

Assembly Line Simulation Model

Jaime Alberto Giraldo, Ph. D, Omar Danilo Castrillón, Ph. D, and Jaime Antero Arango, Ph. D
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial,
Campus La Nubia Bloque Q piso 2, Manizales - Colombia. Jaiagiraldog@unal.edu.co, odcastrillong@unal.edu.co,
jaarangom@unal.edu.co

Abstract– The objective of this paper is to show a simulation model of an assembly line. To this end, the use of the basic ideas of the CDIO initiative and the universally accepted methodology to develop simulation models using the discrete event method are proposed as a development methodology. By applying the methodology, a model of a hypothetical refrigerator assembly line is developed.

Keywords– Simulation, Assembly Line, CDIO, Production Management.

Modelo de Simulación de una Línea de Ensamble

Jaime Alberto Giraldo, Ph. D, Omar Danilo Castrillón, Ph. D, and Jaime Antero Arango, Ph. D
Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Industrial,
Campus La Nubia Bloque Q piso 2, Manizales - Colombia. Jaiagiraldog@unal.edu.co, odcastrillong@unal.edu.co,
jaarangom@unal.edu.co

Resumen– El objetivo de esta ponencia es mostrar un modelo de simulación de una línea de ensamble. Para ello se propone como metodología de desarrollo el empleo de las ideas básicas de la iniciativa CDIO y la metodología universalmente aceptada para desarrollar modelos de simulación por el método de eventos discretos. Al aplicar la metodología se desarrolla un modelo de una línea de ensamble hipotética de refrigeradores.

Palabras claves– Simulación, Línea de ensamble, CDIO, Gestión de Producción.

I. INTRODUCCIÓN

La producción en línea se relaciona con la fabricación de grandes cantidades de productos estandarizados, que se organizan en líneas de ensamble conformadas por operaciones vinculadas a estaciones de trabajo donde las piezas que visitan las estaciones son intervenidas de manera secuencial para conformar un producto [1].

En [2] se describe que la manufactura de un producto en una línea de ensamble requiere dividir la cantidad total de trabajo en un conjunto $V = \{1, \dots, n\}$ de operaciones elementales llamadas tareas. Además, desarrollar una tarea j toma un tiempo de tarea t_j y requiere máquinas o habilidades de los operarios para realizarse. La cantidad de trabajo total necesaria para ensamblar una pieza de trabajo es medida como la suma de los tiempos de tarea t_{sum} .

En las líneas de ensamble a ritmo, todas las estaciones de trabajo pueden comenzar con sus operaciones en el mismo momento y también transferir piezas de trabajo con la misma frecuencia. En este tipo de líneas, un valor de tiempo fijo (denominado tiempo de ciclo) restringe el contenido de trabajo de las estaciones [3]. En las líneas de ensamble a ritmo con dispositivo transportador, ya sea banda o riel, el producto se mueve a través de un número de estaciones de trabajo dispuestas en la secuencia requerida. Cada estación o zona de trabajo está asignada a un cierto número de operaciones de ensamble. En cada zona, uno o más operadores pueden trabajar

simultáneamente, y la carga de producción promedio de cada uno de los operadores en todas las zonas debe ser la misma. La igualdad de carga de trabajo en los operadores es lo que proporciona un ritmo constante de salida del producto [4].

Es conveniente diferenciar entre línea de fabricación y ensamble. Mientras la primera es desarrollada para la construcción de componentes, la segunda es desarrollada para juntar componentes y obtener una unidad de producto mayor. Igualmente, las líneas de ensamble utilizan componentes ya manufacturados previamente, sea interna o externamente.

De otra parte, la mejora de los sistemas productivos puede entenderse y evaluarse desde la perspectiva de la Simulación de Procesos [5]. Así, entre los contenidos que abarca la simulación, se puede destacar la Teoría de Colas, en la que se analizan sistemas con procesos de llegada, espera y atención; Teoría de Confiabilidad que compendia los tiempos entre fallos y de reparación y el Comportamiento Variable, tales como tiempos entre arribos y cantidades de materia prima, tiempos de procesamiento, cantidad de productos defectuosos, etc. [6,7].

La teoría de simulación aplicada en sistemas de fabricación y ensamble se enfoca en variables que necesitan constantemente medir su estado y fluctúan como consecuencia de las interacciones que se producen entre las partes como, por ejemplo, las ventas, la producción y los empleados [8,9]. La utilidad de la simulación radica en su capacidad para anticipar el desempeño de un sistema en estudio a las variaciones inherentes a su entorno real, lográndose una experimentación a muy bajo costo. Esta técnica se puede usar para estudiar virtualmente cualquier tipo de sistema con comportamiento estocástico siendo la técnica de IO que más se usa en estudios que manejan este tipo de sistemas [10]. Asimismo, el investigador puede incorporar cambios en los parámetros de entrada del modelo y evaluar el impacto en los resultados de salida [11]. Estos últimos a nivel empresarial se representan mediante KPIs (*Key Performance Indicator*) es decir, *Indicadores Clave de Desempeño*. Estos son los indicadores o valores cuantitativos que se pueden medir, comparar y monitorear, con el fin de exponer el desempeño de los procesos y trabajar en las estrategias de un negocio [12]. Los KPIs los podemos clasificar en indicadores de eficiencia, efectividad y eficacia. Así, el concepto de efectividad se refiere al grado de consecución de unos objetivos determinados (resultados); mientras que la eficiencia supone medir el empleo

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

de los recursos utilizados para alcanzar un resultado específico y la eficacia está relacionada con la relación de los conceptos de eficiencia y efectividad, definiéndose como la capacidad de obtener el máximo trabajo previsto con los menores recursos posibles.

