

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,
Volumen 9, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA DE UN SISTEMA DE MANUFACTURA DE ESTRUCTURAS METÁLICAS

**STOCHASTIC SIMULATION OF A MANUFACTURING SYSTEM FOR
METAL STRUCTURES**

Esteban Rubio Ochoa

Instituto Tecnológico de Chihuahua

Laura Isela Padilla Iracheta

Instituto Tecnológico de Chihuahua

Jaime Eduardo Trejo Aguirre

Instituto Tecnológico de Chihuahua

Simulación estocástica de un sistema de manufactura de estructuras metálicas

Esteban Rubio Ochoa¹

esteban.ro@chihuahua.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-2422-5234>

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado
México

Laura Isela Padilla Iracheta

laura.pi@chihuahua.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9410-1691>

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Departamento de Metal Mecánica
México

Jaime Eduardo Trejo Aguirre

jaime.ta@chihuahua.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3989-8025>

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Departamento de Metal Mecánica
México

RESUMEN

Se estudió una línea de producción de estructuras metálicas. Después de crear un modelo digital del sistema bajo estudio, se empleó simulación como herramienta de evaluación virtual, el sistema de manufactura se definió como dinámico, estocástico y de eventos discretos. Se validó un modelo y se comparó la producción promedio simulada con la real, obteniendo resultados consistentes. El análisis identificó un cuello de botella al trazar el armado de la estructura, que se optimizó aplicando la herramienta SMED, (*single minute exchange of dies*). Se redujo el tiempo ciclo de la operación de trazo en 30%, que representa un incremento del 10.43% en la razón de producción diaria.

Palabras clave: simulación, estocástica, virtual

¹ Autor principal

Correspondencia: esteban.ro@chihuahua.tecnm.mx

Stochastic simulation of a manufacturing system for metal structures

ABSTRACT

The production line of metal structures was studied. After creating a digital model of the system under study, simulation was used as a virtual evaluation tool, and the manufacturing system was defined as dynamic, stochastic, and discrete event. A model was validated, and the simulated average production was compared with the real production, yielding consistent results. The analysis identified a bottleneck when tracing the assembly of the structure, which was optimized by applying the SMED tool (single minute exchange of dies). The cycle time of the tracing operation was reduced by 30%, representing an increase of 10.43% in the daily production rate.

Keywords: virtual, stochastic, simulation

Artículo recibido 04 Agosto 2025

Aceptado para publicación: 29 Agosto 2025



INTRODUCCIÓN

Se recorrió una línea de manufactura de estructuras metálicas y se observó evidente lo complejo del sistema, con variables que siguen distribuciones de probabilidad. Para estudiarlo a profundidad la simulación estocástica surge como una herramienta idónea para abordarlo. La simulación es una herramienta que se utiliza para probar y evaluar escenarios en un entorno virtual, permite hacer cambios en el modelo antes de implementarlos en la realidad.

Se leyeron artículos recientes relacionados con la simulación de sistemas estocásticos de eventos discretos aplicados a la fabricación, con especial énfasis en la producción de estructuras metálicas. La mayoría de los estudios analizados se han enfocado en optimizar la planeación de la producción y en incrementar la eficiencia de los procesos. Algunas de estas investigaciones se han centrado en describir el funcionamiento de la aplicación del software de simulación.

A continuación, se presentan algunos de los hallazgos más relevantes en este campo. Laroque *et al* (2022) exploraron un enfoque de simulación retrospectiva para la fabricación de semiconductores, demostrando su eficacia para abordar los desafíos de programación de pedidos específicos de clientes. Gyulai *et al* (2021) desarrollaron un modelo de simulación de eventos discretos para sistemas logísticos complejos de planta de producción que utilizan vehículos guiados automatizados, mostraron su utilidad para probar políticas administrativas. Dongping y Yajing (2020) revisaron las aplicaciones de simulación de eventos discretos en la fabricación, destacando las capacidades del software de simulación de plantas en varios aspectos, como el diseño de la producción, el enrutamiento y la distribución de materiales. Mirzaei *et al* (2021) combinaron métodos de balanceo de línea con simulación de eventos discretos en un estudio de caso de una empresa metalúrgica, priorizando el número de estaciones de trabajo, la eficiencia de la línea y la suavidad como criterios de rendimiento. Morabito *et al* (2021) trabajaron en un procedimiento de simulación de eventos discretos para construir un gemelo digital de producción de sistemas de fabricación complejos y altamente automatizados, demostrado en una línea de producción de ejes ferroviarios.

Con base en los antecedentes revisados, se determinó que el presente trabajo es relevante, ya que hace falta, de manera explícita, una aplicación de la simulación de procesos de manufactura de estructuras metálicas orientada a proponer mejoras específicas en el sistema.

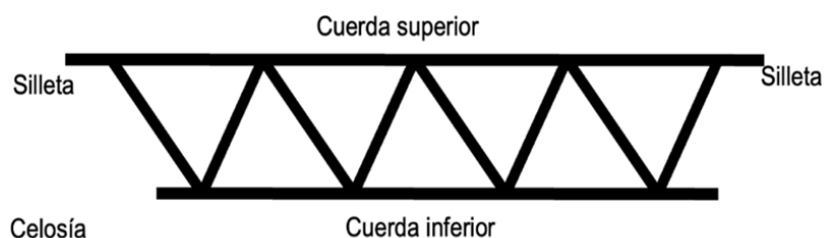


Por lo que el objetivo se definió. Proponer una forma de elevar la razón de producción de estructuras metálicas en la Línea 4, después de aplicar la simulación estocástica, utilizando los mismos recursos de producción.

DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La línea de manufactura estudiada fabrica elementos estructurales de acero llamados *joist* utilizados en la industria de la construcción, es una estructura que soporta directamente las láminas de la cubierta o entrepiso. Se compone de cuerdas superiores e inferiores; celosía que conecta las cuerdas superior e inferior y silleta para conectar el *joist* con sus apoyos. La figura 1 muestra un *joist*.

Figura 1. Elementos de un *joist*



CONSIDERACIONES

SISTEMA

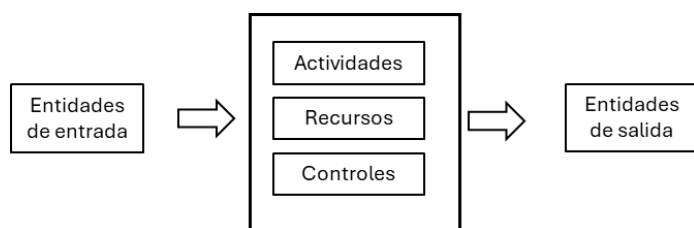
Para Meadows (2008) un sistema es un conjunto de elementos o partes que están coherentemente organizados e interrelacionados en un patrón o estructura que produce un conjunto característico de comportamientos, frecuentemente clasificados como su función o propósito. En la tabla 1 se muestran los elementos del sistema bajo estudio.

Tabla 1. Elementos de un sistema

Concepto	Descripción
Entidades	Lo que se procesa a través del sistema
Actividades	Tareas realizadas en el sistema que están directa o indirectamente involucradas en procesamiento de entidades
Recursos	Medios por los cuales las actividades son desempeñadas
Controles	Indican cómo, cuándo y dónde las actividades se desarrollan

La figura 2 muestra, en esquema, los elementos del sistema. La complejidad del sistema es una función de los siguientes dos factores, la interdependencia entre elementos y la variabilidad en el comportamiento de los elementos que produce incertidumbre.

Figura 2. Esquema del sistema



Según Harrell *et al.* (2004), la simulación consiste en reproducir las condiciones de un sistema dinámico mediante un modelo computarizado, con el objetivo de evaluar y mejorar su desempeño. El poder de la simulación radica en su capacidad para predecir con precisión el desempeño de los sistemas. Cuando se habla de hacer simulación, se refiere al proceso de diseñar un modelo que represente al sistema real y realizar experimentos controlados. La simulación es una herramienta de evaluación, no de solución; es un soporte para la toma de decisiones no un sustituto.

El sistema de la línea que se simuló es dinámico, su estado cambia con el tiempo; estocástico, su proceso es aleatorio y su comportamiento se puede definir con funciones de probabilidad; y de eventos discretos. Para este tipo de sistema se utilizó ProModel, un software orientado a objetos, sus gráficos facilitan la animación del recorrido de las piezas por el sistema.

Variables

La distribución de probabilidad es la descripción de cómo se distribuyen las probabilidades entre los valores que puede asumir una variable aleatoria (Anderson *et al.*, 1999). Para una variable aleatoria discreta, es común especificar la distribución con una lista de valores posibles junto con la probabilidad de cada uno; resulta conveniente expresar la probabilidad en términos de una fórmula. Las distribuciones de probabilidad discretas son: discreta uniforme, binomial, geométrica y binomial negativa, hipergeométrica y de Poisson.

Una vez que se ha verificado la independencia y la correlación de los datos numéricos, estos pueden transformarse en un formato adecuado para su uso en un modelo de simulación. Los datos recopilados,

como los tiempos de actividad, los intervalos de llegada o el tamaño de los lotes, pueden representarse en el modelo de simulación según se ajusten a una distribución de probabilidad teórica.

Para determinar la distribución de probabilidad más adecuada, se utiliza la herramienta Stat::Fit de ProModel. Esta, analiza los datos y compara múltiples distribuciones mediante una calificación basada en pruebas estadísticas como la Chi-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y Anderson-Darling. Stat::Fit calcula los parámetros necesarios para cada distribución, como la media, la moda, los valores mínimo y máximo y la varianza. Esta herramienta facilita la selección de la distribución teórica que mejor representa a los datos; fundamental para construir modelos de simulación precisos y confiables.

Los elementos del modelo implementado son las entidades que representan a los elementos que serán procesados; localizaciones, son los lugares donde ocurre el procesamiento; recursos, son los agentes como máquinas o personas que procesan y mueven entidades y recorridos o rutas, los pasillos o caminos por donde las entidades y los recursos se desplazan. Cada uno de estos elementos tiene asociado su comportamiento operacional y la lógica de procesamiento, por ejemplo, los tiempos de llegadas de las entidades. Cuando el modelo se ejecuta, la base de datos se compila para generar la base de datos de la simulación. La salida del procesador ofrece estadísticas detalladas sobre los indicadores clave de desempeño del sistema. Los resultados de la simulación se presentan con diversos formatos para analizar e interpretar datos.

