



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
en Celaya



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**OPTIMIZACIÓN DEL TRABAJO EN PROCESO
MEDIANTE EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y
ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

**TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

**PRESENTA:
ING. RAFAEL BELLO MORALES**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ ALFREDO JIMÉNEZ GARCÍA**

**CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. SALVADOR HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**

CELAYA, GTO., MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2019



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.

Celaya Gto.,

18 SEPTIEMBRE 2019

M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL.
Presente.

De acuerdo a la convocatoria hecha por esta jefatura a fin de aprobar o no la impresión del trabajo profesional titulado:

“OPTIMIZACIÓN DEL TRABAJO EN PROCESO MEDIANTE EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN”

Presentado por el (a) pasante **C. ING. RAFAEL BELLO MORALES (M1703074)** alumno (a) del programa de Maestría en Ingeniería Industrial que ofrece nuestro Instituto.
Hacemos de su conocimiento que éste jurado ha tenido a bien aprobar la impresión de dicho trabajo para los efectos consiguientes.

DR. JOSE ALFREDO JIMENEZ GARCIA
Presidente

ATENCIÓN



M.C. VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ
Secretario

M.C. MOISES TAPIA ESQUIVIAS
Vocal

SECRETARIA DE
EDUCACION PUBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MEXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE CELAYA
COORDINACIÓN DE MAESTRÍA
DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA
Vocal Suplente

Ccp. Escolares
Archivo.
VFF*MTE*dmvp



ÍNDICE

CAPÍTULO 1 MARCO REFERENCIAL	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Hipótesis	4
1.5 Justificación	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Manufactura esbelta (Lean manufacturing)	5
2.1.1 Antecedentes de la metodología manufactura esbelta (lean manufacturing)	5
2.1.2 Conceptos básicos de Lean manufacturing	6
2.1.3 Los 7 desperdicios.....	9
2.1.4 Cambio de matriz en menos de 10 minutos	12
2.1.5 Sistema de tarjetas (Kanban).....	14
2.1.6 Mapeo de secuencia de valor (VSM)	16
2.1.7 Producción suavizada (Heijunka).....	17
2.2 Simulación.....	17
2.2.1 Antecedentes de la simulación	18
2.2.2 Conceptos básicos de simulación	18
2.2.3 Simulación de eventos discretos	20
2.2.4 Distribuciones de probabilidad.....	20
2.2.5 Etapas para realizar una simulación discreta.....	21
2.2.6 Software ProModel	23

2.3 Diseño de experimentos	26
2.3.1 Antecedentes del diseño de experimentos.....	26
2.3.2 Conceptos básicos del diseño de experimentos.....	27
2.3.3 Principios básicos	30
2.3.4 Etapas para desarrollar un diseño de experimento	31
2.3.5 Diseño factorial 2^k	34
2.3.6 Diseño factorial mixto.....	37
2.4 Estado del arte.....	40
CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO	49
3.1 Definición del sistema	49
3.2 Formulación del modelo.....	50
3.3 Colección de datos	50
3.4 Implementación del modelo en computadora	50
3.5 Validación del modelo	51
3.6 Experimentación.....	52
3.7 Interpretación de resultados	52
3.8 Documentación.....	52
CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO.....	53
4.1 Definición del sistema	53
4.2 Formulación del modelo.....	53
4.3 Colección de los datos.....	53
4.4 Implementación del modelo en computadora	54
4.5 Validación del modelo	55
4.6 Experimentación.....	56
4.7 Interpretación de resultados	57

4.8 Documentación.....64

Conclusiones65

Bibliografía.....66

Índice de figuras

Figura 2. 1. Integración vertical (Fuente: Heizer & Render, 2009).	8
Figura 2. 2. Proceso SMED (Fuente: elaboración propia).	12
Figura 2. 3. Distribución normal (Fuente: elaboración propia).	21
Figura 2. 4. Combinación del diseño factorial 2^2 (Fuente: elaboración propia).	35
Figura 2. 5. Combinación del diseño factorial 2^3 (Fuente: elaboración propia).	36
Figura 3. 1. Metodología (Fuente: elaboración propia).	49
Figura 4. 1. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de alas (Fuente: elaboración propia).	53
Figura 4. 2. Modelo de simulación en ProModel (Fuente: elaboración propia).	55
Figura 4. 3. Gráfica de probabilidad de costo de WIP (Fuente: elaboración propia).	60
Figura 4. 4. Gráfica de probabilidad de costo de producción total (Fuente: elaboración propia). .	61
Figura 4. 5. Niveles óptimos del modelo (Fuente: elaboración propia).	64

Índice de tablas

Tabla 2. 1. Notación de los tratamientos del diseño 2^2 (Fuente: elaboración propia).	35
Tabla 2. 2. Notación de los tratamientos del diseño 2^3 (Fuente: elaboración propia).	36
Tabla 2. 3. Uso de dos niveles para crear un factor de tres niveles (Fuente: elaboración propia). .	38
Tabla 2. 4. Un factor con dos niveles y un factor con tres niveles en un diseño 2^3 (Fuente: elaboración propia).	38
Tabla 2. 5. Estado del arte (Fuente: elaboración propia).	40
Tabla 4. 1. Colección de datos de los tiempos del proceso (Fuente: elaboración propia).	54
Tabla 4. 2. Llegadas al proceso del sistema simulado (Fuente: elaboración propia).	56
Tabla 4. 3. Notación de los tratamientos (Fuente: elaboración propia).	57
Tabla 4. 4. Tiempos del inventario en proceso en el sistema (Fuente: elaboración propia).	58
Tabla 4. 5. Costos aplicados al proceso (Fuente: elaboración propia).	58
Tabla 4. 6. Costo WIP, mano de obra y producción por escenario (Fuente: elaboración propia). .	59
Tabla 4. 7. Diseño factorial completo del experimento (Fuente: elaboración propia).	61
Tabla 4. 8. Análisis de varianza del costo de WIP (Fuente: elaboración propia).	62
Tabla 4. 9. Análisis de varianza del costo de producción total (Fuente: elaboración propia).	63

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas y colegas me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, quisiera agradecer a mi asesor de tesis José Alfredo Jiménez García, a mi codirector de tesis Salvador Hernández González y profesores del posgrado de ingeniería industrial Vicente Figueroa Fernández, Moisés Tapia Esquivas, Manuel Darío Hernández Ripalda y demás profesores que me han ayudado y apoyado todos los momentos que necesité sus consejos.

A las instituciones

Al Tecnológico Nacional de México en Celaya por haberme brindado tantas oportunidades y enriquecerme en conocimiento durante estos años. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme una beca de manutención para mis estudios de posgrado. A la Universidad de Extremadura y a los profesores M. Isabel Sánchez Hernández y Tomas M. Bañegil Palacios por su apoyo para desarrollar la estancia de investigación dentro de sus instalaciones.

A mis compañeros

A todos mis compañeros del posgrado y amigos que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad. Por haberme apoyado en las buenas y malas además de seguir siempre apoyando en cada momento de mi carrera profesional.

DEDICATORIAS

A Dios

Quiero expresar mi gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre mi vida y a toda mi familia por estar siempre presentes. Por darme la oportunidad de estar presente en este mundo y permitirme cumplir una de mis metas profesionales más importantes de mi plan de vida, ser maestro.

A mis padres

A mi madre Ma. Araceli Morales Cuevas y a mi padre José Antonio Bello Hernández por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

A mi familia y amigos

A mis hermanos Mayret Bello Morales y Antonio de Jesús Bello Morales, y amigos que gracias a su apoyo moral me permitieron permanecer con empeño, dedicación y cariño, y a todos quienes contribuyeron con un granito de arena para culminar con éxito la meta propuesta.

—Por favor, ¿le importaría decirme qué camino debo tomar desde aquí? —dijo Alicia.

—Eso depende de adónde quiere usted llegar —dijo el gato.

—No me importa mucho dónde —dijo Alicia.

—Entonces no importa mucho el camino que usted coja —dijo el gato.

(Lewis Carrol)

Resumen

La presente investigación tiene como objeto de estudio la optimización del trabajo en proceso a través del diseño de experimentos y escenarios de simulación. En la literatura es posible encontrar publicaciones relacionadas con disminuir el trabajo en proceso mediante herramientas de control de inventarios y metodologías aplicadas en áreas de la administración de la producción: pronósticos, teoría de inventarios, herramientas de la manufactura esbelta (lean manufacturing), justo a tiempo, simulación discreta, entre otras.