II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para desarrollar el modelo de simulación incluye la aplicación simultánea de las ideas básicas de la iniciativa de educación en ingeniería denominada CDIO y una metodología universalmente aceptada para desarrollar modelos de simulación por eventos discretos DES (*Discrete Event Simulation*) [13]. Respecto a CDIO (*Conceive, Design, Implement, Operate*) nos interesa entender que la labor en ingeniería se orienta básicamente a concebir, diseñar, implementar y operar sistemas, productos o procesos [14] y en relación con DES relacionar las etapas de esta metodología con las etapas de CDIO, que para el caso corresponde a concebir, diseñar, implementar y operar un modelo de simulación que represente un proceso industrial (una línea de ensamble). Por tanto, se proponen las siguientes etapas a seguir:

A. Concebir una representación digital de un proceso de línea de ensamble mediante simulación (C)

- a. *Formulación del problema.* Cada estudio debe comenzar con un enunciado del problema en términos de causas-efectos. Si el enunciado lo proveen los tomadores de decisiones o aquellos que tienen (sufren) el problema, el analista de simulación debe asegurarse de que el problema que está siendo descrito, es claramente entendido. Si el enunciado es elaborado por el analista, es importante que los tomadores de decisiones lo entiendan y estén de acuerdo con su formulación. En algunas ocasiones el problema puede ser reformulado en la medida en que el estudio avanza.
- b. *Establecer los objetivos y plan general del estudio.* Los objetivos indican las preguntas que deben ser respondidas por la simulación. En este punto, debe decidirse si la simulación es la herramienta apropiada para estudiar y resolver el problema según los objetivos establecidos. Asumiendo que se ha decidido que la simulación es apropiada, un plan general del estudio debe incluir un enunciado de los sistemas alternativos a ser considerados y el método de evaluar estas alternativas. Este plan además debe incluir la cantidad de gente involucrada, el costo del estudio y un cronograma detallado.
- c. *Definición del sistema.* Una vez que el problema y los objetivos han sido bien definidos, y el plan del proyecto de simulación está terminado, el

analista de simulación debe dirigir su atención hacia la definición del sistema que debe ser modelado. Para nuestros propósitos, un sistema es un conjunto de componentes que recibe entradas y entrega salidas. Los componentes determinan cómo el sistema convierte las entradas en salidas. El sistema puede existir en un ambiente que podría afectar a las entradas y salidas. La definición del sistema como etapa paralela al proceso de conceptualización del modelo consiste en determinar:

- i. La clasificación del sistema como discreto.
- ii. Qué componentes y eventos del sistema modelar.
- iii. Qué datos de entrada recolectar
- iv. Qué datos de salida debe generar el modelo

B. Diseñar el modelo de simulación de un proceso de línea de ensamble (D)

- a. *Diseño de un modelo conceptual.* Básicamente en esta etapa se abstraen las características esenciales del sistema, se seleccionan y modifican las suposiciones que caracterizan al sistema o proceso, se elabora y enriquece el modelo hasta que resulte ser una representación útil. Se recomienda comenzar con un modelo simple e ir agregándole mayor complejidad. No obstante, la complejidad del modelo no necesita exceder los propósitos para los cuales se construye. No es necesario tener una representación uno a uno entre el modelo y el sistema real (es decir, modelar todos los componentes del sistema). Solamente se requiere lo esencial del sistema real. Se recomienda involucrar a los usuarios en la conceptualización, pues esto garantiza calidad en el modelo resultante e incrementa la confianza de los usuarios en la aplicación del modelo. En síntesis, solamente la experiencia con sistemas reales (vs. problemas de libros de texto), pueden enseñar el arte de construir modelos de simulación. De allí que se diga que la simulación es arte y ciencia.
- b. *Recolección de datos requeridos por el modelo.* Esta es una etapa que se hace en paralelo con la definición del sistema y la construcción (conceptualización) del modelo. A medida que la complejidad del modelo cambia, los elementos de datos requeridos también cambian. Dado que la recolección de datos toma una gran porción del tiempo total para hacer un estudio de simulación, es necesario empezar con esta etapa lo más temprano posible. Los objetivos del estudio orientan sobre qué clase de datos deben ser recolectados.

C. Implementar el modelo de simulación (I)

- a. *Codificación del modelo.* Muchos sistemas del mundo resultan en modelos que requieren bastante almacenamiento de información y capacidades de computación, por lo que el modelo debe ser codificado en un formato reconocible por el computador. Es por esto que el modelador debe decidir si programa el modelo en un lenguaje de simulación o usa un paquete de software de simulación, para trasladar el modelo conceptual a un programa en computadora.
- b. *Verificación del modelo.* A la verificación le concierne que el programa en computadora se ejecute apropiadamente. En modelos complejos, es difícil, sino imposible, trasladar un modelo conceptual completamente de manera exitosa sin haber realizado bastante trabajo de depuración. Si los parámetros de entrada y la estructura lógica del modelo son correctamente representados en el computador, se considera que la verificación ha terminado.
- c. *Validación del modelo.* La validación usualmente se logra a través de la calibración del modelo, en un proceso iterativo de comparar el comportamiento del modelo versus el comportamiento del sistema real, y usar las discrepancias entre los dos, y el conocimiento ganado en este proceso, para mejorar el modelo. Este proceso es repetido hasta que la precisión del modelo se considera aceptable. En otras palabras, la validación consiste en comprobar que tan fielmente el modelo representa al sistema, tanto en su estructura como en su operación.
- d. *Documentación y análisis de salida.* La documentación se hace sobre el programa y el progreso del estudio. La documentación sobre el programa permite a otros entender cómo opera. La documentación sobre el progreso del estudio reporta una historia escrita del proyecto de simulación. Este reporte da una idea de la cronología del trabajo hecho y las decisiones tomadas. Se sugieren reportes frecuentes (mensual, al menos) los cuales proveen un comprensivo registro de logros, cambios requeridos, decisiones clave y otros ítems de importancia. El resultado del análisis debe ser reportado clara y concisamente en un informe final. Este último les facilitará a los usuarios del modelo revisar la formulación final, los sistemas alternativos que se abordaron, los criterios por los cuales las alternativas fueron comparadas, los resultados de los experimentos y la solución recomendada al problema