SMED

SMED es el acrónimo de *single minute exchange of die*, cambio de herramienta en pocos minutos. Es una herramienta con la que se pretende hacer más productiva una línea de manufactura, aumentar su razón de producción. Al aplicar esta herramienta se reduce el tiempo de *set-up* a menos de 10 minutos. Este concepto introduce la idea de que, en general, cualquier cambio de máquina o inicialización de proceso debería durar no más de 10 minutos, de ahí la frase *single minute*, expresar los minutos en un solo dígito.

El enfoque del SMED se basa en convertir la mayor cantidad posible de *set-up* internos en externos, es decir, hacer todo el *set-up* posible mientras el equipo está en operación (Shingo, 1985).



MÉTODOLOGIA

García *et al.* (2006) presentan los pasos básicos para un estudio de simulación: Definir el sistema bajo estudio, generar modelo de simulación base, recolectar y analizar los datos, generar modelo preliminar, verificar el modelo, validar el modelo, generar el modelo final, determinar los escenarios para análisis, análisis de sensibilidad, finalmente, documentación del modelo y conclusiones.

Definición del sistema bajo estudio

Al solicitar a la empresa el diagrama de flujo del proceso de la Línea 4, se identificó que este no estaba concluido y que la simbología utilizada correspondía a programación de sistemas computacionales. Se aplicaron los principios de ingeniería industrial y se elaboró un diagrama de flujo con la simbología recomendada por Niebel (1980). Se recorrió la línea en sentido contrario al flujo de producción, desde el almacén de producto terminado hasta recepción de materia prima. Este enfoque permitió comprender el sistema bajo estudio y recopilar la información para construir el diagrama de flujo del proceso de la línea.

Generación del modelo de simulación base

Se identificaron los elementos del sistema:

Entidades, son las piezas que van a ser procesadas en la línea. Se inicia con las cuerdas superiores e inferiores, luego se une la celosía y forman un *joist*.

Actividades, son las tareas realizadas para procesar entidades. Llegada de materia prima, habilitado, armado, soldado, limpieza e inspección, fleje, pintura, secado y almacén.

Recursos, son los medios con los que las actividades son realizadas; habilitadores, armadores, soldadores, inspector, flejadores, pintores, grúa de atados y grúa de pintura.

Los controles indican cuándo y dónde las actividades serán desarrolladas; la secuencia de trabajo y las camas de espera.

Recolección y análisis de datos

Los datos estructurales requeridos incluyen todos los objetos que forman parte del sistema a modelar, como entidades, herramientas, máquinas, personal y localizaciones. Se consideraron los tiempos de descanso y comida, ajustando la simulación a un turno de 8.5 horas efectivas, que representa un día laboral típico. Los datos numéricos proporcionan información cuantitativa sobre el sistema, son

fundamentales para representar con precisión el comportamiento del sistema. Los datos numéricos considerados fueron, tamaño de la orden de trabajo, y los tiempos de habilitado de cuerdas inferiores y superiores, de trazo, de armado, de soldado, de inspección, de retrabajo, de flejado y de pintura.

Se identificaron las fuentes de datos mediante la observación directa de las operaciones con cronómetro en mano, Se tomó el tiempo de ciclo, cantidad de piezas en las localizaciones, el tamaño de las órdenes de trabajo, se conocieron datos de los registros históricos de producción, se utilizó el plano en Auto CAD de la distribución de la planta.

Modelo preliminar

Se procedió a la construcción del modelo preliminar. Se actualizaron los contadores del software. Al revisar las órdenes de trabajo en la línea se observó que cuando se modifican las especificaciones geométricas y dimensionales del *joist*, se cambia el modelo. Con 49 órdenes de trabajo se hizo una tabla de distribución de probabilidad del tamaño de la orden de trabajo. Los datos tomados se ingresaron al programa Stat::Fit para encontrar la distribución de probabilidad a la que se ajustaron. En este punto el modelo ya está listo para ser probado y comparado con la realidad.

Verificación del modelo

Se comprobó que la programación y los parámetros utilizados funcionaban correctamente. Durante esta fase, se confirmó que el modelo operaba como se esperaba y que la simulación se ejecutaba sin errores. Es importante distinguir entre verificación y validación. La verificación se refiere a asegurar que el modelo se construyó correctamente y validar es confirmar que se construyó el modelo correcto, el que representa de manera precisa al sistema real bajo estudio.

Validación del modelo

Se validó el modelo comparando el resultado de la simulación con el reporte de producción diario. Se tomó una muestra de 70 datos de la producción diaria de *joist*. Se hizo un análisis basado en estadística inferencial, se trabajó con una muestra para estimar la media μ de la producción promedio diaria de *joist* en la planta, calculando un valor $\bar{x}$ como el promedio simple de la muestra de 70 días del reporte de producción diaria disponible, en condiciones normales.

El valor de la media μ , de la población, es un estimado del valor real de la media de la producción promedio diaria de *joist* en la planta. Además de estimar la media real, y desconocida, de la población

también se estimó la desviación estándar de la población en base al tamaño de la muestra n de 70 observaciones. Esta desviación estándar s es un estimado de la desviación estándar σ , real y desconocida.

Hasta aquí se calcularon valores que estiman los parámetros de la población μ y σ ; con ellos se calcularon intervalos que indican qué tan lejos del punto estimado $\bar{x}$ esta la media real μ , el método utilizado fue el cálculo de intervalos de confianza, que es un rango dentro del cual se puede tener cierto nivel de confianza de que la media real estará dentro del rango. Es un intervalo simétrico respecto a $\bar{x}$; el intervalo de confianza expresa la probabilidad de que la media desconocida estén el intervalo; dicha probabilidad es el nivel de confianza. El ancho del intervalo indica la exactitud del punto estimado por lo que se desea tener un intervalo pequeño con alto nivel de confianza.