Sin embargo, el enfoque abordado en la presente investigación está conformado por tres principales herramientas; filosofía lean manufacturing, simulación de eventos discretos y diseño de experimentos. Como parte de la filosofía lean manufacturing, se toman en cuenta específicamente las herramientas aplicadas al mejoramiento del flujo de materiales dentro de las líneas de producción, SMED, Kanban, VSM, Heijunka. La simulación es utilizada realizar experimentos y evita someter el sistema real a la búsqueda de distribución de planta y asegurar un flujo continuo de materiales a lo largo del proceso de producción con los que se evitan ineficiencias del sistema como pueden ser desabastos. El diseño de experimentos se dirige a identificar los factores significativos en el sistema que afectan el trabajo en proceso con lo que se hace más simple obtener información acerca de que variables tienen mayor impacto sobre la respuesta.

Se logró establecer un sistema esbelto capaz de integrar la filosofía lean manufacturing, el diseño de experimentos y simulación, todo esto confirma que el modelo es idóneo y que no es necesario que un sistema productivo tenga grandes cantidades de trabajo en proceso para funcionar de manera correcta, como lo dice la literatura, el exceso de trabajo en proceso nos genera gastos en materiales y su almacenamiento, con esto se puede decir que el nuevo sistema logra disminuir los gastos de almacenamiento y trabajo en proceso.

Abstract

The present investigation has as object of study the optimization of work in process through the design of experiments and simulation scenarios. In the literature it is possible to find publications related to reducing work in process through inventory control tools and applied methodologies in areas of production management: forecasts, inventory theory, lean manufacturing tools, just time, discrete simulation, among others.

However, the approach addressed in the present investigation consists of three main tools; lean manufacturing philosophy, simulation of discrete events and design of experiments. As part of the lean manufacturing philosophy, the tools applied to improve the flow of materials within the production lines, SMED, Kanban, VSM, Heijunka, are specifically taken into account. The simulation is used to carry out experiments and avoids subjecting the real system to the search for plant distribution and ensuring a continuous flow of materials throughout the production process with which system inefficiencies such as shortages can be avoided. The design of experiments is aimed at identifying the significant factors in the system that affect work in process, which makes it easier to obtain information about which variables have the greatest impact on the response.

It was possible to establish a slender system capable of integrating the lean manufacturing philosophy, the design of experiments and simulation, all this confirms that the model is ideal and that it is not necessary for a productive system to have large amounts of work in process to function correctly, as the literature says, the excess of work in process generates us expenses in materials and their storage, with this it is possible to be said that the new system manages to diminish the expenses of storage and work in process.

CAPÍTULO 1 MARCO REFERENCIAL

1.1 Introducción

El entorno de las industrias es cada vez más competitivo y exigente, por lo que las empresas deben estar a la vanguardia en cuanto a la automatización y optimización de procesos, disminución de desperdicios, reducción de costos, para poder asegurar la supervivencia en un mercado competitivo.

En el entorno empresarial competitivo, los gerentes de las industrias manufactureras enfrentan el desafío diario de producir productos de calidad y proporcionar mejores servicios a los clientes (Chakraborty, Giri, & Chaudhuri, 2007). Dicho esto, se interpreta que las empresas buscan tomar decisiones que impacten de manera directa para generar mejor calidad, precios competitivos y procesos más eficientes. Cuando se define el objetivo principal se puede empezar a tomar decisiones de acuerdo con las necesidades y las herramientas con las que se cuentan. Dichas decisiones se pueden realizar empleando técnicas de investigación de operaciones en función del nivel de complejidad de los problemas, del costo que acarrea dicha decisión y de la información conocida al momento de tomar la decisión (Sanchez, Ceballos, & Torres, 2015). Este tipo de métodos de investigación de operaciones son utilizados cuando se cuentan con problemas muy complejos además de ser costosos al utilizar mano de obra especializada. Existen ciertas técnicas que ayudan a reducir costos, las cuáles tiene un bajo de nivel de complejidad como es la filosofía lean manufacturing y sus herramientas Justo a tiempo, 5s, SMED, Kanban, entre otras. El sistema de planeación de la producción Justo A Tiempo (JIT), utilizado en compañías productoras de automóviles como la Toyota no usaba complicados algoritmos de optimización ni sistemas sofisticados de computación, sino reglas muy claras para el manejo de los inventarios (Blanco, Romero, & Páez, 2006). Es conocido que las empresas japonesas como Toyota deben su éxito al control de inventarios, normas, procedimientos, disciplina de trabajo y otras más. Técnicas como el acortamiento de los ciclos de proceso, la disminución de los rechazos, los tiempos cortos de aprestamiento en las máquinas, la eliminación del desperdicio y el mejoramiento continuo son conocidas y aplicadas actualmente en muchas partes (Blanco et al., 2006). Todo lo anterior llega a reducirse con un trabajo en proceso óptimo debido a que el exceso de los inventarios en los puestos de trabajo afecta a todos los procesos productivos desde aumentar los tiempos de procesos, aumentar desperdicios que afectan directamente a los costos de los productos terminados.

Lean Manufacturing es una filosofía empresarial moderna que se concentra en reducir el desperdicio en los procesos operativos con el fin de que estos sean lo más eficientes posible (Dinas, Franco, & Rivera, 2009). Los principios Lean definen el valor del producto / servicio tal como lo percibe el cliente y luego hacen que fluya en línea con el cliente y busca la perfección mediante la mejora continua para eliminar el desperdicio clasificando la actividad de valor agregado y las actividades que no agregan valor (Sundar, Balaji, & SatheeshKumar, 2014). Mediante este principio de separar las actividades busca enfocarse en las que no agregan valor al producto como es el trabajo en proceso para asegurar un flujo de materiales continuo y reduciendo los inventarios para a reducir los costos de producción del producto terminado, lo que significaría una posible reducción del costo de venta o mayores utilidades para la empresa. Por lo tanto, para llegar a este punto es necesaria la experimentación y la compresión de la línea de producción, para esto existe una gran cantidad de herramientas que ayudan a simular.

La simulación dentro de la industria puede llegar a generar algunas ventajas competitivas, que ayudan a entender procesos. Una de las técnicas para realizar estudios piloto, con resultados rápidos y a un relativo bajo costo, se basa en la modelación — la cual se conoce como simulación (García, García, & Cárdenas, 2013). Otra de las herramientas como el diseño de experimentos puede llegar a servir dentro de la experimentación para equilibrar las cargas de trabajos y marcar los ritmos de producción. El diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) es una técnica que consiste en realizar una serie de experimentos en los que se inducen cambios deliberados en las variables de un proceso, de manera que es posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida (Ilzarbe, Tanco, Viles, & Álvarez, 2007). Con esta técnica se puede conseguir, por ejemplo, mejorar el rendimiento de un proceso y reducir su variabilidad o los costos de producción (Ilzarbe et al., 2007).

Tomando en cuenta los métodos anteriormente mencionados y las ventajas que estos aportan individualmente, al utilizarlos de manera conjunta puede lograr un entorno competitivo realizando procesos eficientes, reduciendo desperdicios, creando una mejora continua, mejorando el rendimiento, reduciendo la variabilidad y costos de producción.

1.2 Planteamiento del problema

Según Heizer & Render (2009), a fin de cumplir con las funciones del inventario, las empresas mantienen cuatro tipos de inventario: materias primas; trabajo en proceso; para mantenimiento (reparación y operaciones); de productos terminados.

Considerando que los inventarios no agregan valor al producto, y el exceso de estos genera desperdicios e incrementa los costos de producción. En esta investigación, se propone reducir uno de los inventarios que más desperdicios genera, como es el inventario de trabajo en proceso (WIP, por sus siglas en inglés).

Por lo tanto, en esta investigación se propone construir modelos de simulación representativos de sistemas de producción y generar escenarios mediante una metodología de diseño de experimentos, con la finalidad de encontrar el funcionamiento óptimo que permita reducir al mínimo los inventarios de trabajo en proceso, sin perjudicar la salida de producto terminado e incrementar la productividad del sistema productivo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Optimizar los niveles de trabajo en proceso en empresas manufactureras con distintas configuraciones de planta, mediante un enfoque de simulación y diseño de experimentos para lograr la mayor productividad.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer una metodología que permita reducir al mínimo el trabajo en proceso y por consecuencia mejorar la productividad en las empresas manufactureras.
- Proponer una configuración de planta que permita reducir el trabajo en proceso, aplicando escenarios de simulación y diseño de experimentos.