D. Operar el modelo de simulación (O)

- a. *Establecer marco de experimentación.* En esta etapa las alternativas que van a ser simuladas deben ser determinadas. Igualmente se define el diseño experimental en términos de escenarios definidos por variables respuesta y variables de decisión. Por cada escenario del sistema que es simulado, las decisiones que se deben tomar conciernen a la longitud del periodo de calentamiento, la longitud de las corridas de simulación y el número de réplicas por cada corrida. Luego se procede a simular el sistema mediante el modelo en computadora, según el diseño experimental definido, llevando registro de los resultados obtenidos por las variables respuesta y valores asignados a las variables de decisión. Inclusive se puede hacer uso de algoritmos de optimización que algunos paquetes de simulación traen incorporados.

III. RESULTADOS

Al aplicar la metodología propuesta y mediante el empleo del software de simulación *FlexSim* versión 2023, se describen los resultados obtenidos:

A. Concebir una representación digital de un proceso de línea de ensamble mediante simulación (C)

- a. *Formulación del problema.* Se indaga en una hipotética línea de ensamble de refrigeradores sobre su principal problemática actual, lo que conlleva a la siguiente formulación del problema: Que factores de producción (cantidades de materia prima, tiempos de proceso, tiempos de manejo de materiales, tiempos entre fallos de las máquinas y los respectivos tiempos de reparación, número de operarios, entre otros) inciden en el bajo desempeño de la línea en términos de throughput, tiempo de ciclo y nivel de ventas.
- b. *Establecer los objetivos y plan general del estudio.* Como objetivos a lograr se tienen los siguientes en términos de KPIs de eficiencia y efectividad:
 1. Aumentar el throughput en un 10% a fin de satisfacer las fluctuaciones de la demanda.
 2. Aumentar las tasas de utilización del equipo de fabricación/ensamble hasta un 90%
 3. Aumentar las tasas de utilización del equipo de manejo de materiales hasta un 70%

Como plan general del estudio se propone el mostrado en la Fig. # 1., en el cual las letras indican el rol de cada persona involucrada, así: P: responsabilidad principal, S: responsabilidad

secundaria, W= trabajador, A: aprobación y R = revisión.

Fig. 1 Plan general del estudio con simulación

WBS	Actividad	Ing. Manager	Analista 1	Analista 2	Analista 3
1.0	Formulación del problema				
1.1	Orientación	A	P		
1.2	Planteamiento del problema	A	P		
1.3	Objetivos	A	P		
2.0	Planificación del proyecto				
2.1	Estructura de división de trabajo	A	P	S	
2.2	Gráfico de responsabilidad lineal	A	P	S	
2.3	Gráfico de Gantt	A	P	S	
3.0	Definición del sistema				
3.1	Identificar los componentes del sistema	A	P	S	
3.2	Identificar las variables de entrada y salida	A	P	S	
4.0	Recolección de datos de entrada				
4.1	Recopilar datos	A	P	S	W
4.2	Analizar datos	A	S	P	W
5.0	Traducción del modelo				
5.1	Seleccionar el software de modelamiento	A	P		
5.2	Diagramar el flujo de alto nivel del modelo	A	P		
5.3	Codificar el modelo	A	P	S	P
6.0	Verificación				
6.1	Depuración	A	W	S	P
6.2	Animación	A	W	S	P
7.0	Validación				
7.1	Validación visual	A	P	S	
7.2	Validación estadística	A	P	S	
8.0	Diseño experimental				
8.1	Seleccionar escenarios	A	P		
8.2	Conducir experimentos de simulación	A	P	S	W
9.0	Análisis de salida				
9.1	T-test o ANOVA	A	S	P	
9.2	Duncan MFR test	A	S	P	
10.0	Recomendaciones y conclusiones				
10.1	Recomendaciones	A	P	S	
10.2	Conclusiones	A	P	S	

c. *Definición del sistema.* Se responde a las siguientes aspectos estructurales y operacionales del sistema a modelar:

- i. La clasificación del sistema como discreto. Esto se corresponde a que el sistema procesa unidades discretas como son los refrigeradores.
- ii. Qué componentes y eventos del sistema se modelarán. Se consideran básicamente 3 sub-líneas: la primera línea es la que permite la fabricación del mueble del refrigerador; la segunda la fabricación de los componentes y la tercera el ensamble del mueble con los componentes. Finalmente se incluye el transporte al distribuidor/vendedor del producto final. Entre los eventos más importantes se tendrán en cuenta para la modelación: el arribo de las materias primas, los tiempos entre fallos de algunas maquinas, la terminación de la fabricación del mueble y los componentes y la finalización del ensamble de cada refrigerador. Igualmente, el evento de demanda del producto.