El interés era conocer el número de réplicas necesarias para establecer un intervalo de confianza particular con una cantidad específica de error ϵ entre el punto estimado de la media $\bar{x}$ y el valor de la media real desconocida μ . En este caso se consideró ϵ como porcentaje de $\bar{x}$ y se determinó que fuera un 5%. Además, se requiere un nivel de aceptación α de 95% ($1 - \alpha = 0.95$); es decir, se busca el número de réplicas que se requieren para afirmar con un 95% de confianza que la media de la muestra $\bar{x}$ y μ no excede una cantidad específica de ϵ , de error.

El número de réplicas para simulaciones no terminales, está dado por la Ecuación (1):

$$n = \left(\frac{(Z_{\alpha/2})s}{\epsilon} \right)^2 \quad (1)$$

Se utilizó el valor de $Z = 1.96$ de la tabla de probabilidades acumuladas para la distribución normal estándar a un nivel de aceptación α de 95%. Es el valor utilizado en los cálculos estadísticos de este trabajo.

Con los valores: $\bar{x}$ y s se procedió a calcular el intervalo de confianza de la producción real. Dado que la variable aleatoria *joist* terminados por turno sigue una distribución normal, el intervalo de confianza, que es la media $\bar{x} \pm$ *un margen de error*, está dado por la Ecuación (2):

$$IC = \bar{x} \pm \frac{s}{\sqrt{n}}(t_{\alpha/2, n-1}) \quad (2)$$

Para el cálculo del margen de error en este trabajo se tiene de la distribución *t de Student* el valor de $(t_{\alpha/2, n-1}) = 1.994$, se utilizó este valor, dado el nivel de confianza aceptado α de 95% y por desconocer la desviación estándar de la población, la cual se estimó a partir de la muestra.

Enseguida, se corrió el modelo para 70 días de producción simulados, resultando una media $\bar{x}$ y una desviación estándar s . Con los valores $\bar{x}$ y s se procedió a calcular el intervalo de confianza de la producción simulada, que está dado por la ecuación (2). Después de haber realizado estas pruebas estadísticas se pudo comparar el sistema real y el modelo. Así, en cuanto a la validación del modelo, se determinó que el modelo conceptual refleja correctamente al sistema real; se concluyó que el modelo es significativo y representa la realidad; por lo que será el modelo raíz para definir escenarios a analizar en el siguiente paso.

Escenarios para el análisis

En la línea se manufactura un solo producto, *joist*. Con cualquier cambio en uno de sus elementos es ya otro modelo diferente de *joist*. Se tiene diversidad de modelos a manufacturar en la línea y se requieren varias operaciones de *set-up* para una producción diversificada en pequeñas cantidades. Ahora sigue proponer cómo reducir la razón de producción como mejora para el sistema bajo estudio. Tiempo ciclo en pintura $N(12.27, 2.6)$ minutos, en soldadura $0.871 + L(3.02, 0.94)$ minutos, el *set-up* en trazado $6.57 + E(2)$ minutos y el de punteado es $1.08 + L(1.41, 0.547)$ minutos. Por lo anteriormente observado, se propuso reducir el tiempo de *set-up* en trazado que cambia en proporción a la rapidez de cambio de los modelos en las órdenes de trabajo durante la jornada; este fue un problema original a resolver por SMED, varios modelos y lotes pequeños.

Había elementos comunes en el trazo, los modelos cambiaban y algunas dimensiones de herramental y piezas utilizadas eran iguales; por lo que había elementos similares. Los modelos cambiaban y conservaban su forma geométrica básica. El enfoque fue en elementos comunes y similares del *set-up* en trazo. En seguida se procedió a correr el modelo para obtener la razón de producción diaria de *joist* para diferentes tiempos de trazo. Se realizaron 30 corridas. El tiempo ciclo se redujo desde 6.57 minutos en intervalos de 1 minuto. Los resultados de mejora en la razón de producción por reducción de tiempo ciclo de *set-up* la empresa la consideró confidencial. El Ing. Shingo documentó algunos

resultados de la aplicación del SMED en la industria metal - mecánica en promedio se redujo el 95% del tiempo de *set-up*.

Análisis de sensibilidad

Se cambió en el modelo el tiempo de trazo reduciéndolo en 2 minutos y se corrió el modelo para 70 días de producción simulados, se obtuvo la media $\bar{x}$ y la desviación estándar s , con esos valores se procedió a calcular el intervalo de confianza de la producción simulada. Se obtuvieron resultados de cómo aumentaría la razón de producción si se aplicará el SMED y si se logra la reducción propuesta en *set-up*.