1.4 Hipótesis

Si se construye el modelo de simulación mediante una metodología basada en diseño de experimentos y escenarios de simulación, entonces, se podrá definir un sistema de producción que minimice el trabajo en proceso y elimine otros desperdicios.

1.5 Justificación

El propósito de la investigación consiste en reducir el trabajo en procesos de las empresas manufactureras, tomando el conocimiento de metodologías aplicadas para evitar aspectos que generan imprevistos y costos dentro de la línea de producción. Se busca no perjudicar la continuidad y fluidez del proceso, por lo que se propone desarrollar experimentos sobre un modelo de simulación basado en una metodología de diseño de experimentos aplicados a modelos representativos de diferentes configuraciones de planta. La reducción del trabajo en proceso servirá para reducir los tiempos de entrega, la sobre producción, tiempos de transporte, inventarios, entre otros desperdicios cuya característica es que no generan ganancias, solo incrementan el precio del producto final.

El desarrollo del proyecto se basa en la metodología de diseños de experimentos, simulación de eventos discretos y la filosofía lean manufacturing. Mediante el uso integrado de estas herramientas, se podrá identificar las debilidades y fortalezas de los sistemas productivos, así como los factores que afectan su desempeño. Se beneficiará a las empresas que buscan la mejora continua y las que cuentan con problemas de trabajo en proceso para reducir costos derivados del trabajo en proceso y funcionamiento óptimo de sus líneas de producción.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan conceptos, así como la base teórica que sustenta la tesis. Se presentan conceptos básicos especialmente de manufactura esbelta, simulación de eventos discretos y diseño de experimentos. También algunas metodologías en la literatura que ayudan a desarrollar la investigación.

2.1 Manufactura esbelta (Lean manufacturing)

Lean manufacturing es una filosofía que se encarga de disminuir desperdicios de procesos operativos, en otras palabras, se puede decir que se encarga de hacer procesos más productivos, hacer más con menos recursos. Cabe mencionar que esta metodología fue desarrollada por Toyota en los años noventa para ganar competitividad contra las empresas productoras de Estados Unidos (Cristina, Carvalho, & Granja, 2017). Los factores más importantes dentro de la industria manufacturera es la entrega de productos a tiempo para los clientes y una forma de acotar tiempos de entrega son la reducción del tiempo de entrega (Jiang & Rim, 2017), una forma eficaz de reducir los tiempos de entrega a los clientes ha sido el uso de la filosofía lean como forma de eliminar desperdicios mientras se incrementa la producción (Wang, Huang, Le, & Ta, 2016).

2.1.1 Antecedentes de la metodología manufactura esbelta (lean manufacturing)

De acuerdo con Villaseñor y Galindo (2007), la cronología del nacimiento de la manufactura esbelta inicia con Sakichi Toyoda, visionario e inventor, parecido a Henry Ford. En 1894, Toyoda inició la fabricación de telares manuales, los cuáles eran baratos, pero requerían de mucho trabajo. Su deseo era crear una máquina que pudiera tejer la tela, esto lo llevó a hacer muchos experimentos con los que, intentando una y otra vez, logró conseguir lo que quería. Realizando este trabajo, de prueba y error, generó la base del Toyoda Way, el genchi genbutsu (Ir/Observar/Entender). Más tarde, fundó la compañía Toyoda Automatic Loom Works, empresa que aun forma parte del corporativo Toyota hoy en día (2004).

Uno de sus inventos fue un mecanismo especial que detenía de manera automática el telar cuando un hilo se trozaba, invento que se convertiría en uno de los pilares del sistema de producción Toyota, llamado jidoka (automatización con toque humano).

Después de vender la patente de la máquina a una compañía inglesa, en 1930 Sakichi y su hijo iniciaron la construcción de Toyota Motor Company. Sakirichi, más que hacer dinero con la compañía, deseaba que su hijo, kiichiro dejara huella en la industria mundial, tal como él lo había hecho con sus máquinas de hilar. Kiichiro después de estudiar en una de las prestigiosas universidades de Tokio la carrera de ingeniería mecánica , siguió los pasos de su padre.

Kiichiro construyo Toyota con la filosofía de su padre, pero agregó sus propias innovaciones. Una de las innovaciones fue la herramienta justo a tiempo, que fue la principal contribución de Kiichiro. Sus ideas fueron agregadas gracias a las visitas a la planta de Ford en Michigan, así como el sistema de supermercados americanos para surtir los productos en los estantes justo a tiempo, conforme los utilizaban los operadores en la línea de producción. Como se sabe, estas fueron las bases del Kanban.

2.1.2 Conceptos básicos de Lean manufacturing

A continuación, se presentan algunos conceptos relacionados con la presente investigación de lean manufacturing que ayudan a comprender mejor la filosofía y sus herramientas aplicadas a la mejora de los procesos de producción. El desarrollo de la presente tesis se enfocara en aquellos conceptos de lean Manufacturing que ayuden a evaluar y conocer todo lo relacionado con el inventario en proceso o trabajo en proceso.

Trabajo en proceso (WIP)

WIP es resultado de los trabajos que tienen que hacer cola para cada operación, están en espera de la disponibilidad de la estación de trabajo. Debido a la complejidad para que coincida con los requisitos de capacidad con las capacidades disponibles, las colas de los puestos de trabajo tienden a acumularse en el suelo (Paredes & Penagos, 2012).

El trabajo en proceso se refiere a todo material, materia prima o producto desde que entra al primer proceso de producción hasta que salé del ultimo como producto terminado.

De acuerdo con (Olaitan & Quan, 2017) permite lograr dos grandes objetivos como son: reducir la variación del tiempo de procesamiento promedio y su variación a través de un enfoque de control de producción que regula el inventario.

De acuerdo con (Kang, Ullah, & Sarkar, 2017) el trabajo en proceso para entornos de tecnología de grupo son altamente recomendados cuando la fabricación de unidades de producción lleva un tiempo relativamente más largo. Este tipo de condiciones se pueden observar particularmente en el campo de la fabricación de herramientas, industrias automotrices.

Tiempo de ciclo (Lead time)

Es la cantidad de tiempo de un producto desde que se realiza la compra hasta que se realiza la venta. Es decir, es la suma de tiempos necesarios para almacenar la materia prima, procesar, almacenar producto terminado y la venta, el lead time define que tanta rotación de producto hay en el proceso y con qué rapidez se obtienen ingresos de ventas por la elaboración.

El Lead Time es una expresión genérica que permite analizar la rapidez del flujo de materiales, y se puede definir como el tiempo promedio desde que se inicia un “proceso operativo” – aprovisionamiento, almacenaje, fabricación, distribución hasta su finalización (Paredes & Penagos, 2012).

Valor agregado

Según Bu (2002), presenta su punto de vista de lo que significa el valor agregado.

¿Qué es lo que el cliente espera de este proceso? (tanto el cliente del siguiente proceso dentro de la línea de producción, como para el cliente externo). Esto se define como valor, a través de los ojos del cliente, puede observarse un proceso y separar los pasos que agregan valor de los que no. Se puede aplicar a cualquier proceso (manufactura, información o servicio).

Cadena de suministro

Es la integración de las actividades que procuran materiales y servicios, para transformarlos en bienes intermedios y productos terminados, y los entregan al cliente. Estas actividades incluyen, además de compras y subcontratación, muchas otras funciones que son importantes para mantener la relación con proveedores y distribuidores (Heizer & Render, 2009).

La administración de la cadena de suministro comprende la determinación de (1) proveedores de transporte; (2) transferencias de crédito y efectivo; (3) proveedores; (4) distribuidores; (5) cuentas por pagar y por cobrar; (6) almacenamiento e inventarios; (7) cumplimiento de pedidos, y (8) compartir información del cliente, los pronósticos y la producción. El objetivo es construir una cadena de suministro que se enfoque en maximizar el valor para el cliente final (Heizer & Render, 2009).

Estrategias de la cadena de suministro

Según Heizer y Render (2009), la integración vertical forma parte de una estrategia dentro de las operaciones. Esto indica que las empresas no crean sus productos en base a las materias primas, sino que se encargan de comprar los componentes a otras pequeñas empresas, como es el caso de las empresas automotrices. Lo que busca esta estrategia es la reducción de costos, adquirir calidad y obtener entregas a tiempo.

