



Doi: <https://doi.org/10.70577/asce.v5i3.1092>

Recibido: 2026-08-03

Aceptado: 2026-08-17

Publicado: 2026-08-31

Modelado del proceso de fabricación de pallets de madera mediante dinámica de sistemas: caso del taller Voluntad de Dios, cantón Buena Fe

**Modeling the Wooden Pallet Manufacturing Process Using System Dynamics:
A Case Study of the Voluntad de Dios Workshop in Buena Fe canton**

Autor(s)

Milton Iván Villafuerte López¹

Carrera de Ingeniería Industrial

mvillafuerte@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2848-6877>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Alma Gabriela López Villacis²

Carrera de Ingeniería Industrial

alopezv3@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0000-7789-969X>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

José David Barros Enríquez³

Carrera de Ingeniería Industrial

jbarros@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2165-4065>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Ángel Moisés Avemañay Morocho⁴

Carrera de Ingeniería Industrial

aavemanaym@uteq.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3233-9730>

Universidad Técnica Estatal de Quevedo

Quevedo – Ecuador

Cómo citar

Villafuerte López , M. I., López Villacis , A. G., Barros Enríquez, J. D., & Avemañay Morocho , Ángel M. (2026). Modelado del proceso de fabricación de pallets de madera mediante dinámica de sistemas: caso del taller Voluntad de Dios, cantón Buena Fe. *ASCE MAGAZINE*, 5(3), 2499–2523. <https://doi.org/10.70577/asce.v5i3.1092>



Resumen

La investigación aplicó la dinámica de sistemas al proceso de fabricación de pallets de madera del Taller Voluntad de Dios, ubicado en el cantón Buena Fe, Ecuador. El objetivo fue desarrollar un modelo de simulación para identificar restricciones productivas, evaluar escenarios de mejora y apoyar la toma de decisiones. Se empleó un enfoque mixto, diseño no experimental, observación directa y un estudio de tiempos basado en 100 observaciones por estación. El modelo fue desarrollado en Vensim PLE 10.4. Los resultados identificaron el ensamble como el principal cuello de botella, con un tiempo estándar de 116,91 segundos, equivalente al 68 % del ciclo total. Asimismo, se determinó una eficiencia operativa del 72,80 % y 296,31 segundos de tiempo ocioso acumulado por ciclo en las estaciones de corte. El modelo reprodujo una producción de 21 pallets por hora, equivalente a los 168 pallets diarios observados. Entre los escenarios evaluados, el mantenimiento preventivo presentó el mejor equilibrio entre inversión y rendimiento, con una ganancia neta mensual proyectada de USD 4.409,20. La incorporación conjunta de mantenimiento y un operario adicional elevó la ganancia proyectada a USD 7.926,16 mensuales, condicionada a un abastecimiento suficiente de materia prima. Se concluye que el modelo permite anticipar restricciones y sustentar decisiones de mejora productiva.

Palabras clave: dinámica de sistemas; simulación; pallets de madera; proceso productivo; cuello de botella.



Abstract

This study applied system dynamics to the wooden pallet manufacturing process at the Voluntad de Dios Workshop, located in Buena Fe Canton, Ecuador. The objective was to develop a simulation model to identify production constraints, evaluate improvement scenarios, and support decision-making. A mixed-methods approach, a non-experimental design, direct observation, and a time study based on 100 observations per workstation were employed. The model was developed using Vensim PLE 10.4, following Sterman's methodology. The results identified assembly as the main bottleneck, with a standard time of 116.91 seconds, representing 68% of the total cycle time. An operational efficiency of 72.80% and 296.31 seconds of accumulated idle time per cycle at the cutting workstations were also determined. The model reproduced an output of 21 pallets per hour, equivalent to the observed production of 168 pallets per day. Among the scenarios evaluated, preventive maintenance provided the best balance between investment and return, with a projected monthly net profit of USD 4,409.20. Combining maintenance with an additional operator increased the projected net profit to USD 7,926.16 per month, subject to an adequate supply of raw materials. It is concluded that the model makes it possible to anticipate production constraints and support decisions aimed at improving production performance.

Keywords: system dynamics; simulation; wooden pallets; production process; bottleneck.

Introducción

Los pallets de madera están diseñados para facilitar la manipulación eficiente de materiales y se utilizan en todo el mundo para almacenar, transportar y manejar mercancías (Alanya-Rosenbaum et al., 2021). Los pallets son elementos clave de las cadenas de suministro globales y constituyen uno de los artículos de transporte retornables más utilizados, ya que movilizan aproximadamente el 80 % del comercio mundial (Kočí, 2019). Estos productos, aparentemente simples, facilitan el transporte y almacenamiento de mercancías y han permitido el desarrollo de sistemas eficientes y estandarizados de manipulación de materiales y logística utilizados en todo el mundo (Tornese et al., 2021). En la zona norte de la Costa ecuatoriana se destacan las cadenas productivas para las industrias de contrachapados, astillas y procesadoras de balsa, así como el aprovechamiento de madera aserrada para la industria del mueble y la construcción. La cadena productiva de contrachapados se caracteriza por la alta provisión de madera del bosque nativo, en especial con especies forestales de madera blanda; en la zona se destaca el aprovechamiento de madera rolliza (en trozas), y de productos aserrados (Romero & Velasteguí, 2011).

En la actualidad, las pymes juegan un papel importante en la economía de los países, contribuyendo con la provisión de empleo productivo, la movilización de recursos económicos y la estabilidad socioeconómica; Sin embargo, es una característica común, la limitación en recursos y la presencia de dificultades operacionales y de gestión. Ante esta realidad, las pymes solo podrán alcanzar éxito y liderar sus sectores, si usan sus recursos limitados de manera efectiva y orientan sus fortalezas competitivas de manera innovadora (Hipólito et al., 2018). Aumentar la tasa de producción es uno de los principales objetivos de muchas empresas manufactureras y un propósito fundamental de la producción esbelta (*Lean Production*). Una forma de incrementarla consiste en resolver el cuello de botella, definido como la estación de trabajo o recurso, que ejerce el mayor impacto sobre el desempeño general del sistema (Skoogh et al., 2023a).

Los cuellos de botella estáticos en la manufactura se definen a partir de parámetros y entornos estables del sistema, por otro lado, los cuellos de botella dinámicos y su desplazamiento involucran incertidumbres tanto dentro del sistema como en el entorno de producción (Tang et al., 2024). Sin embargo, la mayoría de los estudios previos sobre cuellos de botella en sistemas de manufactura parten del supuesto de que estos son estáticos, lo cual no necesariamente se cumple en los procesos

productivos reales. Algunos investigadores demostraron que las diversas incertidumbres presentes en el sistema de manufactura de una empresa provocan que los cuellos de botella sean dinámicos (Teunter & Flapper, 2011). La tasa de producción es un parámetro importante para evaluar el desempeño de un sistema productivo, generalmente está limitada por uno o más cuellos de botella, por lo cual, para iniciar cualquier acción de mejora, el primer paso consiste en identificar dichas limitaciones correctamente (Skoogh et al., 2023b).