4. Qué datos de entrada recolectar. En general parámetros de operación de equipos, mantenimiento preventivo/correctivo, arribo de materia prima, operarios y equipo de manejo de materiales.
5. Que datos de salida debe generar el modelo. Deben ser en términos de los KPIs según los objetivos: throughput, tasas de utilización de equipos de fabricación/ensamble y de manejo de materiales.

B. Diseñar el modelo de simulación de un proceso de línea de ensamble (D)

- a. *Diseño de un modelo conceptual.* Inicialmente se hizo un reconocimiento muy general del proceso el cual se muestra en la Fig # 2. Por cuestiones de espacio no se muestra en mas detalle este modelo conceptual.

Fig. 2 Modelo conceptual



- b. *Recolección de datos requeridos por el modelo.* Inicialmente se identificaron en detalle los flujos de materiales y componentes, incluyendo las trayectorias seguidas por el equipo de manejo de materiales, operarios y personal de mantenimiento. En la Fig # 3 se muestran estos flujos. A continuación, se describe en detalle la recogida de datos sobre el respectivo componente del sistema.

1- Arribo de materia prima lamina: Una línea de producción anterior entrega laminas con tiempos entre entregas de 240 y 250 segundos. Se debe durante el proceso poder identificar cada lamina por: su nombre. Estas ingresan a su lugar de recepción según ilustra la Fig. # 4.

2- Transporte de la lámina: 2 operarios que trabajan en el área de fabricación del mueble del refrigerador (o carcaza) transportan de a 2 laminas hacia el almacenamiento. Esto se muestra en la Fig. # 5.

Fig. # 3 Representación de flujos de la línea de ensamble

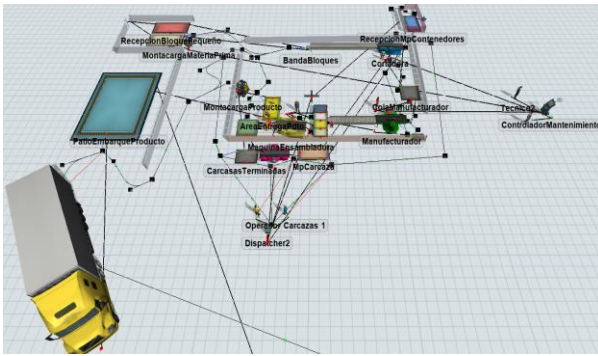


Fig. # 4 Área de arribo de la lamina

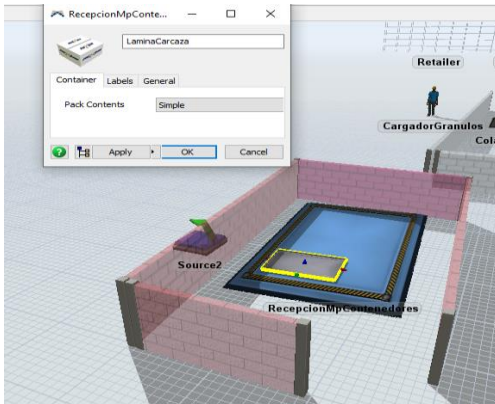
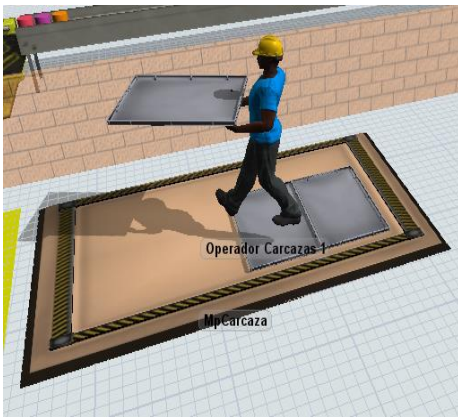


Fig. # 5 Transporte lamina



3- Fabricación del mueble: Una maquina multiprocesadora se alimenta con 1 lamina a fin de fabricar 1 mueble para refrigerador. La descripción y tiempo de cada proceso, al igual de cual(es) operario(s) opera(n) la maquina se muestra en la Tabla # I:

Tabla I: Tiempos procesamiento mueble

Proceso	Tiempo (Seg)	Operario
Corte	Entre 100 y 140	1 o 2
Soldadura	120	1 y 2
Pintura	Entre 85 y 115	1 o 2

En la Fig. 6 se muestra la maquina multiprocesadora y un operario controlándola.



Fig. # 6 Maquina multiprocesadora para fabricación de mueble

4- Transporte del mueble al área de ensamble. Este se realiza con un montacargas que cuyos parámetros de operación se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Parámetros de operación montacargas de producto terminado

Parámetro	Valor
Velocidad de desplazamiento	de 0.5 m/s
Capacidad de transporte	de 2
Velocidad de la horquilla	0.3 m/s
Aceleración	0.7 m/s x s
Desaceleración	0.7 m/s x s
Rotar mientras viaja	Si
Permitir ingresar al área de cargue	Si
Tiempo cargue	Entre 3.5 y 7.5 s
Tiempo descargue	Entre 3.5 y 7.5 s
Mantenimiento preventivo	Cada 4 horas lo aprovisiona de combustible un técnico de mantenimiento. Esta labor dura entre 5 y 6 minutos.
Posición inicial	En el área de ensamble

5- Operarios fabricación mueble. Son 2 operarios como se ha mencionado y tienen los parámetros de operación mostrados en la Tabla III.

