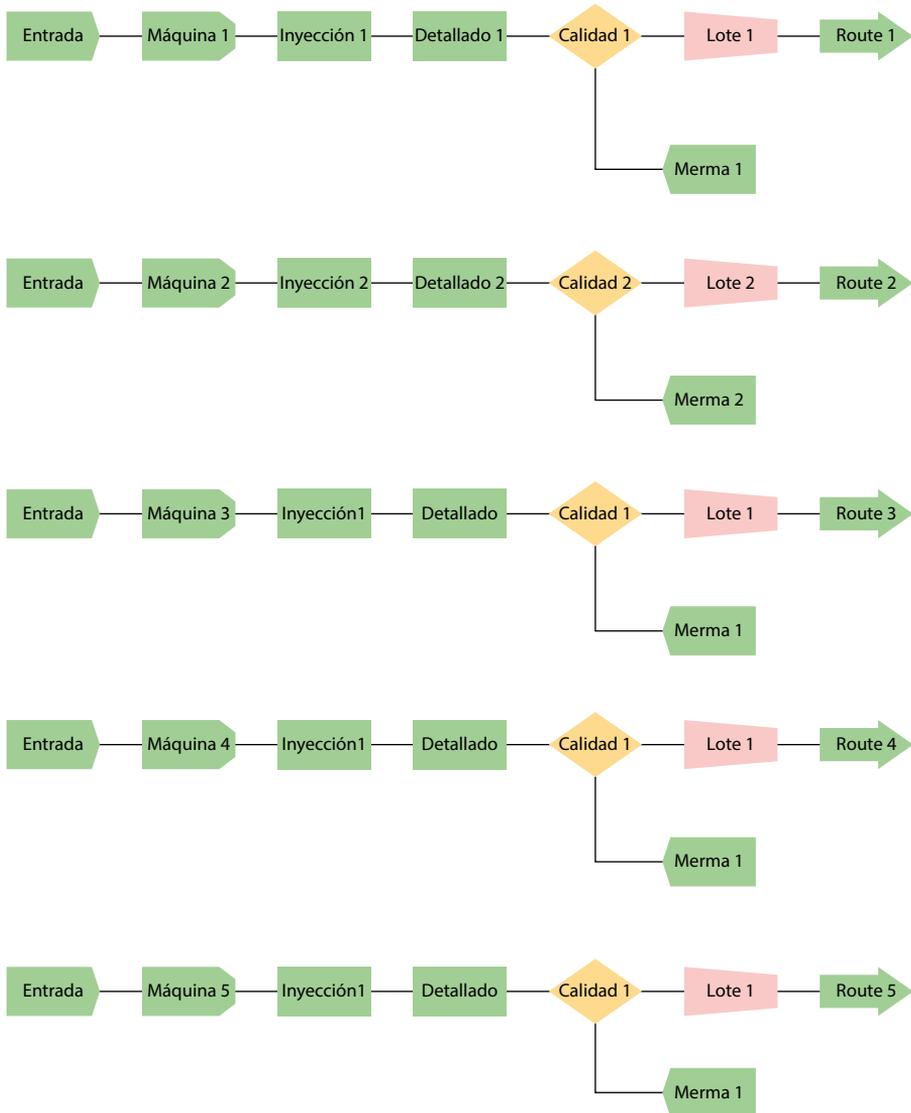
- c) *Colección de datos*: tiempo de procesamiento en estaciones de trabajo, tiempos de espera en colas y tiempos de transporte, tomados en diferentes días en un periodo de 3 meses.
- d) *Desarrollo del modelo de simulación*: Este se modeló en el software Arena[™].
- e) *Verificación del modelo*: Se revisó el modelo conceptual y se aseguró que todos los componentes clave, procesos y relaciones se hayan traducido correctamente al modelo de Arena[™].
- f) *Validación del modelo*: Se compararon los datos de la producción real con los resultados de la simulación para garantizar que el modelo tenga una representación precisa del sistema.
- g) *Diseño de experimentación en la simulación*: Se simuló diferentes escenarios haciendo corridas largas (30 días, 30 réplicas) variando la velocidad de las máquinas, la asignación de recursos, cambios con alta, media y baja demanda.
- h) *Recopilación de datos y análisis de resultados*: Los resultados de la simulación son proporcionados a través del software y se realiza el análisis a través de la exportación de datos, generación de gráficos y reportes, estadística descriptiva, estadística inferencial (intervalos de confianza), análisis del desempeño de recursos.
- i) *Interpretación de resultados*: Se realizó la comparación entre la propuesta y el proceso actual.
- j) *Documentación y presentación*: Presentación del proyecto a Dirección General.