La dinámica de sistemas permite analizar los cuellos de botella como parte de una estructura productiva interrelacionada, en la que las decisiones sobre tamaño de lote, liberación de materiales, capacidad, inventario y tiempos de proceso afectan el desempeño global (Mikati, 2010). Su enfoque desarrollado por Forrester, ofrece una metodología para modelar y simular, mediante escenarios, el comportamiento no lineal de sistemas dinámicamente complejos (Hoffmann et al., 2025). Ésta se presenta como una herramienta potencial para investigar y analizar el desempeño de un sistema de manufactura en respuesta a las perturbaciones en las entradas del sistema (Fetene Adane et al., 2019). De acuerdo a (Sterman et al., 2015), la dinámica de sistemas se enfoca en el desarrollo de teorías basadas en procesos que adoptan fronteras amplias e incorporan de forma explícita múltiples retroalimentaciones, demoras temporales, no linealidades y procesos de acumulación. las personas tienen un desempeño muy limitado en entornos dinámicos, por lo cual, al traducir los modelos mentales a la notación de esta metodología, las estructuras y los conocimientos del sistema se vuelven mucho más transparentes, accesibles y comprensibles (Groesser & Schaffernicht, 2012; Poles, 2013).

En el sector de la manufactura, la dinámica de sistemas se aborda como una metodología de simulación continua que permite analizar el comportamiento y el desempeño de un sistema de producción sin necesidad de realizar intervenciones físicas en la planta real (Antonelli et al., 2018). Su versatilidad permite gestionar la complejidad y la variabilidad de sistemas modernos; las empresas deben crear copias virtuales de su producción física, la metodología se utiliza aquí para construir el modelo de simulación que da soporte al gemelo digital (Gejo-García et al., 2022). Para demostrar el impacto de este modelo en la sostenibilidad de la cadena de suministro, según (Kaur & Kander, 2025), en la aplicación de este modelo al proceso de manufactura y la cadena de suministro para la producción de compuestos poliméricos reforzados con fibra de cáñamo, optimizó el escenario inicial, logrando un aumento del 22 % en la disponibilidad de material



polimérico, una reducción del 12 % en la tasa del proceso de molienda y la incorporación de una descortezadora adicional, con lo cual se eliminó un cuello de botella asociado a los equipos.

Material y métodos

Diseño del estudio y enfoque

Para abordar adecuadamente la complejidad del sistema productivo, se aplicó una investigación que combina elementos transversales y longitudinales. Esta decisión metodológica obedece a que la dinámica de sistemas requiere comprender no solo el estado presente, sino también los patrones y tendencias que han caracterizado al proceso productivo a través del tiempo.

Contexto del proceso y unidad de análisis

El estudio se sitúa en el Taller Voluntad de Dios, un entorno de manufactura de carácter aplicado cuyo enfoque es el sector de la madera. El contexto del proceso se centra en la cadena de producción de pallets, examinando cada operación de manera aislada, desde que llega la madera en bruto hasta que sale el producto terminado. La unidad de análisis corresponde a la realidad operativa del taller, integrada por cada estación de trabajo, personal operativo, administrador o encargado, y los flujos de comunicación e interrupciones que inciden directamente en la productividad y competitividad del negocio.

Datos y fuente

La recolección de información se fundamenta en un diseño no experimental que combina datos de origen primario y secundario. Las fuentes primarias incluyen la observación directa en el taller para documentar tiempos de operación mediante un cronómetro digital calibrado y la organización del espacio. De igual manera, se emplean entrevistas semiestructuradas y conversaciones con el personal operativo. Como fuentes secundarias, se analizan los archivos históricos de la empresa, tales como facturas de compra de materia prima, pedidos de producción y registros de mantenimiento de equipos. Además, se complementa con fuentes especializadas en dinámica de sistemas aplicada a la manufactura y optimización de procesos.

Variables e indicadores

El modelo distingue variables que determinan el comportamiento y la eficacia del taller. Entre las variables de medición directa y cuantitativa se encuentran la cantidad de material, el número de defectos y el tiempo de operación de cada proceso. A nivel de simulación, se consideran las variables del sistema y sus relaciones causa-efecto expresadas en diagramas causales para formular hipótesis dinámicas. El desempeño de los distintos escenarios de mejora se evalúa mediante una matriz que utiliza indicadores como productividad, inversión exigida, tiempo de implementación esperado, resistencia al cambio y sostenibilidad a largo plazo.

Procedimiento

La investigación sigue un diseño no experimental y aplicado, estructurado bajo la metodología de modelado de dinámica de sistemas de Sterman (2000) a través de cuatro fases flexibles:

Fase 1 - Inmersión y diagnóstico: Familiarización con la cultura organizacional, identificación de problemas no documentados, registro de tiempos y movimientos mediante fichas de observación.

Fase 2 - Construcción del modelo: Formulación de hipótesis dinámicas plasmadas en diagramas causales y posterior aplicación al software Vensim PLE estableciendo ecuaciones matemáticas de stocks y flujos.

Fase 3 - Validación y ajuste: Realización de pruebas comparando las salidas del modelo con los datos históricos de la empresa hasta lograr precisión.

Fase 4 - Exploración de escenarios: Simulación de situaciones hipotéticas de mejora (como cambios en la distribución física o adición de personal) sin interrumpir el trabajo diario.

Análisis estadístico

El tratamiento de los datos inicia con un procesamiento estadístico en Excel, donde los datos brutos se limpian y organizan, identificando y tratando los valores atípicos para eliminar errores de medición de eventos reales. Posteriormente, se analizan los datos para identificar patrones y relaciones, evaluando si variables como el día de la semana o el operador de turno afectan la productividad. En la fase de validación y experimentación, se verifica la lógica dimensional y el

comportamiento ante condiciones extremas de los componentes del modelo en Vensim PLE, comparando las series simuladas con los registros históricos recopilados.

Consideraciones éticas y de confidencialidad

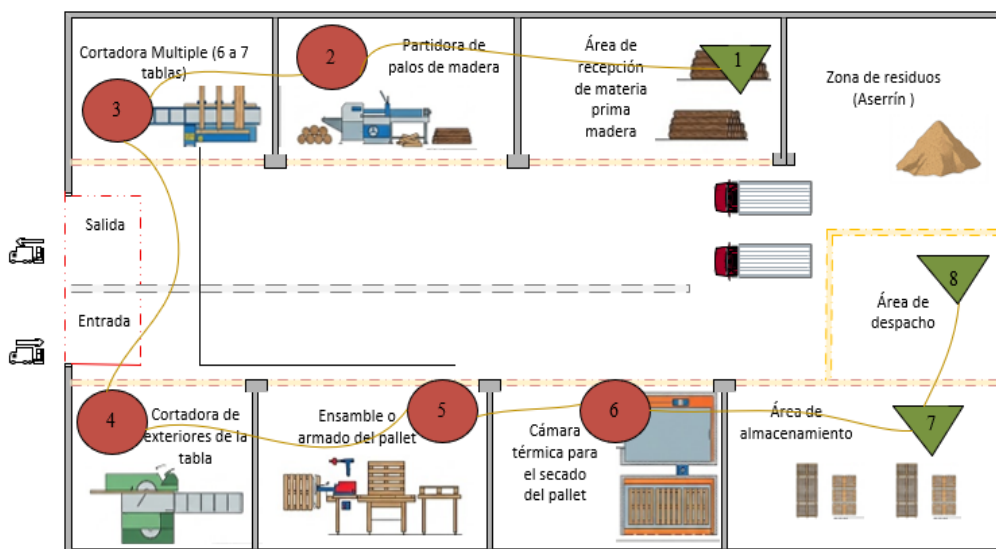
Se utilizaron datos operativos anonimizados, sin información personal, con autorización interna y uso exclusivo para fines de mejora del proceso.