Tabla III. Parámetros de operación operarios fabricación mueble

Parámetro	Valor
Velocidad de desplazamiento	0.4 m/s
Capacidad de transporte	2
Aceleración	0.2 m/s x s
Desaceleración	0.2 m/s x s
Rotar mientras viaja	Si
Permitir ingresar al área de cargue	Si
Tiempo cargue	Entre 2 y 3 s
Tiempo descargue	Entre 2 y 3 s
Mantenimiento preventivo	Cada 2.5 horas tiene un descanso de 15 minutos (va al área de descanso)
Posición inicial	En el área del multiprocesador

6- Arribo materia prima componentes refrigerador. Una línea de producción anterior entrega bloques cada 0.8 minutos como media distribuido exponencialmente. El 70% de las veces entrega bloques pequeños y el 30% bloques grandes. Se debe durante el proceso poder identificar (diferenciar) cada bloque por: su nombre, tamaño y color. Dependiendo del tipo de bloque, ingresan a su respectivo lugar de recepción según ilustra en la Fig. # 7.

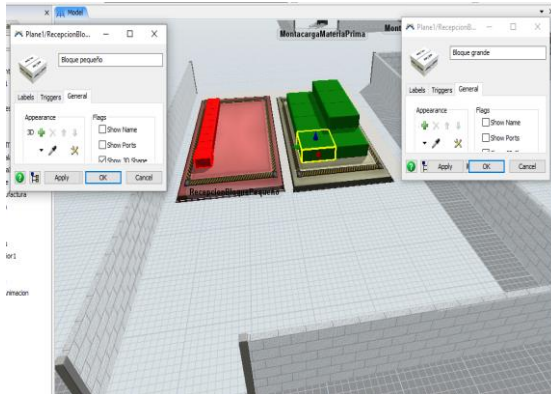


Fig. 7 Área de arribo materia prima componentes

7- Transporte de los bloques hacia el área de corte. Es realizado por un montacargas cuyos parámetros de operación se muestran la Tabla IV.

Tabla IV. Parámetros operación montacargas de materia prima componentes

Parámetro	Valor
Velocidad de desplazamiento	1 m/s

Capacidad de transporte	2
Velocidad de la horquilla	0.2 m/s
Aceleración	0.7 m/s x s
Desaceleración	0.7 m/s x s
Rotar mientras viaja	Si
Permitir ingresar al área de cargue	Si
Tiempo cargue	Entre 3 y 7 s
Tiempo descargue	Entre 3 y 7 s
Mantenimiento preventivo	Cada 5 horas lo aprovisiona de combustible un técnico de mantenimiento. Esta labor dura entre 4.5 y 5.6 minutos.
Posición inicial	En el área de recepción de bloques

7- Banda transporte bloques hacia el área de corte. La banda que enruta los bloques hacia la cortadora se mueve a una velocidad de 0.5 m/s y tiene capacidad de transportar hasta 40 bloques. En la Fig. 8 se muestra dicha banda.

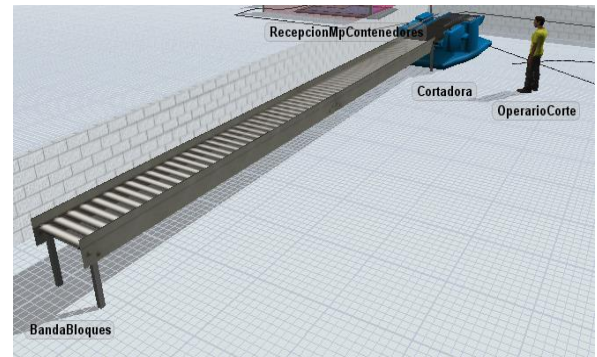


Fig. 8 Banda transporte área de carga

8- Área de corte. Este proceso se efectúa mediante una máquina que corta un bloque grande en 5 piezas y uno pequeño en 2 piezas. Las piezas resultantes son de igual tamaño. La máquina es controlada por un operario, quien además toma los bloques desde la banda y transporta las piezas hacia la cola del manufacturer, siguiendo una trayectoria curva como se muestra en la Fig. 9.

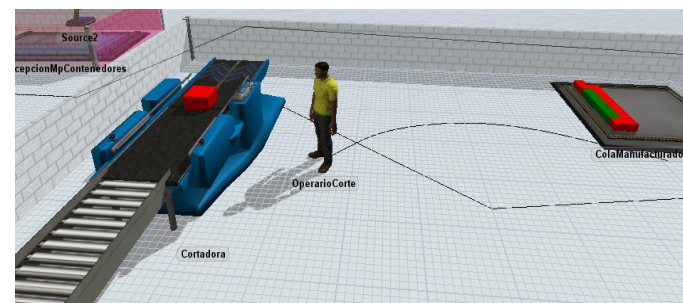


Fig. 9 Área de corte

El operario de corte tiene los parámetros de operación mostrados en la Tabla V.

Tabla V. Parámetros de operación operador de corte

Parámetro	Valor
Velocidad de desplazamiento	0.4 m/s
Capacidad de transporte	2
Aceleración	0.2 m/s x s
Desaceleración	0.2 m/s x s
Rotar mientras viaja	Si
Permitir ingresar al área de cargue	Si
Tiempo cargue	Entre 2 y 3 s
Tiempo descargue	Entre 2 y 3 s
Mantenimiento preventivo	Cada 2.5 horas tiene un descanso de 10 minutos (va al área de descanso)
Posición inicial	En el área de corte

La máquina de corte tiene los parámetros de operación mostrados en la Tabla VI.