Parte importante de esta integración es evitar grandes inventarios y almacenes de materias primas. Otra de las ventajas en casos cuando se pretenden hacer cambios tecnológicos, solo se enfocan en mejorar procesos y no en la transformación de los productos requeridos dejando esto a los proveedores. Se evita los gastos de cambio de transformación de procesos de materias primas.

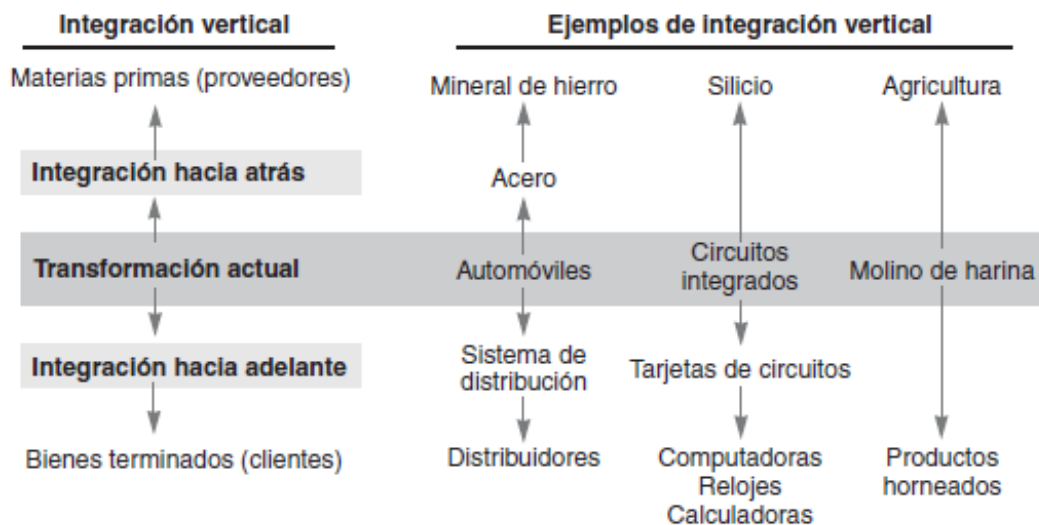


Figura 2. 1. Integración vertical (Fuente: Heizer & Render, 2009).

Desarrollo del proveedor

La selección del proveedor es el desarrollo del proveedor. Suponiendo que la empresa desea continuar con un proveedor dado, ¿cómo lo integra a su sistema? El comprador debe asegurarse de que el proveedor aprecie los requerimientos de calidad, las especificaciones del producto, la programación y entrega, el sistema de pagos del comprador, y las políticas de adquisición. El desarrollo del proveedor puede incluir todo, desde capacitación y ayuda en ingeniería y producción hasta procedimientos para la transferencia de información (Heizer & Render, 2009).

Producción esbelta

La producción esbelta se refiere a producir más utilizando la menor cantidad de recursos, ya sean recurso humano, materia prima, o algún insumo, con el objetivo de disminuir espacios y tiempos. Por lo cual se puede definir como la obtención de un flujo continuo del producto inicial hasta un producto final con la menor cantidad de recursos invertidos, siempre y cuando se obtenga el producto con las especificaciones que el cliente necesita.

2.1.3 Los 7 desperdicios

De acuerdo con Toyota menciona que dentro de los procesos de producción existen 7 diferentes tipos de desperdicios, a los que se debe que el costo del producto final se eleve. A continuación, se mencionan los 7 desperdicios con una breve explicación de cada uno.

Sobreproducción

Producir más de lo que ordena el cliente o producir por adelantado (antes de que el producto sea demandado) es desperdicio. Por lo general, el inventario de cualquier tipo es un desperdicio (Heizer & Render, 2009).

La sobreproducción es utilizada para amortiguar las demandas futuras que tendrán, por lo que es utilizado por las empresas para evitar la falta de productos del cliente, pero esta sobreproducción es una inversión en materiales, mano de obra, almacenamiento, movimientos innecesarios, entre otros. De acuerdo con la metodología lean manufacturing todos estos costos innecesarios hacia el producto deben de ser reducidos o eliminados, dado a que no generan un valor agregado del producto.

Tiempo de espera

Según Quesada, Buehlmann & Arias (2012), el tiempo de espera es aquel cuando la máquina u operarios se encuentran detenidos y a la espera del suministro de materias primas, herramientas para elaborar el trabajo o personal encargado del mantenimiento en el caso de que la máquina espere.

Transporte

Según Bowersox, Closs & Cooper (2007), el transporte es el tiempo requerido para llevar a cabo un movimiento en específico y posicionar el inventario dentro de la empresa o hacia algún almacén. El transporte se puede llevar a cabo por diferentes medios de transporte con el objetivo de resguardar los productos o llevarlos hasta sus clientes.

Los requerimientos de transporte se satisfacen de tres maneras básicas. Primero, puede operarse una flotilla privada. Segundo, pueden prepararse contratos con especialistas dedicados al transporte. Tercero, una empresa puede contratar los servicios de una amplia variedad de transportistas que proporcionen los diferentes servicios de transporte requeridos en función del envío (Bowersox et al., 2007).

Sobre procesamiento

El sobre procesamiento puede ser el procesar incorrectamente, es decir trabajar bajo especificaciones incorrectas que generen un mayor número de procesos innecesarios y que en este caso aumentan el valor del producto, estos trabajos innecesarios solo llegan a disminuir las ganancias o aumentar el precio del producto puesto que el cliente no estaría de acuerdo en pagar por otras especificaciones que no necesitan.

Estas actividades pueden no ser requeridas para el desarrollo del producto, ser ineficientes o mejorables, por lo que con un análisis de operaciones y una mejora del proceso pueden ser modificadas de tal manera que logren hacerlo más eficiente (Corredor, 2015).

Inventario

Son las existencias de una pieza o recurso utilizado en una organización. Un sistema de inventario es el conjunto de políticas y controles que vigilan los niveles del inventario y determinan aquellos

a mantener, el momento en que es necesario reabastecerlo y qué tan grandes deben ser los pedidos (Chase & Jacobs, 2014).

Movimientos innecesarios

Según Quesada et al. (2012), son todos aquellos movimientos que realiza el empleado para buscar herramientas, materiales, componentes, que se realizan muy repetitivamente y no contribuyen en gran medida para la realización de una tarea, como recorrer grandes distancias para sacar una copia o buscar una herramienta dentro de un área desorganizada.

Son todas las actividades que realizan los trabajadores de manera innecesaria en su puesto de trabajo o desplazamiento en la planta, como tomar partes, mover partes, buscar herramientas, doblar o acomodar, caminar, levantar o realizar desplazamientos en exceso, las cuáles son innecesarias o incómodas pero que según el proceso de trabajo actual es la única forma de desarrollar el trabajo y perjudican el proceso puesto que extienden el tiempo necesario para el desarrollo de la actividad, por lo que se consideran como un desperdicio (Corredor, 2015).

Defectos

De acuerdo con Corredor (2015), son un conjunto de piezas, las tuvieron ciertos errores de procesamiento y que no cumplen con las expectativas del cliente, por lo que es necesario agregar otra serie de pasos para procesarlas nuevamente o para deshacerse de ellas. Cuando hablamos de defectos es necesario saber que estas piezas pueden generar un mayor costo para producir un producto final que cumpla con las especificaciones por lo cual muchas empresas optan por deshacerse de estos desechos.

Manufacturar productos que no cumplen las especificaciones de los clientes es un desperdicio que no solamente aumenta la insatisfacción de estos, sino también los costos de producción (Quesada et al., 2012). Como se menciona en el primer párrafo, y de acuerdo con Arias se puede decir que los defectos son de los errores más costosos dentro de la línea de producción.

2.1.4 Cambio de matriz en menos de 10 minutos

Cambio de matriz en menos de 10 minutos SMED (por sus siglas en ingles Single Minute Exchange of Die), La metodología SMED es una herramienta Lean que ayuda a las organizaciones a reducir los tiempos de preparación y la eliminación de desechos identificados en las operaciones de cambio. La implementación de SMED requiere un análisis previo para comprender claramente el proceso de cambio, a fin de conocer en detalle cada operación de configuración (Costa, Sousa, Bragança, & Alves, 2013).

Las operaciones de cambio se dividen en dos tipos: operaciones internas (que solo se pueden realizar mientras la máquina está detenida) y operaciones externas (que se pueden realizar mientras la máquina está funcionando). La aplicación de esta metodología consiste en cuatro etapas distintas (Costa et al., 2013).