Resultados

El proceso de producción de pallets en el taller abarca varias operaciones que van desde la recepción de la materia prima hasta el producto final. El flujo de actividades se detalla en la Figura 1. El esquema permite ordenar cada una de las operaciones, momentos de decisión, entradas y salidas, facilitando la identificación de etapas claves y potenciales ineficiencias en la línea de producción. La disposición actual incluye las siguientes zonas: recepción de madera (1), máquina divisora (2), cortadora múltiple (3), cortadora exterior (4), zona de ensamblaje (5), cámara térmica para secado (6), área de almacenamiento (7) y sección de despacho (8).

Figura 1

Diagrama de recorrido del proceso



Fuente: *Elaboración propia.*

El diagrama de recorrido muestra la disposición real de la materia prima y del producto en proceso, y permite identificar los desplazamientos que resultan innecesarios y las posibilidades de mejora en el flujo del proceso productivo.

Variables críticas para simulación

Las variables críticas que se incluyeron en el modelo de dinámica de sistemas fueron identificadas con base en el diagnóstico efectuado. Estas variables son los componentes esenciales que determinan el funcionamiento del sistema de producción, mediante su comportamiento e interacción.

Tabla 1

Variables críticas identificadas para el modelo

Variable	Tipo	Valor Actual	Función en el Sistema
Tiempo estándar total	Nivel	171,32 seg	Define capacidad máxima teórica del sistema
Tiempo de ensamble	Flujo	116,91 seg	Restricción principal – Cuello de botella
Capacidad instalada	Nivel	168,10 pallets	Límite superior de producción por día
Tasa de producción	Flujo	21,01 pallets/hora	Velocidad del sistema productivo
Eficiencia operativa	Auxiliar	72,80%	Indicador de desempeño
Tiempo ocioso total	Flujo	296,31 seg	Pérdida de productividad por ciclo
Nº estaciones ensamble	Parámetro	1	Variable de decisión para escenarios de mejora
Nº de operarios	Parámetro	10	Recurso humano disponible

Nota: *Elaboración propia.*

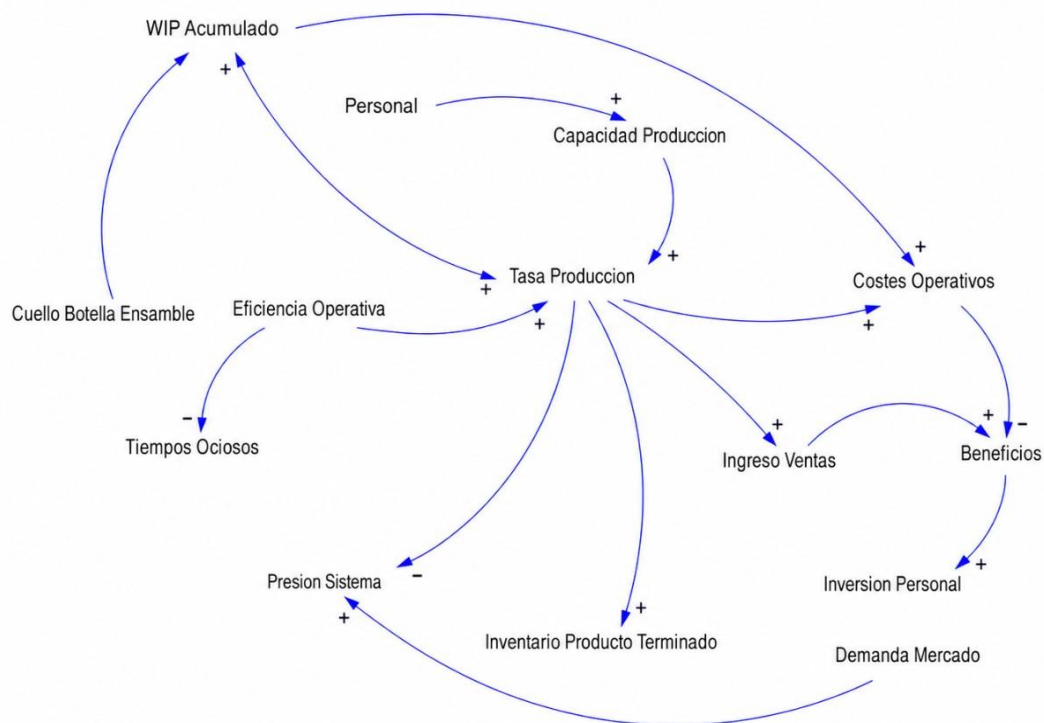
El diagnóstico del proceso productivo del Taller Voluntad de Dios permitió identificar los elementos críticos que afectan la eficiencia operativa. La estación de ensamble constituye el cuello de botella del sistema, consumiendo el 68 % del tiempo total del ciclo y limitando la capacidad productiva a 21,01 unidades por hora. El desbalance resultante genera una eficiencia operativa del 72,80%, con pérdidas de 296,31 segundos de tiempo ocioso por cada pallet fabricado.

Diagrama causal del sistema productivo

Para conceptualizar la complejidad de la planta, se elaboró el diagrama causal, el cual expone las relaciones de influencia entre las variables operativas y económicas del taller. Este esquema sirvió como base para la posterior traducción matemática del sistema en el software Vensim. En la Figura 2 se detallan estas interacciones causa-efecto, donde la dirección de las flechas indica el sentido de la influencia y los signos definen la polaridad de la relación: el signo (+) representa comportamientos directamente proporcionales y el signo (-) describe efectos inversamente proporcionales