Análisis del proceso y propuesta

La reubicación de las instalaciones brindó la oportunidad de crear un nuevo espacio de trabajo y realizar mejoras en la distribución existente. La disposición anterior de maquinaria y equipo en el área de producción era inadecuada, generando cuellos de botella significativos que afectaban negativamente la fluidez del proceso. Algunas estaciones de trabajo estaban sobrecargadas, mientras que otras operaban por debajo de su capacidad máxima, causando desequilibrios en la cadena productiva. Esto resultaba

en demoras en la entrega de pedidos, un aumento en los costos operativos y una notoria disminución en la eficiencia general de la producción. La implementación se llevó a cabo en el Software Arena™, en la figura 7.4 se observa el modelo rediseñado.

Figura 7.4. Modelo del escenario rediseñado en software Arena™



Fuente: elaboración propia.

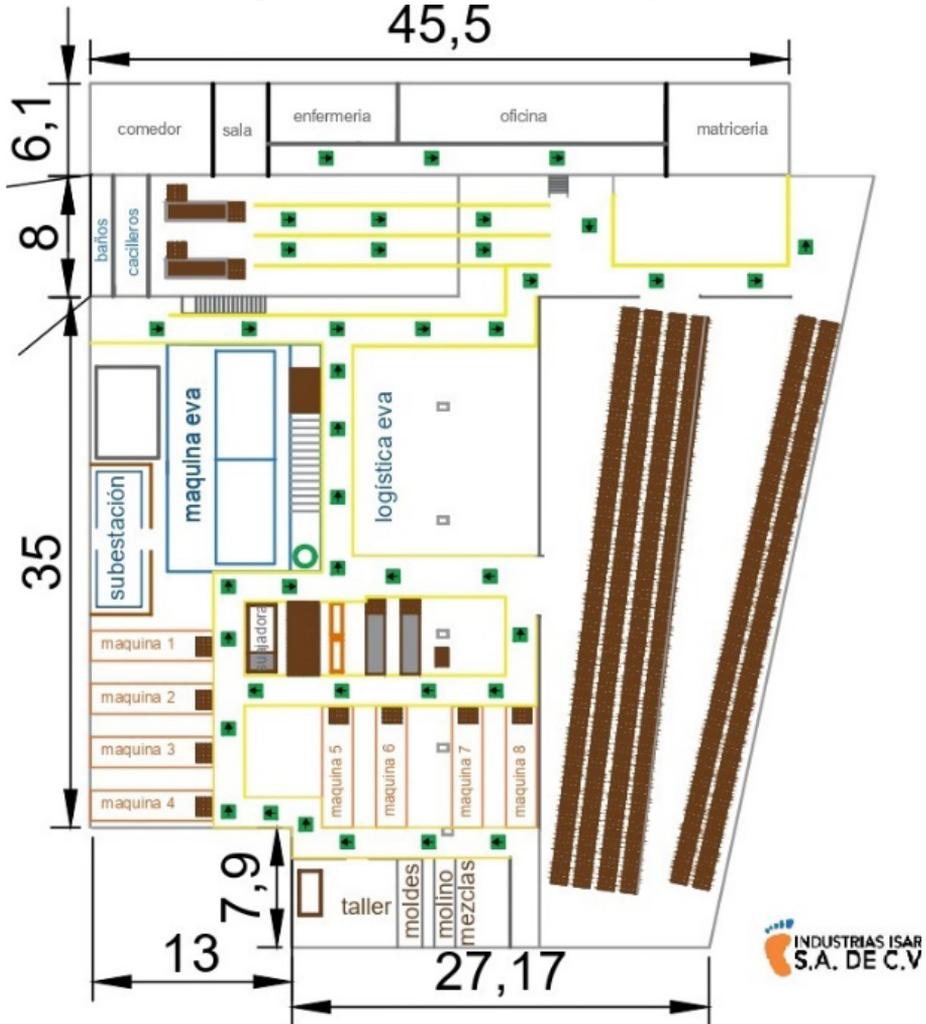
Después de las realizar corridas se logró identificar con precisión los puntos críticos y los cuellos de botella en la línea de producción. También se evaluaron diferentes escenarios de producción sin exponerse a riesgos operativos reales. Además, se optimizó el uso de recursos y los tiempos de ciclo, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia general del proceso productivo. Finalmente, se desarrolló un pronóstico sobre la capacidad de producción y la flexibilidad de la línea para adaptarse a variaciones en la demanda del mercado. En el cuadro 7.4 se compara la producción anterior con la propuesta y se calcula un porcentaje de incremento.