Las operaciones externas son aquellas tareas que se realizan cuando la máquina está en funcionamiento, si habláramos del cambio de broca de un taladro, la operación interna sería el ir por la nueva broca mientras el taladro se encuentra funcionando. Las operaciones internas se pueden definir como aquellas tareas que se realizan cuando la máquina se encuentra parada, por ejemplo, se podría decir que el cambio de una broca de taladro no se puede realizar a menos de que este se encuentre parado, por lo que es una operación interna.

Etapas SMED

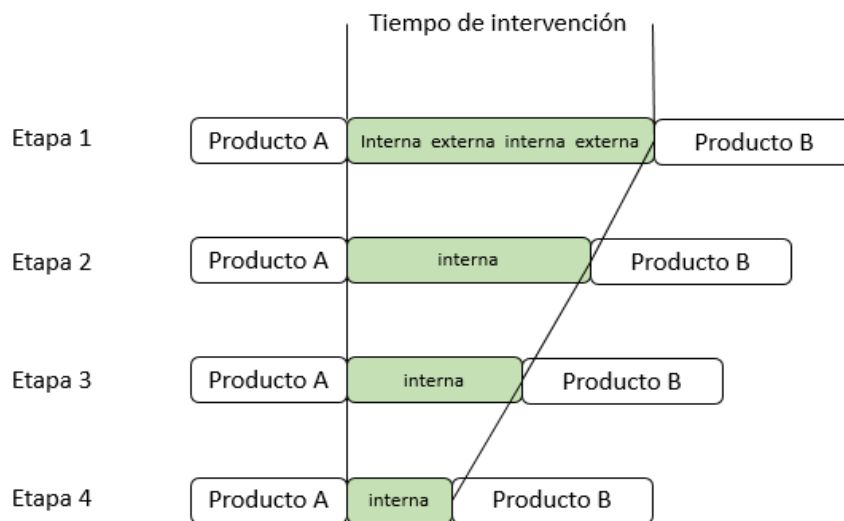


Figura 2. 2. Proceso SMED (Fuente: elaboración propia).

Etapa 1 observar y medir

La primera etapa se encarga de hacer un análisis profundo sobre las operaciones en las que se mejorará y realizarán los cambios. Por lo cual es necesario desglosar todas las actividades que se realizan en el proceso, como es la forma en la que se llevan a cabo movimientos para realizar una actividad.

Para un mejor análisis es importante conocer herramientas como: el manual de la máquina que ayuda a entender las actividades que conlleva el cambio de una herramienta y una cámara de video que sirve para desglosar de mejor manera cada una de las actividades y si es necesario la repetición de las actividades para determinar los tiempos.

El objetivo de esta etapa es medir el desempeño actual del proceso que se busca mejorar. Se utilizan los CTQs (por sus siglas en inglés: Critical to Quality, Crítico para la Calidad) para determinar los indicadores y tipos de defectos que se utilizarán durante el proyecto. Posteriormente, se diseña el plan de recolección de datos y se identifican las fuentes de estos, se lleva a cabo la recolección de las distintas fuentes. Por último, se comparan los resultados actuales con los requerimientos del cliente para determinar la magnitud de la mejora requerida (Valenzuela & Palacios, 2014).

Etapa 2 analizar

En esta etapa se lleva a cabo el análisis de la información recolectada para determinar las causas raíz de los defectos y oportunidades de mejora. Posteriormente se tamizan las oportunidades de mejora, de acuerdo con su importancia para el cliente y se identifican y validan sus causas de variación (Valenzuela & Palacios, 2014).

El objetivo de esta etapa es el conocimiento y separación de las operaciones internas y externas, aquellas que se realizan con la máquina encendida y apagada.

Etapa 3 convertir operaciones internas a externas

Con el conocimiento de cada una de las operaciones internas y externas, se busca cambiar las operaciones internas en externas, es decir las operaciones con la máquina apagada mientras se encuentre en proceso. Para realizar este objetivo es necesario preguntarse sobre cuál de las operaciones internas pueden llegar a cambiar a operaciones externas o realizarse con la máquina encendida.

Algo importante en esta etapa es crear un diagrama de Pareto con las operaciones internas para conocer que afecta de mayor manera al proceso agregando tiempo, buscando disminuir las que tengan mayor tiempo. Una opción para mejorar es organizar el puesto de trabajo evitando largos recorridos innecesarios para tomar una herramienta, los cuáles pueden realizar mientras la máquina se encuentra en operación o encendida.

Etapa 4 optimización

Para cuando se llega a esta etapa se han cambiado las operaciones internas a operaciones externas. Entonces es cuando se buscan opciones para reducir el tiempo de manera que, si una operación dura 10 minutos y es realizada por dos operarios, sean repartidos los tiempos de manera equitativa, reduciendo el tiempo a la mitad o en el caso de que una operación requiera mucho tiempo, se puede optar por la automatización pensando en el costo beneficio.

2.1.5 Sistema de tarjetas (Kanban)

El sistema Kanban es una herramienta de control en la cadena logística desde un punto de vista de manufactura, estableciendo límites superiores para los inventarios en proceso (Teresa, Jiménez, Medina, & Melchor, 2015).

Kanban es un método para lograr entregas y recepciones justo a tiempo, regida por reglas, que sirve para organizar el flujo de la producción con procesos que jalan solo lo requerido, empleando etiquetas, que son utilizadas de señalización visual como ordenes de trabajo (acción), dadas siempre por la estación sucesora dentro del flujo de materiales (Teresa et al., 2015).

El sistema Kanban es uno de los medios de producción y control de inventario más simples, efectivos y económicos. El sistema Kanban ha demostrado ser útil para reducir el inventario, eliminar el desabastecimiento, reemplazar el uso excesivo de una computadora, recortar gastos generales y cómo un factor de empoderamiento que mejora el servicio y la calidad (Mukhopadhyay & Shanker, 2005).

Funciones

Las razones para implementar el sistema Kanban (Sugimori, Kusunoki, Cho, & Uchikawa, 2007):

- a. Reducción de los costos de procesamiento de información.

- b. Adquisición rápida y precisa de datos.
- c. Limitar la capacidad excedente del departamento anterior.

Con este sistema se logran objetivos como de mantener la menor cantidad de material en proceso, lo que consigue una reducción de inventario. Disminuye el tiempo de respuesta al cliente ya que siempre se tendrá a disposición en la estación anterior el material requerido (Teresa et al., 2015).

Los principios de Kanban incluyen: visualizar el flujo de trabajo, limitar el WIP, hacer políticas explicativas, reconocer oportunidades de mejora de procesos (Adeyemi, 2015).

La aplicación de la metodología Kanban sirve para:

- a. Eliminar la producción excesiva.
- b. Prioridades a la hora de producir, lo más importante es primero.
- c. Control de los materiales
- d. Control de la producción

Implementación

Kanban no es solo el diseño y el cálculo de los números ni una bala mágica, sino que es un cambio organizativo hacia la descentralización de varias responsabilidades al nivel de los trabajadores. Se trata de una estructura de trabajo / dotación de máquinas múltiples, operaciones estándar, círculos de control de calidad, mantenimiento, autonomía (decisión de un trabajador para detener la línea), sistema de sugerencias, mejora de diseño y mejora continua (Kaizen) (Mukhopadhyay & Shanker, 2005).

Estas actividades requieren flexibilidad y trabajo en equipo que no pueden reconocerse mediante el pago directo, y los sistemas salariales existentes deben modificarse para implementar y sostener diversas actividades como 5s, SMED, etc. (Mukhopadhyay & Shanker, 2005).

Según Mukhopadhyay & Shanker (2005), hay 4 fases principales para la implantación del sistema Kanban:

Fase 1. Entrenar a todo el personal en los principios de Kanban, y los beneficios de usar Kanban.

Fase 2. Implementar Kanban en aquellos componentes con más problemas para facilitar su manufactura y para resaltar los problemas escondidos. El entrenamiento continuo con el personal en la línea de producción.

Fase 3. Implementar Kanban en el resto de los componentes, esto no debe ser problema ya que, para esto, los operadores ya han visto las ventajas de Kanban.

Fase 4. Esta fase consiste en la revisión del sistema Kanban, los puntos de reorden y los niveles de reorden.