Figura 2

Diagrama causal del proceso productivo de pallets



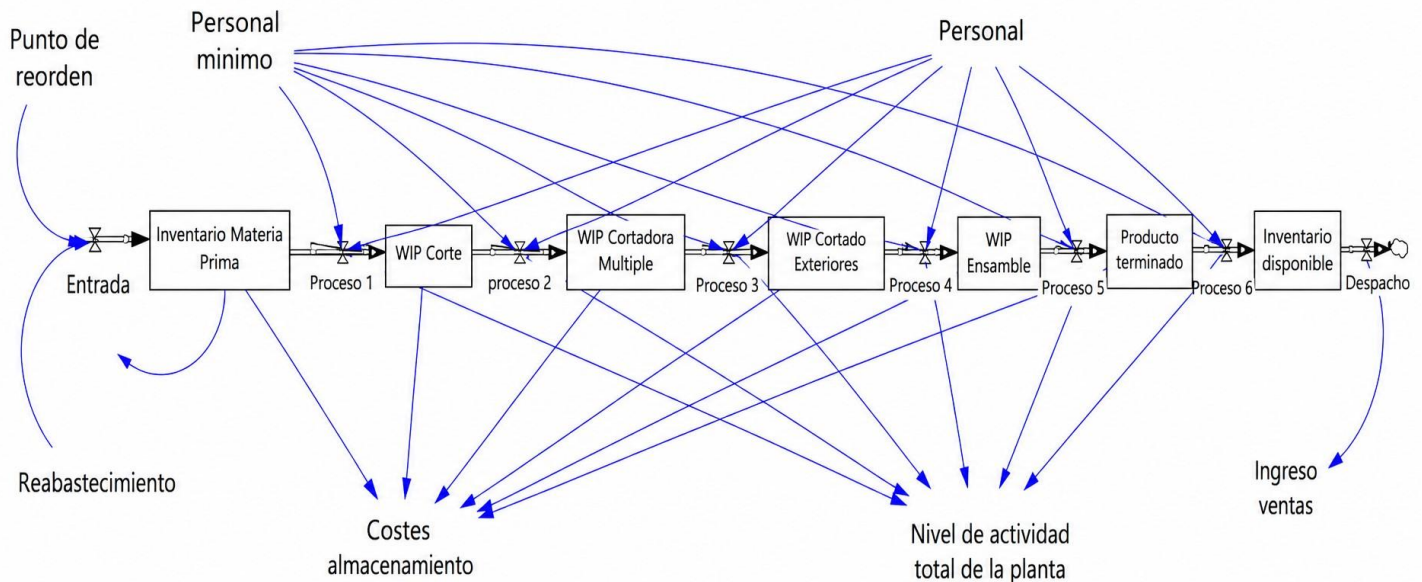
Fuente: *Elaboración propia.*

El diagrama causal expone las relaciones de influencia entre las variables del sistema productivo del taller. Se distinguen bucles de retroalimentación balanceadores y reforzadores que regulan la dinámica del sistema, con la variable cuello botella ensamble como restricción principal.

El diagrama causal del sistema productivo sitúa a la tasa de producción como el eje central del taller, regulada de manera directamente proporcional por la capacidad productiva, el personal y la eficiencia operativa. La dinámica interna del sistema se rige por dos bucles de retroalimentación principales: el bucle reforzador, que modela un ciclo de crecimiento donde el aumento de producción eleva los ingresos y beneficios, permitiendo reinvertir en personal para expandir la capacidad; y el bucle balanceador, el cual actúa como un mecanismo financiero de autorregulación que frena el ritmo de fabricación ante una acumulación excesiva de inventario para evitar costes de almacenamiento ineficientes. Asimismo, la variable del cuello de botella en ensamble recrea con exactitud la acumulación de trabajo en proceso. Finalmente, la demanda del mercado se incorpora como una variable exógena clave, lo que facilita la simulación del comportamiento de los ingresos del taller ante fluctuaciones y escenarios externos.

Figura 3

Diagrama de Forrester



Fuente: *Elaboración propia.*

El diagrama de Forrester muestra la estructura formal del modelo de Dinámica de Sistemas. Dicho modelo incluye siete variables de nivel que simbolizan los trabajos en proceso y los inventarios, las cuales están interconectadas a través de flujos que representan las tasas de procesamiento en

cada estación. Además, el diagrama añade variables secundarias relacionadas con ventas, personal y costos.

Cada flujo del modelo usa la función MIN, que lo que hace es asegurar que ningún proceso pueda ir más rápido de lo que le permite el material disponible aguas arriba, y que la capacidad suba o baje proporcionalmente según el personal asignado. La fórmula general es:

$$\text{Proceso}_i = \text{MIN} (\text{Stock aguas arriba}, \text{Capacidad}_i \times \text{Personal} / \text{Personal mínimo})$$

Tabla 2

Variables, parámetros y ecuaciones del modelo de Dinámica de Sistemas

Variable	Tipo	Valor Inicial	Ecuación
Inventario Materia Prima	Stock	500	Entrada – Proceso 1
WIP Corte	Stock	20	Proceso 1 – Proceso 2
WIP Cortadora Múltiple	Stock	15	Proceso 2 – Proceso 3
WIP Cortadora Exteriores	Stock	10	Proceso 3 – Proceso 4
WIP Ensamble	Stock	5	Proceso 4 – Proceso 5
Producto Terminado	Stock	0	Proceso 5 – Proceso 6
Inventario Disponible	Stock	0	Proceso 6 – Despacho
Entrada	Flujo	—	IF THEN ELSE (Inv. MP < Punto reorden, Reabastecimiento, 0)
Proceso 1 (Partidora)	Flujo	—	MIN (Inv. Materia Prima, $250 \times \text{Personal} / \text{Personal mín.}$)
Proceso 2 (Cort. Múltiple)	Flujo	—	MIN (WIP Corte, $60 \times \text{Personal} / \text{Personal mín.}$)
Proceso 3 (Cort. Exteriores)	Flujo	—	MIN (WIP Cort. Múlt., $1000 \times \text{Personal} / \text{Personal mín.}$)
Proceso 4 (Ensamble-1)	Flujo	—	MIN (WIP Cort. Ext., $21 \times \text{Personal} / \text{Personal mín.}$)
Proceso 5 (Ensamble-2)	Flujo	—	MIN (WIP Ensamble, $21 \times \text{Personal} / \text{Personal mín.}$)
Proceso 6 (Salida)	Flujo	—	MIN (Producto Terminado, $21 \times \text{Personal} / \text{Personal mín.}$)
Despacho	Flujo	—	MIN (Inventario Disponible, 21)
Costes almacenamiento	Aux.	—	$\Sigma (\text{Stock}_i \times \text{coef. costo por etapa})$
Nivel actividad planta	Aux.	—	Proceso 1 + Proceso 2 + ... + Proceso 6
Ingreso ventas	Aux.	—	Despacho $\times 10$ (USD/pallet)
Personal	Param.	10	Operarios por turno (dato de campo)
Personal mínimo	Param.	10	Mínimo para operar el sistema
Punto de reorden	Param.	10	Umbral de reabastecimiento de MP
Reabastecimiento	Param.	50	Tasa de entrada de MP al activarse

Fuente: *Elaboración propia.*

En la Tabla 2 se detallan las ecuaciones específicas de cada variable, junto con sus valores iniciales y los parámetros que alimentan el modelo.