Documentación de resultados

Se definieron las variables del sistema de la línea de manufactura y, enseguida, se definió el sistema como se muestran en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Definición de las variables del sistema de la Línea 4

Variable	Definición	Ejemplo
Variable de decisión, es la variable independiente	Definen cómo trabajará el sistema	10 soldados asignados a la línea
Variables de respuesta	Indican el desempeño del sistema	10 soldados por hora
Variables de estado, son independientes	Indican la condición del sistema en un tiempo dado	10 soldados armados esperando ser soldados

Tabla 3. Definición del sistema de la Línea 4

Sistema	Definición	Comparación	Ejemplo
Dinámico	Apropiado para analizar sistemas de manufactura, operan sobre el tiempo	A diferencia de un sistema estático que no está basado en el tiempo, por ejemplo, sortear piezas	Conforme avanza el turno cambia el estado del sistema
Estocástico	En el sistema hay	Un sistema	El habilitado de

	variables aleatorias, determinístico sin cuerdas inferiores toma tiempo de las componentes 0.532 + actividades, intervalos aleatorios, por ejemplo, $L(0.159, 0.14)$ de llegadas y tiempo de cuando llegan siempre minutos. traslados cajas con cinco piezas
Eventos discretos	Se describe la probabilidad de ocurrencia de un valor específico Los eventos continuos describen la probabilidad de ocurrencia de un valor dentro de un rango En el área de producto terminado se cuentan <i>joist</i> enteros, uno por uno

Se obtuvieron los eventos detonantes, que son las causas o condiciones que desencadena las actividades, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Eventos detonantes

Actividad	El detonante de movimiento de entidades y detonante de uso de recursos es el mismo
Habilitado de cuerdas inferiores	Orden de trabajo y materia prima en el rack de cuerdas inferiores
Habilitado de cuerdas superiores	Orden de trabajo y materia prima en el rack de cuerdas superiores
Armado	Orden de trabajo y cuerdas habilitadas en las camas de amado de cuerdas inferiores y superiores
Soldadura	<i>Joist</i> en la cama de espera de soldado
Inspección y limpieza	<i>Joist</i> en la cama de limpieza
Retrabajo	Rechazo de un <i>joist</i>
Flejado	Suficientes <i>joist</i> para hacer un atado
Pintura	Disponibilidad de la grúa de pintura y atados

Se determinaron los datos estructurales, se muestran en la tabla 5.

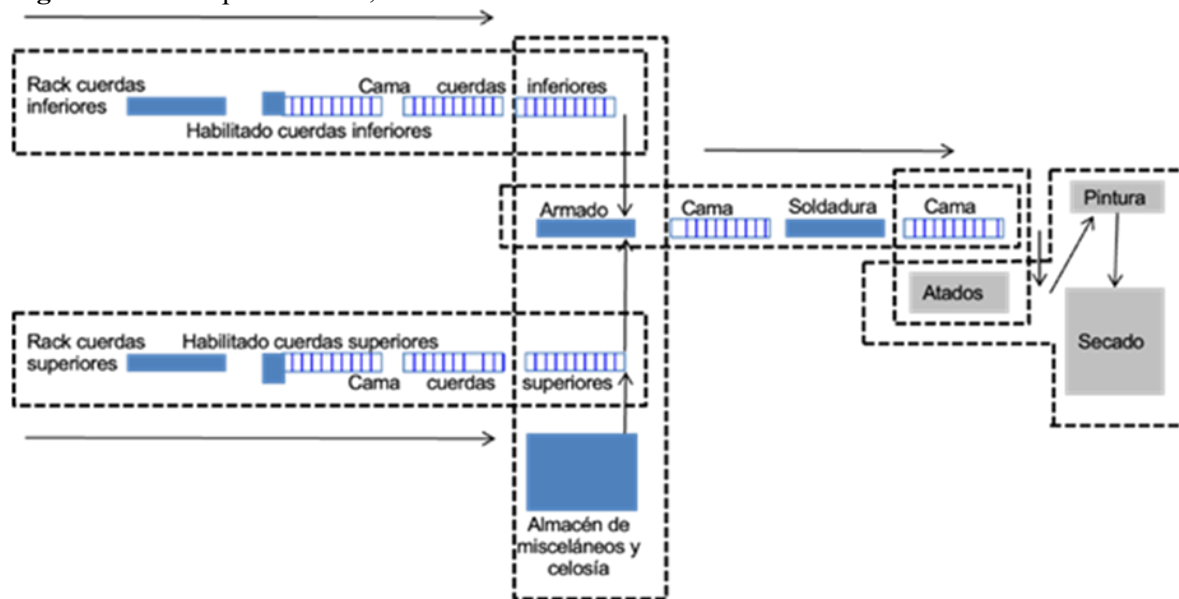
Tabla 5. Datos estructurales

Elemento	Dato
Entidades	Cuerda superior
	Cuerda inferior
	<i>Joist</i>
Localizaciones	Materia prima cuerdas inferiores
	Materia prima cuerdas superiores
	Habilitado cuerdas inferiores
	Habilitado cuerdas superiores
	Cama de cuerdas inferiores
	Cama de cuerdas superiores
	Cama de espera de cuerdas inferiores
	Cama de espera de cuerdas superiores
	Cama de armado de cuerdas inferiores
	Cama de armado de cuerdas superiores
	Cama de armado de <i>joist</i>
	Cama de espera de soldadura
	Cama de soldadura
	Limpieza
	Retrabajo
	Flejado
	Demora de atados
	Paila de pintura
	Secado
Recursos	2 Habilitador de cuerdas inferiores
	2 Habilitador de cuerdas superiores
	8 Armador
	10 Soldador
	2 Limpiador flejador
	1 Inspector
	2 Pintor
	1 Grúa limpieza
	1 Grúa pintura