2.1.6 Mapeo de secuencia de valor (VSM)

Mapeo de secuencia de valor (VSM por sus siglas en inglés), es una herramienta efectiva para la práctica de la fabricación ajustada como lo es justo a tiempo. VSM se acerca a todo el flujo del proceso en un método de tres pasos en el que primero se produce un diagrama que muestra el material real y los flujos de información o estado actual sobre cómo funciona el proceso real. Esto se crea al analizar la línea de producción. En segundo lugar, se elabora un mapa de estado futuro para identificar las causas de los desechos y las mejoras en los procesos que podrían tener un gran impacto financiero en el proceso, un flujo de procesos esbelto (Rahani & Al-Ashraf, 2012).

VSM es una técnica o herramienta con lápiz y papel que ayuda a las personas a ver y entender el flujo de material e información a medida que un producto avanza por la corriente de valor. Los elementos de VSM incluyen bucle de cliente, control de producción, bucle de proveedor, Bar de fabricación, flujo de información y barra de datos de tiempo de entrega con ruta crítica que permite tener una visión completa de toda la cadena de suministro, desde los requisitos del cliente hasta la entrega del proveedor (Chen & Meng, 2014).

Recopilación de datos

Según Rahani & Al-Ashraf (2012), para la recopilación de datos es necesario obtenerlos con 3 meses de anticipación por lo menos, además de eso se necesita observar y monitorear la línea para comprender el proceso actual de ensamble, también se identifican los desechos en el proceso, tiempos de cambio, tiempo de transporte y colas. El método establecido es el siguiente:

- a. Datos del tiempo de ciclo o tiempo de procesamiento
- b. Datos del tiempo de cambio
- c. Recopilación de datos inicial en tiempos ciclos generales, tiempo de pérdida, tiempo de cola en proceso.
- d. Gemba
- e. Establecer VSM
- f. Iniciativas Kaizen

g. Monitoreo

Proceso de mapeo

Según Rahani & Al-Ashraf (2012), menciona que la herramienta VSM se enfoca en una producción ajustada al flujo del proceso. El primer paso dice que se produce un diagrama que muestra los flujos de materiales y los flujos de información. En el segundo paso se elabora un mapa de estado futuro con la intención de encontrar la causa de los desechos y mejorar, debido al gran impacto financiero. El objetivo de este proceso de mapeo consiste en encontrar partes del proceso donde los inventarios son mayores para tener una producción lean con mejor flujo de materiales.

2.1.7 Producción suavizada (Heijunka)

En la constante búsqueda de hacer que el producto fluya más suavemente y en lotes cada vez más pequeños se llegó a Heijunka, que en esencia implica replicar las proporciones de la mezcla de productos en el intervalo más pequeño posible. El ideal es la producción y movimiento de una unidad de producto a la vez (one piece flow). Esta producción suavizada genera más movimientos de materiales, por lo que la infraestructura de manejo de materiales debe adaptarse a esta realidad para evitar un desbordamiento de costos por este concepto (Dinas et al., 2009).

El concepto de Heijunka es controlar la variabilidad de la secuencia de llegada del trabajo para permitir una mayor utilización de la capacidad, también evita picos y valles en el cronograma de producción (Sundar et al., 2014).

2.2 Simulación

La simulación se refiere a un gran conjunto de métodos y aplicaciones que buscan imitar el comportamiento de sistemas reales, generalmente por medio de una computadora con un software apropiado (García et al., 2013). La simulación de sistemas sirve para imitar y mejorar sistemas de producción (Kim & Choi, 2014) o incluso utilizados a áreas del aprendizaje (Ruiz, 1998).

2.2.1 Antecedentes de la simulación

Según Ceballos, Restrepo, & Fernández (2013), presentan los antecedentes conceptuales e investigativos de la simulación.

La simulación surge de la evolución del método de Montecarlo y la aplicación de modelos estadísticos y matemáticos por medio de herramientas informáticas, principalmente la computadora. En 1948 con el trabajo de Harris y Herman Kahn se inicia el estudio de la simulación como campo de conocimiento; estos sistematizaron las primeras técnicas de simulación que hoy en día se han venido aplicando en diferentes entornos.

Desde los años 70 la educación de la simulación ha venido ganando especial atención debido a la creciente aceptación de la modelación y la simulación a través de las diferentes disciplinas de la ciencia y sus variadas aplicaciones tales como la industria militar, producción y servicios.

2.2.2 Conceptos básicos de simulación

En esta parte se mencionan los conceptos básicos más relevantes para la investigación enfocados al área de simulación de eventos discretos, así como una breve explicación para una mejor comprensión del tema.

Sistema

Un sistema es un conjunto de elementos interrelacionados que funcionan para lograr un propósito definido; en términos de la simulación, los sistemas se pueden dividir en elementos importantes para la construcción de un modelo de simulación (Ceballos et al., 2013).

Simular un sistema entonces significa imitar un procedimiento que se aproxima al comportamiento real. Para la simulación, el sistema depende principalmente del objetivo de estudio (Ceballos et al., 2013).

Modelo

Según Bolaños (2014), menciona el concepto de modelo de la siguiente manera:

Un modelo es una representación simplificada de la realidad diseñada para representar, conocer y predecir propiedades del objeto real.

Los modelos se construyen con la finalidad de estudiar el objeto real con más facilidad y deducir propiedades difíciles de observar en la realidad:

- a. Eliminando o simplificando componentes
- b. Cambiando las escalas espacial o temporal
- c. Variando las condiciones del entorno
- d. Evitando la actuación sobre el objeto real
- e. Representar objetos o procesos de estudio

Evento

Un evento es un cambio en el estado actual del sistema; por ejemplo, la entrada o salida de una entidad, la finalización de un proceso en un equipo, la interrupción o reactivación de una operación (digamos por un descanso del operario), o la descompostura de una máquina (García et al., 2013). Se catalogan estos eventos en dos tipos: eventos actuales, aquellos que están sucediendo en el sistema en un momento dado, y eventos futuros, cambios que se presentarán en el sistema después del tiempo de simulación, de acuerdo con una programación específica. Por ejemplo, imagine que cierta pieza entra a una máquina para que ésta realice un proceso (García et al., 2013).

El evento actual sería precisamente que la entidad llamada "pieza" se encuentra en la máquina. El evento futuro podría ser el momento en que la máquina concluirá su trabajo con la pieza y ésta seguirá su camino hacia el siguiente proceso lógico, de acuerdo con la programación: almacenamiento, inspección o entrada a otra máquina (García et al., 2013).

Números pseudoaleatorios

Los números pseudoaleatorios son aquellos números entre 0 y 1 utilizados para generar escenarios de simulación, se incluyen para tener una variabilidad en el sistema. Los números pseudoaleatorios deben ser de un gran tamaño, capaz de soportar la cantidad de corridas y las réplicas de la simulación. Una característica de los números pseudoaleatorios es que deben ser totalmente independientes, es decir no debe haber relación entre ellos. Pero también no deberán estar correlacionados, éstos deben tener una distribución uniforme.

2.2.3 Simulación de eventos discretos

Es el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado (Ledoux, Luz, & Morosini, 2018). El objetivo del modelo de simulación consiste, precisamente, en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema (García et al., 2013).

Según Barceló (1996), los sistemas de simulación de eventos discretos son utilizados cuando se realizan cambios en el sistema, los cuáles son conocidos como sucesos. Los sucesos dentro del sistema son la llegada de materia prima, la entrada o salida de una pieza o producto de la operación, en la simulación de eventos discretos se tienen múltiples cambios de estado del sistema debido a los sucesos, con lo cual se puede decir que se maneja en cuanto a relaciones probabilísticas, matemáticas y lógicas.

2.2.4 Distribuciones de probabilidad

Son distribuciones que se encargan de definir la probabilidad de que ocurra un suceso o más dentro de una distribución de finida. Es decir que un suceso puede cambiar la probabilidad de que suceda según sea su distribución. A continuación, se presentan distribuciones utilizadas dentro de la simulación de eventos discretos.

Distribución normal

De acuerdo con Walpole, Myers & Myers (2012), la distribución normal es una de las distribuciones estadísticas más importantes y se denomina por la gráfica en forma de campana, se refiere a la mayoría de los eventos en la naturaleza, industria y la investigación. En esta distribución normal se puede observar que los datos se concentran en medio con lo que se dice que el tamaño de la curva de la demanda depende de la media y la desviación estándar. A continuación, se da una representación gráfica de la distribución normal donde μ = a la media y σ = desviación estándar.