Las capacidades de cada estación se derivaron directamente del estudio de tiempos. Para la partidora se tiene como referencia 9.76 segundos por unidad, lo que equivale a 250 unidades por hora. La cortadora múltiple, que tarda 42.86 segundos por ciclo, procesa aproximadamente 60 unidades por hora. La cortadora de exteriores, con 1.79 segundos por pieza, logrando una capacidad de 1,000 unidades por hora. En ensamble, 116.91 segundos por pallet le deja una capacidad de sólo 21 unidades por hora, ahí está la restricción que condiciona todo lo demás.

Para los costes de almacenamiento se utilizaron coeficientes diferentes en función de la etapa, lo que tiene sentido, por cuanto a medida que el material avanza por la línea va acumulando más valor agregado. Algo que vale la pena destacar del modelo es cómo se manejan las variables de Personal y Personal mínimo, las dos fijadas en 10 operarios. Estas variables afectan a todas las estaciones a través del cociente Personal/Personal mínimo, que actúa como un multiplicador de la capacidad.

El reabastecimiento de materia prima se programó con un IF THEN ELSE: cuando el inventario baja de 10 unidades, entran 50 unidades automáticamente. Ese umbral junto con la tasa de reposición genera un comportamiento oscilatorio que se parece bastante a los ciclos de compra que se observaron durante las visitas al taller.

Configuración de los escenarios probables

Los escenarios se diseñaron a partir de los problemas que se habían detectado en el diagnóstico, con una configuración de 100 horas de trabajo, especialmente el cuello de botella en ensamble y el impacto de los tiempos muertos sobre la eficiencia:

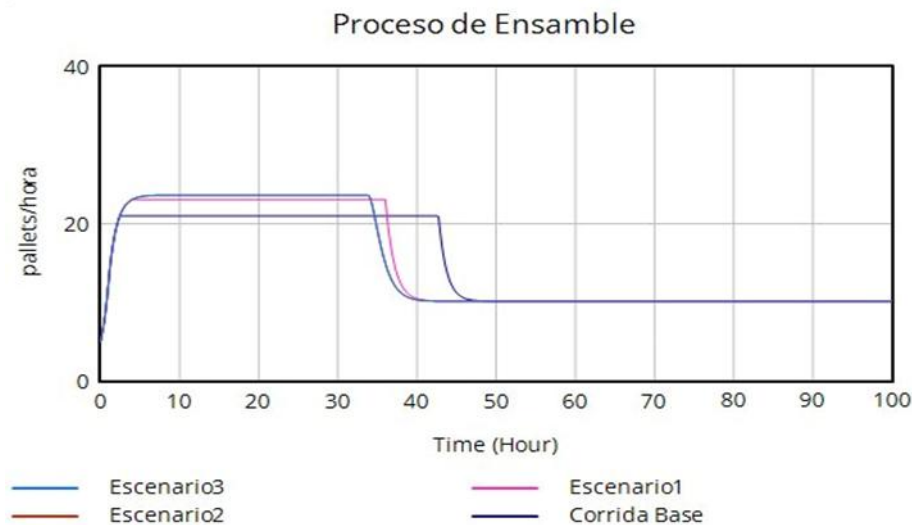
- Escenario 1: consistió en añadir otro trabajador en la etapa de ensamble. Dado que ese trabajador se asignaría exclusivamente a esa estación, la capacidad efectiva aumenta gracias a la fracción $(\text{Personal}+1)/\text{Personal mínimo}$, lo que a su vez incrementa la salida del sistema sin alterar las estaciones de corte.
- Escenario 2: En lugar de agregar más gente o máquinas, se centró en implementar mantenimiento preventivo para reducir al mínimo el tiempo perdido por averías. En el modelo, esto se tradujo en un aumento de la capacidad base: pasó de 21 a 23,65 pallets por hora.

- Escenario 3: combinó ambas estrategias, el operario extra en ensamble más la mejora generalizada de eficiencia por mantenimiento preventivo. El objetivo era verificar si los dos efectos se potencian mutuamente o si el sistema tiene algún techo que no se puede superar.

Resultados de la simulación: Análisis de la tasa de producción (Proceso de ensamble)

Figura 4

Comportamiento comparativo de la tasa de producción en la estación de ensamble



Fuente: *Elaboración propia.*

La Figura 4 muestra cómo evoluciona la tasa de salida del proceso de ensamble a lo largo de las 100 horas simuladas. En los escenarios 1 y 3 (las curvas magenta y azul oscuro) se comportaron casi idénticos durante toda la simulación. Ambas se mantuvieron alrededor de 23 pallets por hora, un poco por encima de la base gracias al operario adicional en ensamble. Sin embargo, después de la hora 35 las dos cayeron fuerte y terminaron estabilizándose cerca de las 10 unidades. La razón es que se les acabó el inventario de materia prima y el trabajo en proceso de las estaciones anteriores, al aumentar la capacidad de ensamble, la restricción simplemente se movió hacia atrás, hacia el suministro de insumos.

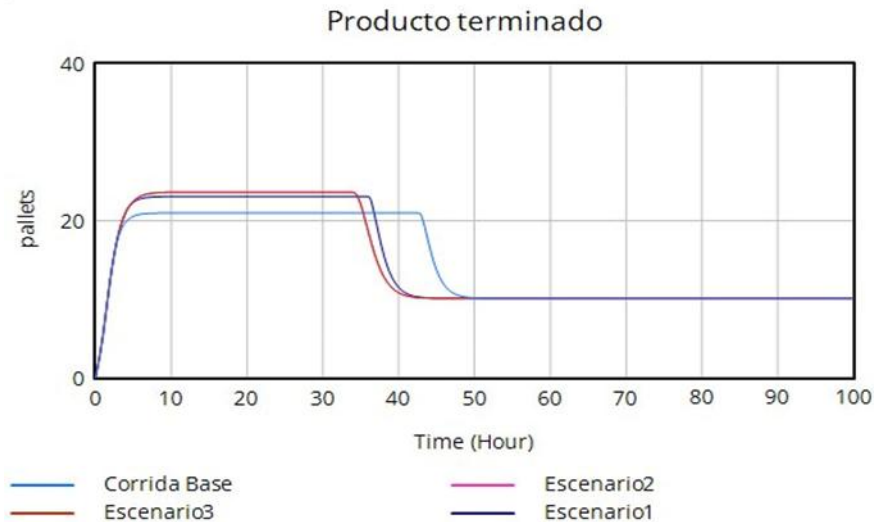
Por su parte, el Escenario 2 (curva roja) se vio más estable y sostenido. Se mantuvo cerca de 20 pallets por hora durante bastante más tiempo antes de empezar a decaer. Al no forzar tanto el

ensamble por encima de lo que pueden entregar las estaciones de corte, el consumo de WIP fue más gradual y el sistema tardó más en desequilibrarse.