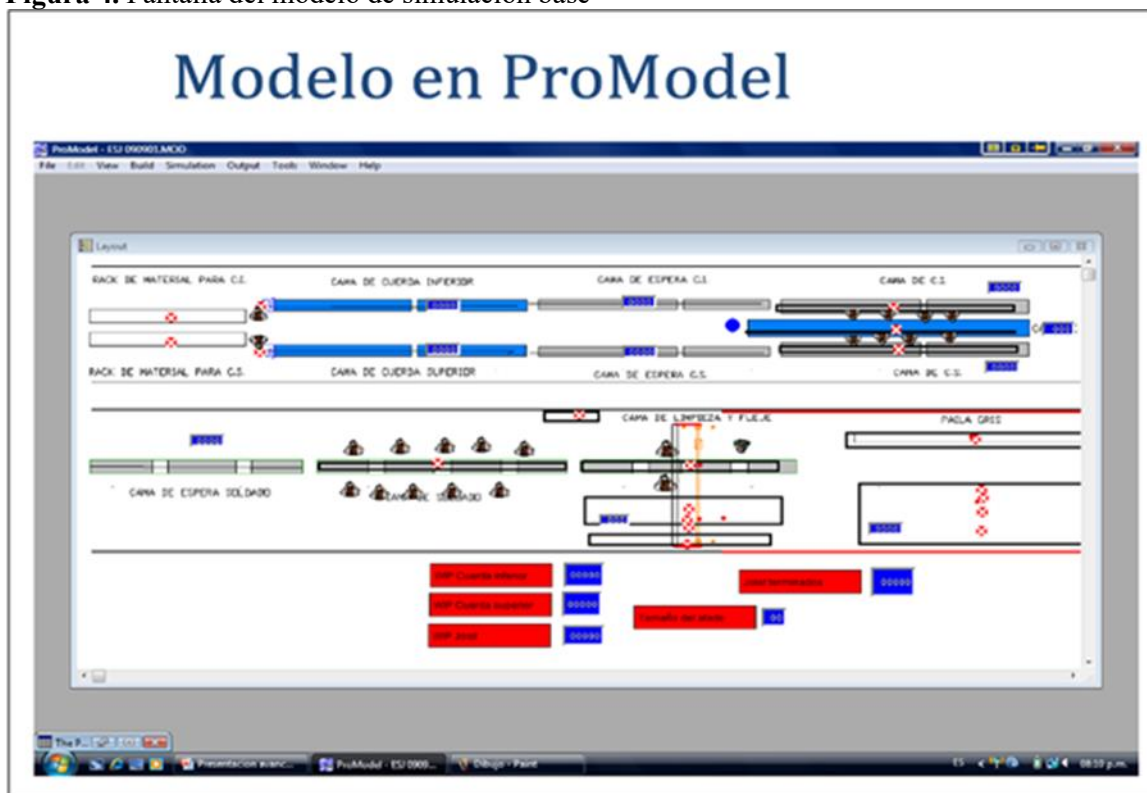
Se obtuvieron las rutas para los datos operacionales, se muestran en la figura 3.

Figura 3. Datos operacionales, rutas



Después de conocer y definir el sistema bajo estudio se construyó el modelo de simulación base, se generó un archivo en ProModel, la pantalla se muestra en la figura 4.

Figura 4. Pantalla del modelo de simulación base



Se obtuvo la distribución de probabilidad del tamaño de la orden de trabajo, se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Distribución de probabilidad del tamaño de la orden de trabajo

% de probabilidad de ocurrencia	Tamaño de la orden de trabajo, piezas
48.98	1
16.33	2
10.20	3
6.12	8
4.08	9
2.04	4, 10, 11, 12, 17, 38, 59
0.01	30

Los datos numéricos de cada operación se muestran en la tabla 7. Son datos de los tiempos ajustados con Stat::Fit.

Tabla 7. Datos numéricos obtenidos

Actividad	Tiempo en minutos
Habilitado de cuerdas inferiores	$0.532 + L(0.159, 0.14)$
Habilitado de cuerdas superiores	$0.773 + L(0.502, 0.384)$
Trazo	$6.57 + E(2)$
Armado	$1.08 + L(1.41, 0.547)$
Soldadura	$0.871 + L(3.02, 0.94)$
Retrabajo	$N(0.58, 0.23)$
Inspección	$4.49e - 002 + L(0.614, 0.195)$
Flejado	$N(0.98, 0.23)$
Pintura	$N(12.27, 2.6)$

Se obtuvo una muestra de 70 días trabajados en la Línea 4. Los datos son de los reportes de producción diaria y se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Producción diaria de la Línea 4**Producción diaria de *joist***

135, 122, 111, 90, 99, 89, 80, 90, 151, 86, 113, 131, 110, 88, 82, 136, 125, 81, 120, 79, 130, 99, 76, 147, 107, 101, 116, 123, 97, 114, 117, 81, 111, 104, 71, 86, 82, 110, 74, 120, 109, 100, 118, 108, 85, 77, 77, 130, 84, 91, 118, 120, 76, 132, 110, 89, 84, 129, 104, 84, 112, 91, 150, 101, 92, 92, 125, 94, 122, 117