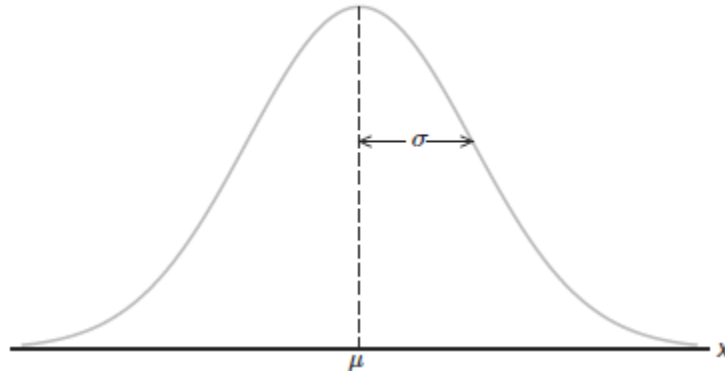


Figura 2. 3. Distribución normal (Fuente: elaboración propia).

Distribución de Poisson

La distribución de Poisson es una distribución discreta que puede utilizarse en la modelización de procesos de llegadas en las que cada llegada es independiente de las restantes y tiene la misma probabilidad de producirse en cada instante (Barceló, 1996).

Los experimentos que producen valores numéricos de una variable aleatoria X , el número de resultados que ocurren durante un intervalo de tiempo determinado o en una región específica, se denominan experimentos de Poisson (Walpole et al., 2012).

Distribución exponencial

Según Walpole et al., (2012), la distribución exponencial es de gran ayuda para el análisis de teoría de colas y problemas de confiabilidad, con esta distribución se expresan los tiempos de llegada y los tiempos de operaciones con lo que indica que un servicio puede ser muy tardado en cambio que otro puede tener un tiempo más corto.

2.2.5 Etapas para realizar una simulación discreta

Según Coss (2002), presenta una serie de pasos necesarios para llevar a cabo la ejecución de un experimento de simulación, las cuales se asemejan a las utilizadas en otras investigaciones (Lin, Liu, Wang, & Li, 2015).

Definición del sistema

La definición del sistema consiste en conocer detalladamente todas las interacciones entre variables y sus restricciones. Aparte de un análisis lo que se busca obtener con la simulación son las medidas de efectividad, estas medidas de efectividad ayudan a tener claro lo que se busca con la simulación y definir el objetivo.

Formulación del modelo

La formulación consiste en definir cada componente dentro del modelo que se va a simular, se determina la secuencia, de lo que debe de llevar como un diagrama de flujo.

Colección de datos

Es importante la obtención de datos relevantes del proceso que se va a simular, dado que de no ser así sería de poca eficiencia el modelo de simulación, o por otra parte es posible obtenerlos mediante los numero pseudoaleatorios, en el caso de que el proceso pueda ser estudiado mediante un modelo de probabilidad.

Implementación del modelo en la computadora

Se analizan las posibilidades para pasar de un modelo planteado a un modelo en computadora utilizando algún lenguaje de programación. Este paso dependerá de la manera en la que se quiera analizar el modelo y hasta qué punto se analizarán los resultados.

Validación

Consiste en el análisis del modelo y los resultados que arroja. Según Bu (2002), muestra algunas maneras de validar el modelo.

- a. La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
- b. La exactitud con que se predicen datos históricos.
- c. La exactitud en la predicción del futuro.
- d. La comprensión de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
- e. La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.

Experimentación

Se lleva a cabo con el modelo elaborado y sirve para llegar al resultado deseado y los índices requeridos.

Interpretación

En este punto se interpretan los resultados obtenidos por la simulación que ayudan a soportar la investigación. Es posible proporcionar otras mejoras al proceso después de haber interpretado y no estar conforme con los resultados.

Documentación

En la documentación es posible crearla de dos tipos: una en cuanto a la parte técnica, es decir de su funcionamiento. La segunda se refiere a un manual de usuario que ayuda a facilitar su interpretación.

2.2.6 Software ProModel

Según García et al., (2013) y Doncel & Torres (2005) mencionan el termino de ProModel de la siguiente manera:

ProModel es uno de los paquetes de software comerciales para simulación más usados en el mercado. Cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar. Básicamente, este producto se enfoca a procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros.

ProModel es un herramienta de computadora desarrollada en los Estados Unidos orientada a la simulación de eventos discretos, provee las herramientas necesarias para el diseño de sistemas de producción flexibles y el análisis de la simulación (Lin et al., 2015).

Componentes de ProModel

▪ Locaciones

Las locaciones en el programa ProModel hacen referencia a puestos de trabajos fijos, son utilizados para representar el proceso requerido para una materia prima. Es utilizado principalmente para representar almacenamiento de material o el procesamiento de una materia prima o producto.

▪ Entidad

Son todos los materiales, productos o personas que se necesitan en un proceso y sirven para representar el flujo entre locaciones y transformación que sufren los materiales durante el proceso.

▪ Procesamiento

El procesamiento se lleva a cabo como una descripción de lo que surge en el proceso, se describen y organizan las rutas que siguen las entidades a través de las locaciones. Durante el procesamiento las entidades y locaciones pueden ser programadas para que puedan sufrir algunos cambios, si hablamos de entidades pueden sufrir cambios de transformación, cortes o uniones, si se mencionan las locaciones durante el procesamiento se indican los tiempos de espera por cada locación.

▪ Llegadas

Las llegadas son todos los materiales, productos o personas que alimentan al proceso es decir todo aquello que entra al proceso, pueden ser agregadas para abastecer las locaciones. Las llegadas son programadas para que lleguen por lapsos o mediante distribuciones de probabilidad.

Elementos básicos

De acuerdo con García et al., (2013), muestran en los siguientes párrafos algunos de los elementos básicos al simular en ProModel.

En ProModel se puede distinguir una serie de módulos que permiten al analista hacer un estudio más completo sobre el modelo que quiere simular. Cada uno de estos módulos cuenta con herramientas de trabajo que hacen de ProModel uno de los mejores paquetes de simulación que existen en el mercado. A continuación, daremos una breve descripción de cada uno de ellos.

▪ ProModel

Es el área de trabajo donde se definirán el modelo y todos sus componentes. En este módulo se programa todo lo que tiene que ver con las relaciones entre las variables del modelo, tanto contadores como relaciones lógicas, flujos, actividades y ciclos de producción.

▪ **Editor gráfico**

El editor gráfico de ProModel cuenta con una serie de bibliotecas que permiten dar una mejor presentación visual a los modelos realizados. Además, cuenta con la capacidad de importar y crear las imágenes necesarias para representar con mayor eficiencia el problema a simular. Incluso pueden importarse dibujos hechos con algún software para dicho propósito.

▪ **Resultados**

ProModel cuenta con una interfaz de resultados que facilita la administración, el manejo y el análisis de la información. En este módulo se pueden ver los resultados de todas las variables del modelo. Algunas de ellas se reportan de manera automática, y otras se obtienen bajo solicitud expresa del analista. Además, el módulo permite la interacción con programas de hoja de cálculo, como Excel.

▪ **Stat::Fit**

El software incluye una herramienta estadística llamada Stat::Fit, que permite hacer pruebas de bondad de ajuste sobre datos muestra, produciendo información muy importante para determinar las distribuciones asociadas a las variables aleatorias del modelo. Además, constituye una gran ayuda si se desconoce cómo alimentar distribuciones complejas de la biblioteca de ProModel en el modelo de simulación.

▪ **Editor de turnos**

El editor de turnos permite asignar turnos de trabajo a los elementos del modelo que lo requieran, por ejemplo, descansos programados, como el tiempo de comida.

▪ **Simrunner**

Ésta es una herramienta muy útil en el análisis posterior del modelo. Con ella se pueden diseñar experimentos destinados a conocer el impacto de factores críticos que se generan a partir de la variación en los valores de las variables aleatorias seleccionadas. Asimismo, permite discernir cuál es la mejor combinación de factores para obtener el máximo beneficio al mejorar un proceso.

▪ **Referencias y Ayuda**

Estos módulos de ProModel facilitan el uso y la programación del software.

Estructura de programación en ProModel

De acuerdo con García et al., (2013), muestran una estructura de programación en ProModel en los siguientes dos párrafos:

En ProModel, la programación para la simulación constituye sólo una parte del proceso de construcción del modelo ya que, como se ha mencionado, el software también cuenta con diversas herramientas de animación, por ejemplo, que el analista debe aprender a manejar para obtener los mejores resultados.

A fin de ayudarle a lograr una comprensión integral acerca del uso de ProModel, contiene varios ejemplos para la práctica de sus herramientas. En las que se explica de manera puntual su aplicación en los modelos.