Inventario de Producto Terminado

Figura 5

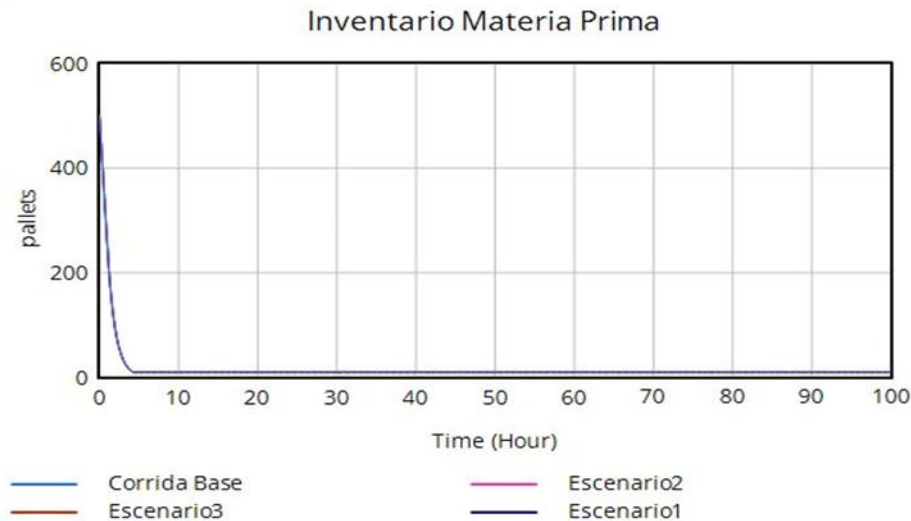
Evolución del inventario de producto terminado por escenario



Fuente: *Elaboración propia.*

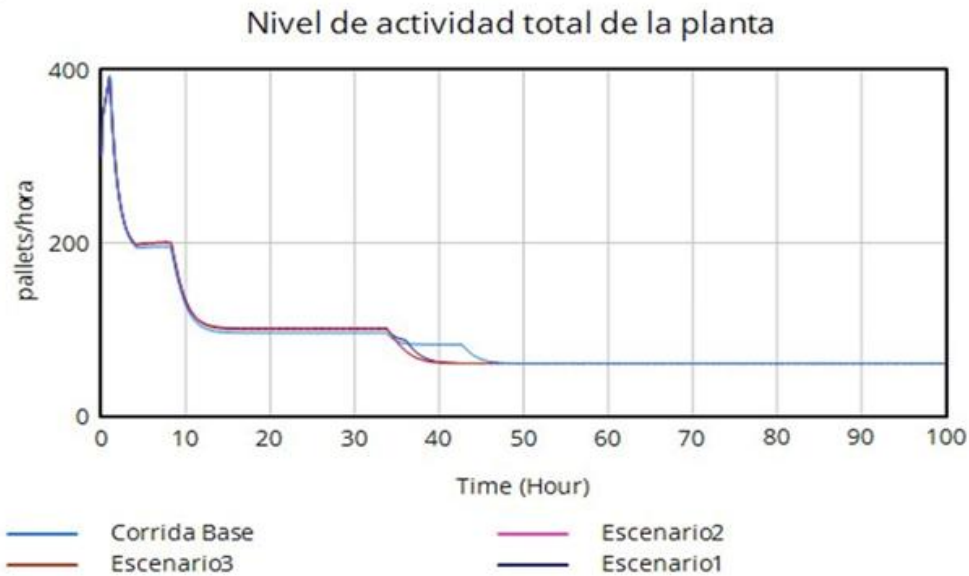
En las primeras 35 horas, los Escenarios 1, 2 y 3 lograron mantener un nivel bastante estable, rondando los 23 pallets disponibles. El escenario base, en cambio, se quedó más abajo, cerca de las 21 unidades. Esto pasó porque al principio el ritmo de fabricación fue más rápido que el de despacho. Ese desfase creó un colchón de producto terminado en los tres escenarios de mejora. A partir de la hora 35, los Escenarios 1, 2 y 3 empezaron a caer fuerte y terminaron estabilizándose alrededor de las 10 unidades. Para la gestión del taller, el mensaje es claro: los escenarios con mayor capacidad de ensamble (E1, E2 y E3) generan un colchón más amplio de producto terminado mientras todo funciona a pleno.

Inventario de Materia Prima

Figura 6*Evolución del inventario de materia prima por escenario***Fuente:** *Elaboración propia*

Partiendo de las 500 unidades iniciales, el stock cayó en picada durante las primeras 4 o 5 horas y se quedó prácticamente en cero el resto de la simulación. Las cuatro curvas son tan parecidas que resultan casi imposibles de distinguir. La razón es estructural; las estaciones de corte tienen una capacidad muy alta: la partidora procesa 250 u/h y la cortadora de exteriores llega hasta 1.000 u/h. Eso hace que el material se consuma mucho más rápido de lo que la política actual de reabastecimiento puede reponerlo, sin importar qué se cambie aguas abajo. Para la gestión de compras esto es clave. Hay que revisar tanto el umbral que dispara el pedido como el tamaño del lote, porque si no se corrige esto, cualquier esfuerzo por aumentar la capacidad de ensamble termina siendo inútil por falta de material.

Nivel de Actividad Total de la Planta

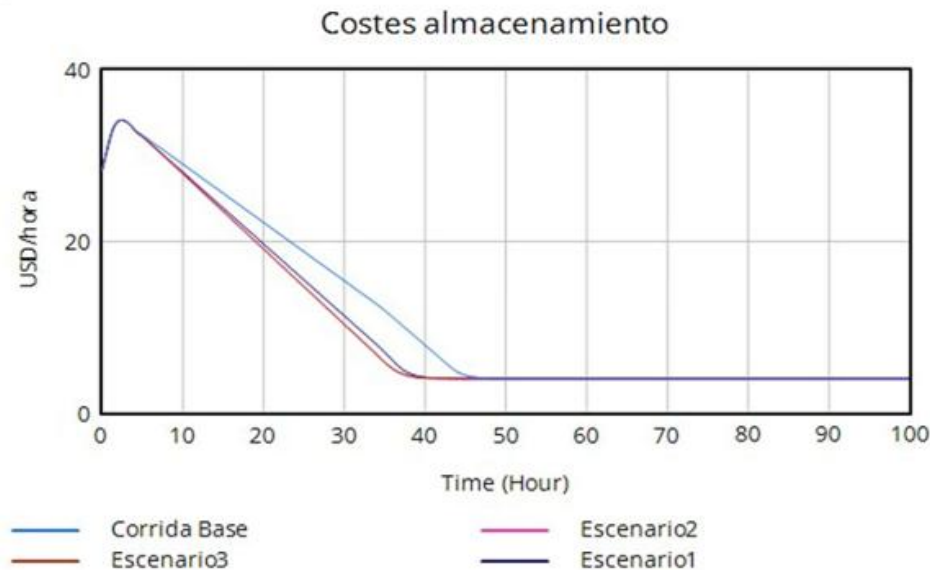
Figura 7*Nivel de actividad total de la planta por escenario***Fuente:** *Elaboración propia*

La figura 7 muestra la suma de las tasas de procesamiento de las seis estaciones, es decir, el nivel total de actividad de la planta. Al comienzo, los cuatro escenarios arrancaron consistentemente y alcanzaron casi 390 unidades por hora durante la primera hora, mientras todavía había materia prima disponible. Después de ese pico inicial, las curvas bajaron a un primer nivel intermedio de alrededor de 190 u/h entre las horas 2 y 7, y luego descendieron aún más, quedándose cerca de las 100 u/h hasta aproximadamente la hora 35. A partir de ese momento, los Escenarios 1, 2 y 3 cayeron antes que el escenario base y se estabilizaron alrededor de 60 u/h. La corrida base, en cambio, mantuvo niveles un poco más altos hasta cerca de la hora 45, antes de terminar convergiendo al mismo punto bajo. Este indicador es útil para entender la carga real de trabajo bajo cada estrategia. La conclusión es bastante clara: si solo se mejora el ensamble, se consigue un arranque más agresivo, pero también una caída más temprana.