Tabla VI. Parámetros de operación máquina de corte

Parámetro	Valor
Tiempo de alistamiento	4 seg
Capacidad de corte	1 bloque grande en 5 piezas; 1 bloque pequeño en 2 piezas
Tiempo proceso	75 s bloque grande; 55 s bloque pequeño
Mantenimiento correctivo	La máquina presenta tiempos (en horas) entre fallos de mínimo 3, máximo 6 y lo más probable 5. La reparación la deben realizar 2 técnicos de mantenimiento, la cual por datos históricos ha durado entre 0.5 y 0.7 horas.

9- Fabricación de componentes. Este proceso se efectúa mediante una máquina que procesa una pieza convirtiéndola en un componente del producto final. Manufactura 4 tipos de componentes (denotados por A, B, C y D modelando diferentes figuras y colores y con probabilidad de fabricación de: 35%, 15%, 15% y 35%, respectivamente). Los componentes resultantes son de tamaño proporcional a la pieza. La máquina es controlada por un operario, quien además toma las piezas desde la cola y las transporta al manufacturador (y desde el manufacturador hasta la banda) siguiendo la trayectoria curva como se muestra en la Fig. 10. En dicha maquina se produce un 5% de defectuosas que se llevan a un área contigua. El 95% restante entra a la banda de producto terminado. Los parámetros de actuación del operario se muestran en la Tabla VII.

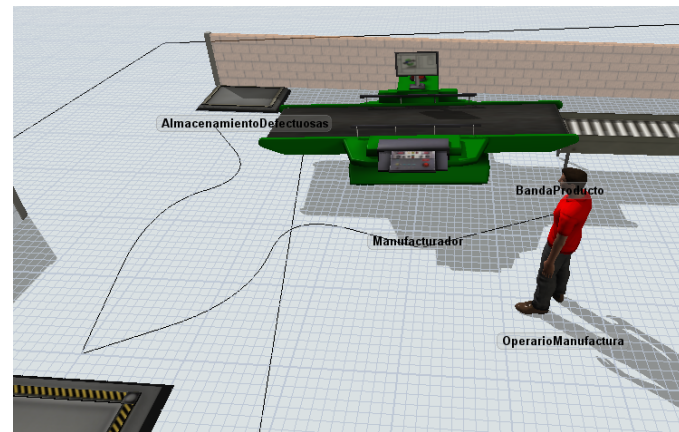


Fig. 10 Área de fabricación de componentes

Tabla VII. Parámetros de operación operario manufactura de componentes

Parámetro	Valor
Velocidad de desplazamiento	0.3 m/s
Capacidad de transporte	1
Aceleración	0.2 m/s x s
Desaceleración	0.2 m/s x s
Rotar mientras viaja	Si
Permitir ingresar al área de cargue	Si
Tiempo cargue	Entre 2 y 3 s
Tiempo descargue	Entre 2 y 3 s
Mantenimiento preventivo	Cada 2.5 horas tiene un descanso de 12 minutos (va al área de descanso)
Posición inicial	En el área de manufactura

10- Área de ensamble. Este proceso se efectúa mediante una máquina que ensambla dentro del mueble 12 componentes (4A, 2B, 2C, 4D). La máquina es controlada por un operario, quien además toma las piezas desde las colas y las transporta al ensamblador. Adicionalmente 1 robot permite el transporte de la carcasa y el producto ensamblado. El área de ensamble se muestra en la Fig. 11.



Fig. 11 Área de ensamble

Los parámetros de actuación del operario y máquina de ensamble se muestran en las Tabla VIII y IX.

Tabla VIII. Parámetros de operación operario de ensamble

Parámetro	Valor
Velocidad de desplazamiento	0.3 m/s
Capacidad de transporte	2
Aceleración	0.2 m/s x s
Desaceleración	0.2 m/s x s
Rotar mientras viaja	Si
Permitir ingresar al área de cargue	Si
Tiempo cargue	Entre 1 y 2 s
Tiempo descargue	Entre 1 y 2 s
Mantenimiento preventivo	Cada 2.5 horas tiene un descanso de 15 minutos (va al área de descanso)
Posición inicial	En el área de ensamble

Tabla IX. Parámetros de operación máquina de ensamble

Parámetro	Valor
Tiempo de alistamiento	60 s
Capacidad de manufactura	1 mueble y 12 componentes de ensamble
Tiempo proceso	10.3 minutos en promedio y desviación estándar 1.2, normalmente distribuido
Mantenimiento preventivo	La máquina se le hace mantenimiento cada 4 horas. Este lo deben realizar 2 técnicos de mantenimiento, el cual dura entre 10 y 20 minutos.

Los parámetros de operación del robot de ensamble se muestran en la Tabla X.

Tabla X. Parámetros de operación robot de ensamble

Tiempos de movimiento	de	Ver Fig. 12 y 13
Capacidad de transporte	de	1 mueble o 1 producto ensamblado
Tiempo apertura pinza		3 s
Tiempo cierre pinza		3 s
Rotar mientras viaja		Si
Permitir ingresar al área de cargue		Si
Tiempo cargue		Entre 55 y 60 s
Tiempo descargue		Entre 55 y 60 s