Cuadro 7.4. *Comparación de producción por máquina del incremento, promedio por día: Plano 1- Plano 2*

<i>Producción promedio de pares por día</i>			
<i>Actividad</i>	<i>Plano 1</i>	<i>Plano 2</i>	<i>Incremento</i>
Máquina 1	475	610	22%
Máquina 2	485	635	24%
Máquina 3	520	625	17%
Máquina 4	490	615	20%
Máquina 5	580	648	10%
Máquina 6	510	655	22%
TOTAL	3060	3788	19%

Fuente: elaboración propia tomando en consideración los resultados proporcionados por Arena™.

Figura 7.5. Plano 2, instalaciones con la mejora



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones y recomendaciones

La simulación de eventos discretos en la industria del calzado se aplica para analizar y optimizar procesos en la fabricación y cadena de suministro. Este enfoque se emplea para representar eventos críticos, como elaboración, al-

macenamiento, llegada de materiales, producción, control de calidad, empaque y envío. Permite evaluar configuraciones de líneas de producción, procesos y sistemas de control de calidad para mejorar la eficiencia en la fabricación de calzado. La simulación proporciona una herramienta estratégica para anticipar escenarios, optimizar recursos y tomar decisiones informadas en un entorno competitivo.

El capítulo también destaca la motivación y los desafíos que enfrentan las empresas al adoptar la simulación, como la necesidad de decisiones fundamentadas y la gestión de expectativas. Se resalta la importancia de la simulación en la industria 4.0, donde se ha vuelto crucial para la implementación exitosa de la fabricación digital. Además, se explora la clasificación de sistemas y la variable aleatoria en el contexto de la simulación de eventos discretos. Se describe cómo la simulación puede ser descriptiva o predictiva, proporcionando una comprensión detallada del sistema o evaluando diferentes escenarios para optimización.

El método de la transformada inversa se menciona como una estrategia efectiva para modelar procesos aleatorios basados en datos históricos, utilizando números aleatorios distribuidos uniformemente para recrear el comportamiento real. Este enfoque contribuye a una modelización precisa de fenómenos realistas en situaciones de variabilidad.

El uso de la simulación de eventos discretos (SED) ha demostrado éxito en mejorar el rendimiento y la programación de la producción en empresas manufactureras a nivel internacional, según estudios como los de Johansson (2002) y Vaidyanathan (1998). Aunque ha sido aplicada con eficacia en diversos sectores en México, como la industria del mueble y petrolera, se destaca la necesidad de desarrollar una nueva generación de software de SED (Goti, 2010; Ing *et al.*, 2007). Trabajos recientes en empresas mexicanas, como el de Muñoz-Villamizar *et al.* (2021) en logística sostenible, resaltan la importancia de avanzar en aplicaciones más complejas de SED, indicando oportunidades en la optimización de parámetros y la incorporación de restricciones realistas. El estudio de Calderón-Andrade *et al.* (2020) destaca la relevancia de la SED en la mejora de la producción de calzado industrial. Estos casos subrayan la necesidad de seguir trabajando en el desarrollo y aplicación futura de la SED para optimizar procesos y tomar decisiones informadas en diversas industrias.