Del análisis estadístico de los datos de producción diaria de la planta se obtuvo un promedio de producción diaria, $\bar{x} = 104.36$ *joist* terminados por turno, y una desviación estándar $s = 20.17$. Estos valores se calcularon con Stat::Fit. El interés era determinar el número de réplicas necesarias para establecer un intervalo de confianza particular con una cantidad específica de error aceptado ε entre el punto estimado de la media $\bar{x}$ y el valor de la media real desconocida μ . En este caso se consideró ε como porcentaje de $\bar{x}$ y se determinó que fuera un 5%, Ecuación (3):

$$\varepsilon = (0.05)(104.36) = 5.22 \quad (3)$$

El número de réplicas para simulaciones no terminales, está dado por la Ecuación (4):

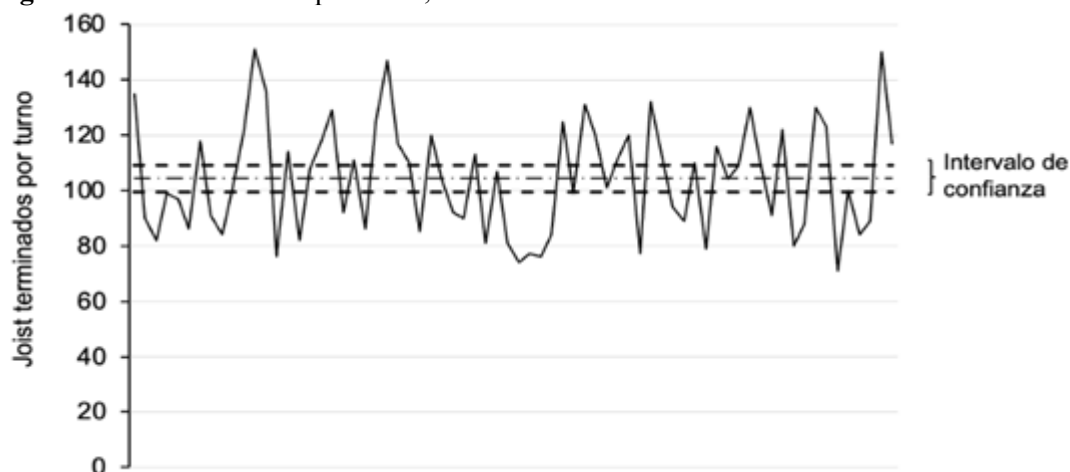
$$n = \left(\frac{(1.96)(20.17)}{5.22} \right)^2 = 57.43 \quad (4)$$

58 datos eran suficientes para el cálculo. Con los valores $\bar{x} = 104.36$ y $s = 20.17$ se procedió a calcular el intervalo de confianza de la producción real con la Ecuación (5):

$$IC = [104.36 - 4.81, 104.36 + 4.81] = [99.55, 109.17] \quad (5)$$

El promedio de *joist* terminados por turno en el sistema real está entre 99 y 109 *joist*. Este intervalo de confianza se calculó de la muestra tomada de la producción real. Se muestra en la figura 5.

Figura 5. Joist terminados por turno, muestra de 70 datos



Enseguida se simularon 60 turnos para analizar el comportamiento de la producción diaria simulada.

Se presenta en la figura 6.

Figura 6. Comportamiento de la producción diaria simulada



De la figura anterior, se observa que la simulación de sistema se estabiliza a partir del turno 24, además, se observa que los últimos 30 turnos corridos se mantienen ya estables, por lo que se decidió probar con 6 réplicas independientes de longitud 30 para ver su comportamiento, el cual se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Promedio de 6 réplicas

Réplica	Promedio de <i>joist</i> terminados por turno
1	106.3
2	107.1
3	106.7
4	106.4
5	106.4
6	106.3

Como se puede observar, los resultados finales de la variable *joist* por turno, se encuentran dentro del intervalo de confianza calculado. Enseguida se corrió el modelo para 70 días de producción simulados, resultando $\bar{x} = 106.96$ y $s = 12.25$. Se procedió a calcular el intervalo de confianza de la producción simulada, esta dado por la Ecuación (6):

$$IC = [106.96 - 2.78, 106.96 + 2.78] = [104.18, 109.74] \quad (6)$$

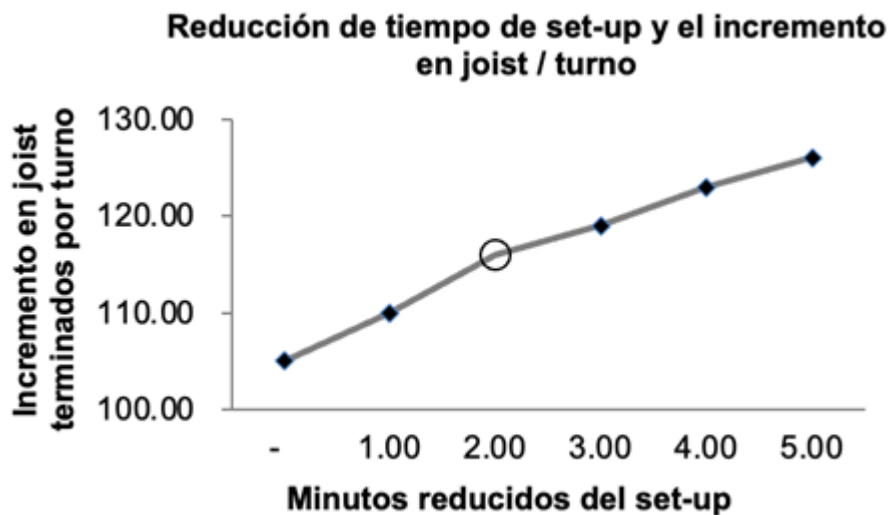
El promedio de *joist* terminados por turno en la simulación está entre 104y 109 *joist*. En la validación del modelo como resultado, primero se obtuvo el promedio diario de la producción real, enseguida, el promedio diario de la producción simulada; ambos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Comparación de sistema real con el modelo de simulación