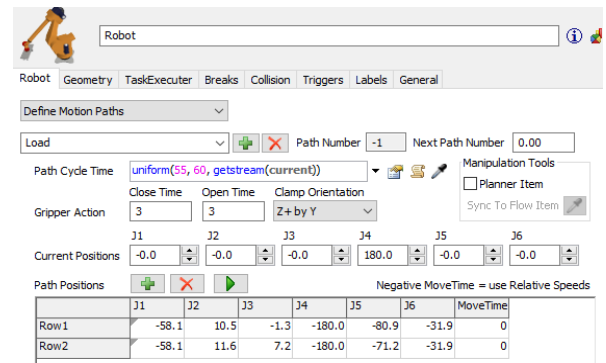


Fig. 12. Especificaciones de movimientos cargue del robot

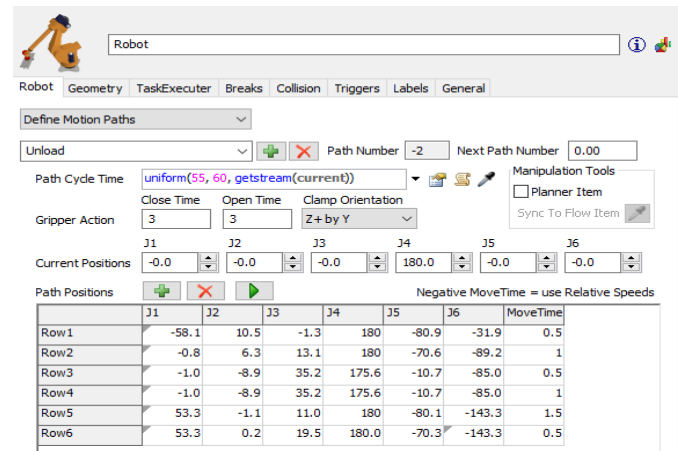


Fig. 13. Especificaciones de movimientos descargue del robot

11. Transporte del producto ensamblado hacia patio de embarque. Es realizado por el mismo montacargas que transporta los muebles. En la Fig. 14 se muestran las trayectorias que este sigue en sus desplazamientos: 45 m entre área fabricación mueble y ensamble y 45 m entre ensamble y patio de embarque.

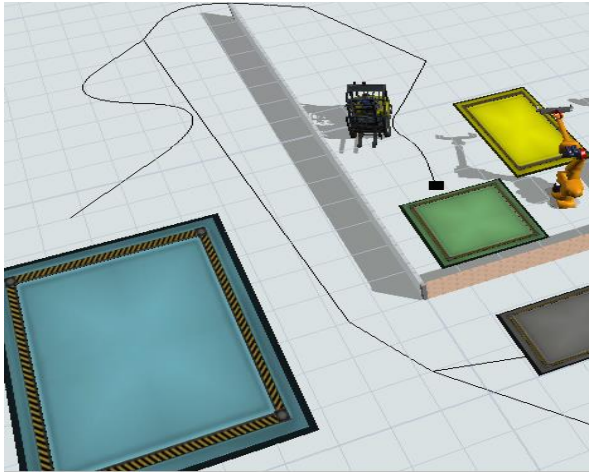


Fig. 14 Área de embarque de producto terminado

12. Embarque y transporte. Cuando se acumulen 24 unidades de producto en el patio de embarque, mediante un camión con capacidad para 24 productos se transporta a las instalaciones del distribuidor detallista el cual se encuentra a una distancia de 25 km. Las características de operación del camión se muestran la Tabla XI.

Tabla XI. Parámetros operación camión

Velocidad de desplazamiento	de	60 km/h promedio
Capacidad de transporte	de	24
Aceleración		25 km/h x h
Desaceleración		25 km/h x h
Rotar mientras viaja		Si
Permitir ingresar al área de cargue/descargue		Si
Tiempo cargue		0.5 horas
Tiempo descargue		0.5 horas
Posición inicial/retorno		Patio de embarque

13-Recepción, almacenamiento y venta. La carga del camión se recibe en un patio de recepción y se almacena en un rack que consta de 6 niveles, 8 bahías y 3 slots por celda de almacenamiento. El tiempo (horas) entre ventas de cada producto es mínimo 2, máximo 4 y lo más frecuente 3. Se debe mostrar (representar) el flujo de venta hacia un área como se ilustra en la Fig. 15.

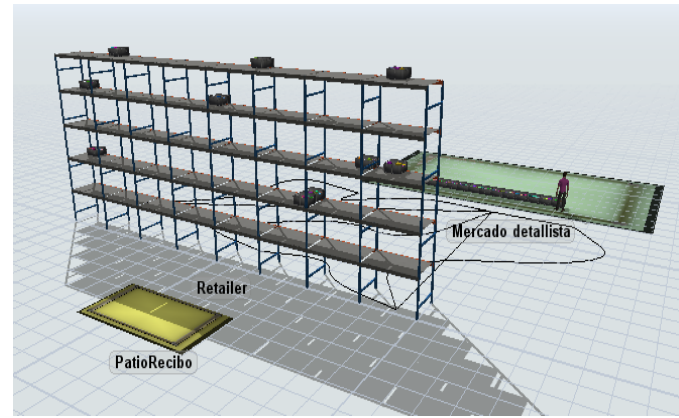


Fig. 15. Área de venta al detal (Retail)

C. Implementar el modelo de simulación (I)

- Codificación del modelo de simulación.* Se empleo el software FlexSim versión 2023. Por cuestiones de espacio no es posible mostrar el código. En la Fig. 16 se muestra la representación gráfica del modelo.
- Verificación del modelo. Durante la implementación se chequeo la funcionalidad de c/u de los componentes.
- Validación del modelo. Se valido mediante la comparación del troughput obtenido durante 12 horas con un sistema real.