En el primer caso de estudio de empresas de calzado industrial, se utilizaron la Reingeniería y la Simulación para abordar problemas en una empresa de calzado. Se analizaron indicadores como el porcentaje de uso de cada actividad y la producción final de pares de zapatos en el área de decoración. La fusión de las líneas mejoró significativamente la eficiencia, superando el proceso actual. Se observó que la actividad de Pintura estaba subutilizada debido a altos inventarios generados en la actividad de Limpieza. Se realizaron simulaciones en Arena™ para comparar modelos originales y propuestos, utilizando las mismas distribuciones de probabilidad y personal. La propuesta, tras optimizar recursos con la herramienta de Arena™ Opt-Quest, aumentó la producción diaria en un 41%. La implementación en la empresa resultó en mejoras notables, como un uso más eficiente del espacio y recursos. Aunque no se aportaron contribuciones teóricas, se destacan los aportes prácticos para mejorar procesos y realizar análisis exhaustivos.

En el segundo caso, Industrias Isar se aplicó la metodología de simulación para optimizar su producción. Se redefinieron los procesos para aliviar estaciones sobrecargadas y reducir costos, usando el software Arena™ para el rediseño. Tras simular distintos escenarios y analizar datos, se ajustaron recursos y procesos, logrando identificar cuellos de botella y mejorar la eficiencia. La nueva disposición de las instalaciones y la mejor distribución de tareas permitieron aumentar la capacidad de producción y la adaptabilidad a la demanda, evidenciando un incremento porcentual en la productividad según el cuadro 4. Estos casos muestran la utilidad de la simulación de eventos discretos a empresas de calzado, pero la metodología de simulación por si sola o su combinación con otras como Reingeniería puede traer mejoras significativas a las organizaciones.

Bibliografía

- Amjad, A., Shah, Z. A., Ramzan, I. y Khan, S. (2022). Optimizing production efficiency in Pakistani shoe manufacturing: A simulation-based analysis. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Bapat, V. y Pruitte, E. B. (1998). Using simulation in call centers. In *1998 Winter Simulation Conference Proceedings* (Vol. 2, pp. 1395-1399). IEEE.
- Babulak, E. y Wang, M. (2008). Trends in discrete event simulation. In *UKSIM European*