Costos de Almacenamiento

Figura 8

Costes de almacenamiento por escenario



Fuente: *Elaboración propia*

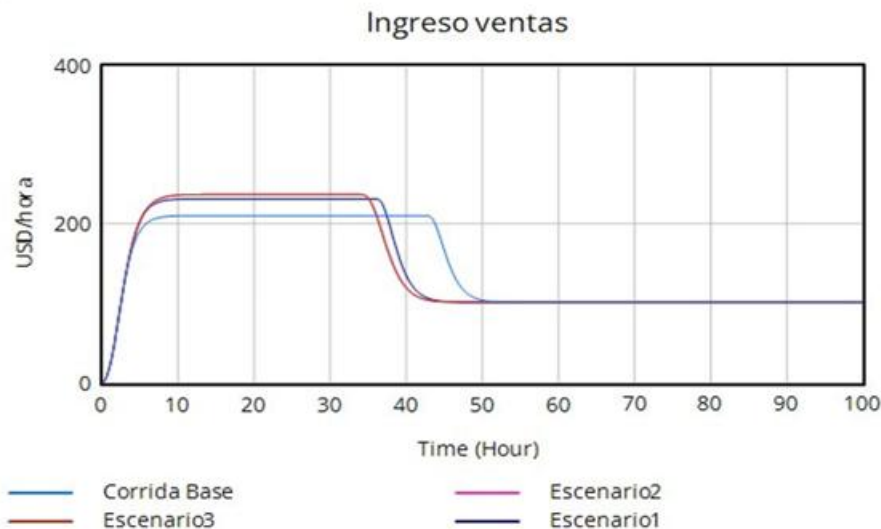
La Figura 8 presenta la evolución de los costos de almacenamiento a lo largo de la simulación, medidos en USD por hora. Todas las curvas arrancan cerca de los 28 USD/h y suben durante las primeras tres horas hasta alcanzar un pico común de alrededor de 35 USD/h. Ese repunte se debe a la acumulación inicial de inventarios en las distintas etapas, con los costos unitarios que maneja el modelo: 0,05 USD por unidad de materia prima, 0,065 para el WIP intermedio, 0,075 para el WIP de ensamble y 0,08 para el producto terminado.

Después de ese pico, los Escenarios 1, 2 y 3 bajan más rápido y llegan al nivel mínimo cerca de la hora 38, quedándose en unos 4 USD/h. La corrida base desciende más despacio y toca ese mismo piso alrededor de la hora 47. A partir de ahí, las cuatro curvas se juntan y se mantienen prácticamente planas hasta el final. Desde el punto de vista financiero, el comportamiento es bastante equilibrado. Ningún escenario genera costos de almacenamiento descontrolados; los picos se quedan dentro de un rango manejable.

Análisis de los Ingresos por Ventas

Figura 9

Evolución de los ingresos por ventas por escenario



Fuente: *Elaboración propia*

La Figura 9 muestra cómo evolucionan los ingresos a lo largo de las 100 horas simuladas. Durante las primeras 35 horas, los Escenarios 1, 2 y 3 generaron alrededor de 230 USD por hora, mientras que el escenario base se quedó cerca de los 210 USD/hora. La diferencia se debe a la mayor capacidad de ensamble, que permitió terminar y despachar más pallets mientras había material disponible. A partir de la hora 35, los ingresos de los tres escenarios de mejora cayeron en picada y se estabilizaron cerca de los 100 USD por hora. El escenario base, en cambio, mantuvo sus 210 USD/hora hasta aproximadamente la hora 43, antes de bajar al mismo nivel.

Al proyectar estos datos a un mes completo de operación (22 días hábiles de 8 horas), la matriz económica arroja ganancias netas mensuales de 3.050,56 USD para el Escenario 1, 4.409,20 USD para el Escenario 2 y 7.926,16 USD para el Escenario 3 (este último asumiendo que se resuelve el abastecimiento de materia prima). Estas cifras ya restan los costos adicionales de personal y mantenimiento.

Análisis económico integrado de los escenarios

Además de los resultados físicos arrojados por la simulación, se construyó una matriz económica que cuantifica la viabilidad financiera de cada escenario sobre una base mensual de 22 días hábiles y un precio unitario de 10 USD/pallet. Los costos de personal adicional se calcularon a partir del Salario Básico Unificado 2025 de Ecuador (460 USD), incorporando aporte patronal IESS (11,15%), décimo tercer y cuarto sueldo prorrateado, vacaciones y fondo de reserva, lo que arroja un costo real mensual de 645,44 USD por operario. El programa de mantenimiento preventivo se valoró en 254,80 USD/mes considerando lubricantes, repuestos preventivos y mano de obra dedicada. Los resultados consolidados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3

Matriz económica comparativa de los escenarios de mejora

Indicador	Base	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Inversión mensual (USD)	0,00	645,44	254,80	900,24
Producción diaria (u/día)	168,00	184,80	189,20	208,12
Incremento sobre base (%)	—	10,00%	12,62%	23,88%
Ingreso adicional mensual (USD)	0,00	3.696,00	4.664,00	8.826,40
Ganancia neta mensual (USD)	0,00	3.050,56	4.409,20	7.926,16
Ganancia neta anual (USD)	0,00	36.606,70	52.910,46	95.113,96
ROI mensual	—	4,73	17,30	8,80
Recuperación de inversión (meses)	—	2,54	0,69	1,36
Prioridad recomendada	—	2. ^a	1.^a	3. ^a

Fuente: *Elaboración propia*

Al juntar los resultados de la simulación con el análisis económico, queda clara la mejor forma de avanzar: por etapas. Lo más sensato es empezar con el mantenimiento preventivo, asegurar después un suministro confiable de materia prima y, solo entonces, evaluar si conviene sumar el operario adicional, siempre y cuando el aumento de la demanda lo justifique. Esta secuencia permite obtener el máximo provecho de cada dólar invertido y reduce considerablemente los riesgos operativos. Es justamente el enfoque que suele recomendar la gestión de operaciones para talleres de este tamaño.