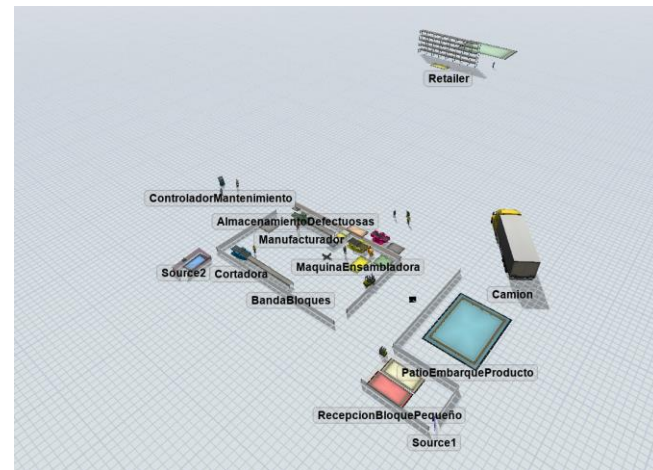


Fig. 16 Representación grafica del modelo de simulación

D. Operación del modelo de simulación (O)

- Experimentación. Se diseñaron varios escenarios considerando cambios en el numero de operarios y capacidades de maquinas a fin de lograr los objetivos propuestos. En las Figuras 17 y 18 se muestran valores de los KPIs de uso de recursos (eficiencia) y de logro de los resultados.

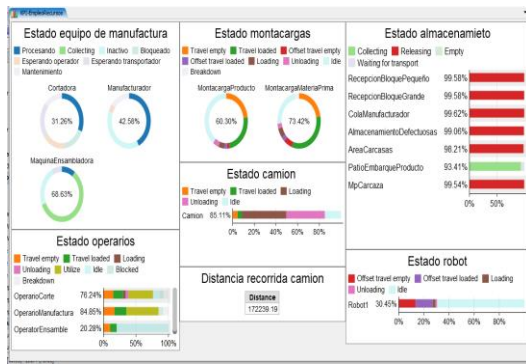


Fig. 17 KPIs de eficiencia obtenidos para un escenario dado

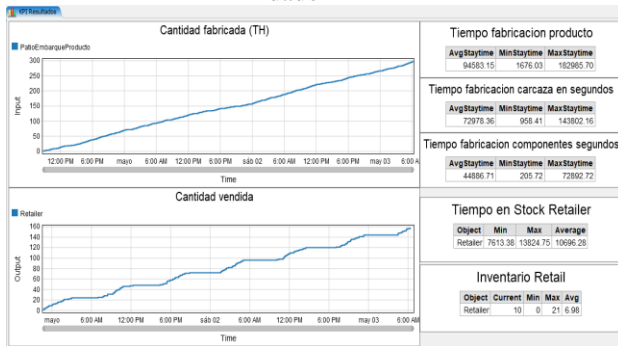


Fig. 18 KPIs de efectividad obtenidos para un escenario dado

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración a la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales por proporcionar la infraestructura de hardware y software empleados.

CONCLUSIÓN

Con el modelo desarrollado se pudo representar de manera muy aproximada a la realidad el comportamiento aleatorio y la interdependencia de los componentes de un sistema de ensamble industrial. Igualmente se pudo anticipar y medir el desempeño de estos sistemas en términos de indicadores de eficiencia y efectividad.

REFERENCIAS

[1] Peña-Orozco, Diego León, & Jiménez-Gómez, Jaime Leonardo. (2019). Problema de balanceo de una línea del tipo SALBP: caso de una línea de confección de prendas. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 11(2), 176-196. Epub December 28, 2019. <https://doi.org/10.22335/rict.v11i2.866>

[2] Polat, O., Mutlu, Ö., & Özgormus, E. (2018). A mathematical model for assembly line balancing problem type 2 under ergonomic workload constraint. *The Ergonomics Open Journal*, 11(1)

[3] Adeppa, A. (2015). A Study on Basics of Assembly Line Balancing. *International Journal on Emerging Technologies*, 6(2), 294-297.

[4] Mauergauz, Y. (2016). *Advanced Planning and Scheduling in Manufacturing and Supply Chains*. Moscow, Russia: Springer International Publishing Switzerland. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-27523-9>.

[5] Zeigler, B.P., Muzy, A. and Kofman, E., *Theory of modeling and simulation: discrete event & iterative system computational foundations*. Academic press, 2018. ISBN:978-0-12-813370-5

[6] Memon, R.A., Li, J.P. and Ahmed, J., Simulation model for blockchain systems using queuing theory. *Electronics*, 8(2), art. 234. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8020234>

[7] Law, A., y Kelton, W., *Simulation Modelling and Analysis*, McGraw-Hill Education, Boston, Estados Unidos (2014)

[8] Martínez E., González C., Rosario G., and Hernández C. Integración de la simulación, la regresión y la optimización multiobjetivo para determinar recursos en un banco. *Investigación Operacional* 2018; 39(1):140-150, 2018. ISSN 2224-5405 [[Links](#)]

[9] Sarmiento-Vásquez A. and López-Sandoval E. Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes, *Ing. Ind.* 2017; 35(1): 27. ISSN 1025-9929. doi:10.26439/ing. ind2017.n035.1789. [[Links](#)]

[10] Hillier F. and Lieberman G., *Introduction to Operations Research*, 10th ed. New York: McGraw Hill, 2015. ISBN 978-1-83862-436-437-7 [[Links](#)]

[11] Anderson D., Sweeney D., and Williams T. *Métodos cuantitativos para los negocios*, 13th ed. México: Cengage Learning, 2016. ISBN 979-84-16062-32-4. [[Links](#)]

[12] <https://acortar.link/EkNrdu>

[13] Giraldo, J., *Simulación de Sistemas de Producción y de Servicios*, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia (2014)

[14] *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach* por Edward F. Crawley, Johan Malmqvist, et ál (2011)