	El promedio de <i>joist</i> terminados por turno está entre:
Sistema real	99 y 109
Simulación	104 y 109

Dado que hay un traslape entre los dos intervalos, es que no se encuentra evidencia para decir que el modelo de simulación no representa al sistema real. Se corrió el modelo, ya validado, para diferentes tiempos de *set-up* en trazo; se muestra en la figura 7.

Figura 7. Incremento de producción a reducir tiempo de *set-up* de trazo



Se hizo el cambio en el modelo para simular la producción diaria de *joist* reduciendo el tiempo de trazo en 2 minutos. Se corrió el modelo para 70 días de producción simulados, resultando $\bar{x} = 115.24$ y $s = 8.56$. Con estos valores se procedió a calcular el intervalo de confianza de la producción simulada en la Ecuación (7):

$$IC = [115.24 - 2.04, 115.24 + 2.04] = [113.20, 117.28] \quad (7)$$

El promedio de *joist* terminados por turno simulado está entre 113y 117 *joist*. Después de haber realizado las pruebas estadísticas que permitieron comparar el sistema real y el modelo con el tiempo de *set-up* de trazo reducido en 2 minutos se observó cómo aumentaría la razón de producción si se aplicara el SMED y se lograra la reducción propuesta.

Resultado

Al analizar los posibles escenarios se propuso aplicar SMED en el área de trazo reduciendo 30 % el tiempo ciclo del *set-up* en trazo. El análisis se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Resultado de simular 30% de reducción de *set-up* en trazo

	Promedio de producción de <i>joist</i> por turno de 8.5 horas está entre:
Sistema real	99 y 109
Simulando una reducción en el tiempo de <i>set-up</i>	113 y 117

La razón de producción diaria se incrementaría en 10 *joist* por turno, 10.43% de la razón de producción actual, si se llegará a reducir el tiempo de *set-up* de trazo en 2 minutos.

CONCLUSIÓN

Al hacer el primer recorrido por la Línea 4 se observó que a la grúa de pintura le toma 12.27 minutos su operación y parecía que era la actividad más consumidora de tiempo. Al estudiar el sistema, resultó que el 48.98% de las órdenes de trabajo son de una pieza, lo que ocasiona que constantemente se cambie el trazo del producto a un modelo de *joist* diferente, actividad que toma 6.57 minutos. Validado el modelo de simulación, se simuló la reducción en 2 minutos de *set-up* en trazo, lo que daría por resultado un aumento en la razón diaria de producción en un 10%. Esto podría comprobarse al aplicar SMED en el *set-up* de trazo, esta herramienta es especial para lotes pequeños y cambios frecuentes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A. (1999). Estadística para administración y economía. *International Thomson Editores*, p 205. ISBN 968-7529-41-5.
- Dongping, Q., & Yajing, W. (2020). A review of the application of discrete event simulation in manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*. doi:10.1088/1742-6596/1802/2/022066
- García, E., García, H., Cárdenas, L. E. (2006). Simulación y análisis de sistemas con ProModel. *Pearson Educación*, pp 10-13. ISBN 970-26-0773-6.
- Gyulai, D., Bergmann, J., Lengyel, A., Kadar, B., & Czirko, D. (2021). Simulation-based digital twin of a complex shop-floor logistics system. Proceedings of the Winter Simulation Conference (WSC'20) (pp. 1849-1860). *IEEE Press*. Doi:10.5555/3466184.3466392



- Harrell, C., Biman, K. G., Bowden, R. (2004). Simulation Using ProModel. *McGraw-Hill series in industrial engineering and management science*, p 5. ISBN 0072919809, 9780072919806.
- Laroque, C., Liessau, M. & Schneider, G. (2022). Experimental Analysis of a Stochastic Backward Simulation Approach Under the Specifics of Semiconductor Manufacturing. *Procedia CIRP*, 107, 1336-1342. doi:10.1016/j.procir.2022.05.154
- Meadows, D. H. (2008). Thinking in Systems, A Primer. *Chelsea Green Publishing Company*, p 11. ISBN 978-1-60358-055-7.
- Mirzaei, N., Nejad, M. G., & Fernandes, N. O. (2021). Combining Line Balancing Methods and Discrete Event Simulation: A Case Study from a Metalworking Company. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 12(1). doi:10.24867/IJIE-2021-1-273
- Morabito, L., Ippolito, M., Pastore, E., Alfieri, A., & Montagna, F. (2021). A Discrete Event Simulation Based Approach for Digital Twin Implementation. *International Federation of Automatic Control*, 54(1), 414-419. doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.164
- Niebel, B. W. (1980). Ingeniería Industrial estudio de tiempos y movimientos. *Representaciones y servicios de ingeniería, S. A.*, p 26, ISBN 968-6062-45-9.
- Shingo, S. (1985). A Revolution in Manufacturing: The SMED System. *Productivity Press*, p 22. ISBN 0-915299-03-8.