- Symposium on Simulation Conference Proceedings* (Cat. No. 98CH36274) (Vol. 2, pp. 1395-1399). IEEE.
- Calderón-Andrade, R., Hernández-Gress, E. S. y Montufar Benítez, M. A. (2020). Productivity improvement through reengineering and simulation: A case study in a footwear industry. *Applied Sciences*, 10(16), 5590. <https://doi.org/10.3390/app10165590>
- Castrillón, J. V. (2008). La simulación de procesos, clave en la toma de decisiones. *DYNA-Ingeniería e Industria*, 83(4).
- Centeno, M. A. y Carrillo, M. (2001, December). Challenges of introducing simulation as a decision-making tool. En *Proceeding of the 2001 Winter Simulation Conference* (Cat. No. 01CH37304), Vol. 1, pp. 17-21. IEEE.
- Chavarría-Barrientos, D., Villagomez, L. E., Miranda, J., Molina, A., Batres, R., Gutierrez, I. y Puente, J. (2018). A methodology to support manufacturing system design using digital models and simulations: An automotive supplier case study. *IFAC-PapersOn-Line*, 51(11), 1598-1603. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.330>
- Checkland, P. (2000). *Pensamiento de sistemas, práctica de sistemas*. Limusa.
- Coss, R. (2003). *Simulación: Un enfoque práctico*. Limusa.
- González-Reséndiz, J., Arredondo-Soto, K. C., Realyvásquez-Vargas, A., Híjar-Rivera, H. y Carrillo-Gutiérrez, T. (2018). Integrating simulation-based optimization for lean logistics: A case study. *Applied Sciences*, 8(12), 2448. <https://doi.org/10.3390/app8122448>
- Greer, A. B. y Franklin, M. M. (2017, December). Key considerations for starting or maintaining your simulation department. In *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 4421-4421. IEEE.
- Greasley, A. (2017). *Simulation modelling for business*. Routledge.
- Hollocks, B. W. (1995). The impact of simulation in manufacturing decision making. *Control Engineering Practice*, 3(1), 105-112.
- Hughes, R. W. y Perera, T. (2009). Embedding simulation technologies into business processes: Challenges and solutions. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 5(3), 184-191.
- Hussain, A., Munive-Hernández, J. E. y Campean, I. F. (2019). Developing a discrete event simulation methodology to support a six-sigma approach for manufacturing organization - Case study. In *Proceedings of the 3rd European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, July 23-26, Pilsen, Czech Republic. <http://hdl.handle.net/10454/17052>
- Ingallis, R. G. (1998). The value of simulation in modeling supply chains. In *1998 Winter Simulation Conference Proceedings* (Cat. No. 98CH36274), Vol. 2, pp. 1371-1375. IEEE.
- Ing, E., Babulak, E. y Wang, M. (2010). Discrete event simulation: State of the art. In *Discrete Event Simulations*, pp. 1-9. InTech.
- Kelton, D., Sadowski, R. y Sturrock, D. (2008). *Simulation with Arena* (4th ed.). McGraw Hill.
- Lendermann, Julka, Chan y Gan. (2003). Integration of discrete event simulation models with framework-based business applications. In *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 2003*, Vol. 2, pp. 1797-1804. IEEE.

- Mourtzis, D., Doukas, M. y Bernidaki, D. (2014). Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 25, 213-229.
- Mourtzis, D. (2020). Simulation in the design and operation of manufacturing systems: State of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1927-1949. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652776>
- Muñoz-Villamizar, A., Velázquez-Martínez, J. C., Haro, P., Ferrer, A. y Mariño, R. (2021). The environmental impact of fast shipping ecommerce in inbound logistics operations: A case study in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 283, 12540. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.12540>
- Pritsker, A. A. B. (1989). Why simulation works. En *Proceedings of the 21st Conference on Winter Simulation*, pp. 1-9.
- Rincón, G., Álvarez, M., Pérez, M. y Hernández, S. (2005). A discrete-event simulation and continuous software evaluation on a systemic quality model: An oil industry case. *Information & Management*, 42(8), 1051-1066.
- Rincón, G. y Pérez, M. (2004). Discrete-event simulation software decision support in the Venezuelan oil industry. *AMCIS 2004 Proceedings*, 77.
- Robinson, S. (2005). Discrete-event simulation: From the pioneers to the present, what next? *Journal of the Operational Research Society*, 56, 619-629.
- Rossetti, M. D. (2016). *Simulation modeling with Arena*. Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons.
- Qiao, D. y Wang, Y. (2021, March). A review of the application of discrete event simulation in manufacturing. In *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1802, No. 2, p. 022066. IOP Publishing.
- Villagomez, L. E., Cortés, D., Ramírez, J., Álvarez, A., Batres, R., Reyes, I. y Molina, A. (2019). Discrete event simulation as a support in the decision making to improve product and process in the automotive industry-a fuel pump component case study. In *Collaborative Networks and Digital Transformation: 20th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2019, Turin, Italy, September 23-25, 2019, Proceedings*, pp. 572-581. Springer International Publishing.
- Wang, Q. y Ingham, N. (2008). A discrete event modelling approach for supply chain simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 7(3).
- Woldemicael, W. W. (2019). Reduction of production disturbances of a shoemaking industry through a discrete event simulation approach. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 12(1), 215-243