Discusión

El diagnóstico del taller dejó en evidencia que la estación de ensamble es la que manda en todo el sistema, con un tiempo estándar de 116,91 segundos que acapara el 68% del ciclo total. Esto se alinea con lo que encontraron Lagarda-Leyva et al. (2023) cuando aplicaron dinámica de sistemas en una empresa de pallets en Sonora, México: sin identificar con precisión dónde están las restricciones, no se puede formular ningún escenario de mejora que valga la pena. Ahora, la diferencia está en que ellos trabajaron con una planta grande usando técnicas multicriterio TOPSIS y FUCA, mientras que acá el problema no es de complejidad tecnológica sino de tener toda la carga manual concentrada en una sola estación. Son escalas distintas pero el principio es el mismo.

La eficacia del 72,80% se mantuvo por debajo de lo que la bibliografía estima como aceptable. Rosova et al. (2022) establecen el umbral mínimo por encima del 85% y documentaron en sus casos de estudio que la simulación puede producir un avance del 20 al 30 % en los tiempos de ciclo. Estos números son consistentes con lo que se observó en el Escenario 2 de esta investigación, donde la producción aumentó de 21 a alrededor de 23.65 unidades por hora gracias al mantenimiento preventivo simulado.



Conclusiones

El modelo construido reprodujo bastante bien la realidad del taller, la simulación arrojó una producción de 21 pallets por hora, un número que coincide exactamente con lo que se mide día a día en el centro de producción. Con siete variables de nivel, ocho flujos y las variables económicas incorporadas, el modelo logró capturar de forma integrada cómo interactúan la capacidad, el personal, la materia prima y los indicadores financieros.

Las simulaciones entregaron resultados claros y prácticos. Añadir un operario en la estación de ensamble eleva la producción hasta 23 pallets por hora, siempre y cuando haya material disponible. El mantenimiento preventivo, en cambio, logra unas 20 unidades por hora, pero con un comportamiento mucho más estable y un consumo de recursos más equilibrado a lo largo del tiempo.

El hallazgo más importante fue que los escenarios 1 y 3 terminaron convergiendo; eso demostró en la práctica el principio del desplazamiento de restricciones, si mejora solo la capacidad de ensamble sin tocar la cadena de suministro, el cuello de botella no desaparece, simplemente se mueve hacia la materia prima. Queda demostrado que la Dinámica de Sistemas es una herramienta que funciona bien para analizar procesos productivos en talleres pequeños. Permite comparar estrategias sin arriesgar tiempo ni dinero en cambios que podrían no funcionar; el modelo que se desarrolló no es un ejercicio académico que se queda en el papel es un instrumento de planificación que el taller puede seguir usando para anticipar qué va a pasar antes de tomar decisiones.



Referencias bibliográficas

- Alanya-Rosenbaum, S., Bergman, R. D., & Gething, B. (2021). Assessing the life-cycle environmental impacts of the wood pallet sector in the United States.
- Antonelli, D., Litwin, P., & Stadnicka, D. (2018). Multiple System Dynamics and Discrete Event Simulation for manufacturing system performance evaluation. *Procedia CIRP*, 78, 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.312>
- Fetene Adane, T., Bianchi, M. F., Archenti, A., & Nicolescu, M. (2019). Application of system dynamics for analysis of performance of manufacturing systems. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 53, pp. 212–233). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.004>
- Gejo-García, J., Reschke, J., Gallego-García, S., & García-García, M. (2022). Development of a System Dynamics Simulation for Assessing Manufacturing Systems Based on the Digital Twin Concept. *Applied Sciences* (Switzerland), 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042095>
- Groesser, S. N., & Schaffernicht, M. (2012). Mental models of dynamic systems: Taking stock and looking ahead. *System Dynamics Review*, 28(1), 46–68. <https://doi.org/10.1002/sdr.476>
- Hipólito, V., Álvaro, P., Karla, ;, & Alvarado Ramírez, M. (2018). HOME Revista ESPACIOS ! Evaluación de eficiencia y productividad de PyMEs productivas usando análisis envolvente de datos e índice Malmquist Evaluation of efficiency and productivity of productive SMEs using data envelopment analysis and Malmquist index (Vol. 39).
- Hoffmann, J., Mai, C., Hu, B., & Buettner, R. (2025). A Systematic Literature Review on System Dynamics. *IEEE Access*, 13, 88871–88887. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3571620>
- Kaur, G., & Kander, R. (2025). System Dynamics for Manufacturing: Supply Chain Simulation of Hemp-Reinforced Polymer Composite Manufacturing for Sustainability. *Sustainability* (Switzerland), 17(2). <https://doi.org/10.3390/su17020765>
- Kočí, V. (2019). Comparisons of environmental impacts between wood and plastic transport pallets. *Science of the Total Environment*, 686, 514–528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.472>



- Lagarda-Leyva, E. A., Ruiz, A., & Morales-Mendoza, L. F. (2024). A System Dynamics Approach to Valorize Overripe Figs in the Brewing of Artisanal Beer. *Sustainability*, 16(4), 1627. <https://doi.org/10.3390/su16041627>
- Mikati, N. (2010). Dependence of lead time on batch size studied by a system dynamics model. *International Journal of Production Research*, 48(18), 5523–5532. <https://doi.org/10.1080/00207540903164628>
- Poles, R. (2013). System Dynamics modelling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies. *International Journal of Production Economics*, 144(1), 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.003>
- Romero, M., & Velasteguí, D. (2011). Descripción de las Cadenas Productivas de Madera en el Ecuador Elaboración.
- Rosova, A., Behun, M., Khouri, S., Cehlar, M., Ferencz, V., & Sofranko, M. (2022). Case study: the simulation modeling to improve the efficiency and performance of production process. *Wireless Networks*, 28(2), 863–872. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02341-z>
- Skoogh, A., Thürer, M., Subramaniyan, M., Matta, A., & Roser, C. (2023a). Throughput bottleneck detection in manufacturing: a systematic review of the literature on methods and operationalization modes. *Production and Manufacturing Research*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2283031>
- Skoogh, A., Thürer, M., Subramaniyan, M., Matta, A., & Roser, C. (2023b). Throughput bottleneck detection in manufacturing: a systematic review of the literature on methods and operationalization modes. *Production and Manufacturing Research*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2283031>
- Sterman, J., Oliva, R., Linderman, K., & Bendoly, E. (2015). System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management. In *Journal of Operations Management* (Vols. 39–40, pp. 1–5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2015.07.001>
- Tang, J., Dai, Z., Jiang, W., Wu, X., Zhuravkov, M. A., Xue, Z., & Wang, J. (2024). A Comprehensive Review of Theories, Methods, and Techniques for Bottleneck Identification and Management in Manufacturing Systems. In *Applied Sciences* (Switzerland) (Vol. 14, Number 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute



(MDPI). <https://doi.org/10.3390/app14177712>

Teunter, R. H., & Flapper, S. D. P. (2011). Optimal core acquisition and remanufacturing policies under uncertain core quality fractions. *European Journal of Operational Research*, 210(2), 241–248. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.015>

Tornese, F., Gnoni, M. G., Thorn, B. K., Carrano, A. L., & Pazour, J. A. (2021). Management and logistics of returnable transport items: A review analysis on the pallet supply chain. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Number 22). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/su132212747>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.