2.3 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planeadas adecuadamente (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Esta metodología se ha ido consolidando como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería, que permite entender mejor las situaciones complejas de relación causa-efecto (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Un diseño experimental es un esquema de cómo realizar un experimento. El objetivo fundamental de los diseños experimentales radica en el determinar si existe una diferencia significativa entre los diferentes tratamientos del experimento y en caso de que la respuesta es afirmativa, cuál sería la magnitud de esta diferencia (Badii, Castillo, Rodríguez, Wong, & Villalpando, 2007). Una segunda meta de los diseños experimentales es verificar la existencia de una tendencia derivada del análisis de los datos del experimento (Badii et al., 2007).

2.3.1 Antecedentes del diseño de experimentos

De acuerdo con Gutiérrez & De la Vara, (2008), muestran algunos de los antecedentes más importantes del diseño de experimentos.

El diseño estadístico de experimentos, desde su introducción por Ronald A. Fisher en la primera mitad del siglo XX en Inglaterra, se ha utilizado para conseguir un aprendizaje acelerado. El trabajo de Fisher a través de su libro *The Design of Experiments* (1935), influyó de manera decisiva en la investigación agrícola, ya que aportó métodos (ahora usados en todo el mundo) para evaluar los

resultados de experimentos con muestras pequeñas. La clave de las aportaciones de Fisher radica en que este investigador se dio cuenta de que las fallas en la forma de realizar experimentos obstaculizaban el análisis de los resultados experimentales. Fisher también proporcionó métodos para diseñar experimentos destinados a investigar la influencia simultánea de varios factores.

Los desarrollos posteriores en diseños de experimentos fueron encabezados por George E. P. Box, quien trabajó como estadístico durante ocho años en la industria química en Inglaterra y desarrolló la metodología de superficie de respuestas, la cual incluye nuevas familias de diseños y una estrategia para la experimentación secuencial. Es posible afirmar que entre 1950 y 1980, el diseño de experimentos se convirtió en una herramienta de aplicación frecuente, pero sólo en las áreas de investigación y desarrollo. Hasta la década de 1970, la aplicación a nivel planta o procesos de manufactura no estaba generalizada, debido a la falta de recursos computacionales y a que los ingenieros y especialistas en manufactura carecían de formación en el área de estadística.

En la década de 1980 se dio un gran impulso al conocimiento y la aplicación del diseño de experimentos debido al éxito en calidad de la industria japonesa. El movimiento por la calidad, encabezado por los gurús Deming e Ishikawa, promovió el uso de la estadística en calidad, donde el diseño de experimentos demostró su utilidad tanto para resolver problemas de fondo como para diseñar mejor los productos y los procesos. En Japón destaca el trabajo de Genichi Taguchi, cuyos conceptos sobre diseño robusto también tuvieron un impacto significativo en la academia en el mundo occidental. Como respuesta al movimiento por la calidad y la mejora de procesos, las industrias empezaron a entrenar a sus ingenieros en la aplicación del diseño de experimentos. Esto continúa en la actualidad; incluso, en los últimos veinte años, las universidades han incorporado el diseño de experimentos como materia obligatoria u operativa en la mayoría de las ingenierías.

2.3.2 Conceptos básicos del diseño de experimentos

Experimento

En un sentido literal, un experimento es una prueba. En una perspectiva más formal, un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar e identificar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (Montgomery, 2017).

Un experimento es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio sobre una o varias propiedades del producto o resultado (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Factores controlables

Son variables de proceso o características de los materiales experimentales que se pueden fijar en un nivel dado (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Algunos de éstos son los que usualmente se controlan durante la operación normal del proceso, y se distinguen porqué, para cada uno de ellos, existe la manera o el mecanismo para cambiar o manipular su nivel de operación (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Factores no controlables o de ruido

Son variables o características de materiales y métodos que no se pueden controlar durante el experimento o la operación normal del proceso (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Estos son factores externos al experimento como: ruido, humedad, cantidad de luz entre otros.

Unidad experimental

La unidad material del experimento al cual se aplica el experimento (Badii et al., 2007). En otras palabras, la unidad experimental es el material, proceso, o cualquier elemento al que se le realizará la aplicación del diseño de experimentos.

Control de condiciones

Se trata de controlar aquellas condiciones externas a las unidades experimentales que pueden ocasionar variación o ruido en los resultados del experimento (Badii et al., 2007).

Error experimental

Según con Montgomery (2017), el error o error experimental es un error inevitable que tienen los factores sobre la respuesta. La presencia del error o ruido implica una variabilidad en la respuesta, la confiabilidad o el impacto.

Tratamiento

A continuación, Badii, et al., (2007), definen el significado de tratamiento dentro del diseño de experimentos de la siguiente manera:

La condición específica del experimento bajo el cual está sujeto la unidad experimental. Es una de las formas que, en cantidad y calidad, el factor a estudiar toma durante el experimento. Por ejemplo, si el factor a estudiar es la cantidad de fósforo, cada una de las dosis de fósforo aplicados durante el experimento es un tratamiento. Los tratamientos por estudiar durante un experimento pueden ser una combinación de varios factores simples.

Replica

Cuando en un experimento se tiene un conjunto de tratamientos para poder estimar el error experimental, es necesario que dichos tratamientos aparezcan más de una vez en el experimento, para así aumentar la precisión de éste, controlar el error experimental y disminuir la desviación estándar de la media (Badii et al., 2007). La réplica es la cantidad de veces que se aplica el mismo experimento con la finalidad de ser más asertivo con la variable respuesta.

Variable aleatoria

Una variable aleatoria puede ser discreta o continua. Si el conjunto de todos los valores posibles de la variable aleatoria es finito o contablemente finito, entonces la variable aleatoria es discreta, mientras que, si el conjunto de todos los valores posibles de la variable aleatoria es un intervalo, entonces la variable aleatoria es continua (Montgomery, 2017).

Diseños factoriales

Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o replica completa del experimento se investiga todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. Por ejemplo, si el factor A tiene a niveles y B tiene b niveles, cada replica contiene todas las ab combinaciones de los tratamientos. Cuando los factores están incluidos en un diseño factorial, es común decir que están cruzados (Montgomery, 2017).

Metodología de superficie de respuesta

La metodología de superficie de respuesta, o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelado y análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta (Montgomery, 2017).

2.3.3 Principios básicos

Según Gutiérrez & De la Vara (2008) , mencionan en los siguientes párrafos los principios básicos del diseño de experimentos y las razones por lo que es necesario que sean aplicados. Son requeridas para que los factores de ruido tengan la menor influencia en la variable de respuesta.

El diseño de experimentos trata de fenómenos que son observables y repetibles. Por lo tanto, sin el pensamiento estadístico, los conceptos de observación y repetibilidad son inherentemente contradictorios. Cualquier cosa observada se aprecia con variabilidad; nada ocurre exactamente de la misma forma dos veces, incluso las mediciones del mismo evento varían.

El punto de partida para una correcta planeación es aplicar los principios básicos del diseño de experimentos: aleatorización, repetición y bloqueo, los cuales tienen que ver directamente con que los datos obtenidos sean útiles para responder a las preguntas planteadas, es decir, la validez del análisis de los datos se apoya en estos principios.

Aleatorización

Según Gutiérrez & De la Vara (2008), describen el término aleatorización de la siguiente manera: Consiste en hacer las corridas experimentales en orden aleatorio (al azar) y con material también seleccionado aleatoriamente. Este principio aumenta la probabilidad de que el supuesto de independencia de los errores se cumpla, lo cual es un requisito para la validez de las pruebas de estadísticas que se realizan. También es una manera de asegurar que las pequeñas diferencias provocadas por materiales, equipo y todos los factores no controlados, se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos.

Repetición

Según Gutiérrez & De la Vara (2008), describen el termino repetición de la siguiente manera:

Es correr más de una vez un tratamiento o una combinación de factores. Es preciso no confundir este principio con medir varias veces el mismo resultado experimental. Repetir es volver a realizar un tratamiento, pero no inmediatamente después de haber corrido el mismo tratamiento, sino cuando corresponda de acuerdo con la aleatorización. Las repeticiones permiten distinguir mejor qué parte de la variabilidad total de los datos se debe al error aleatorio y cuál a los factores. Cuando no se hacen repeticiones no hay manera de estimar la variabilidad natural o el error aleatorio, y esto dificulta la construcción de estadísticas realistas en el análisis de los datos.

Bloqueo

Según Gutiérrez & De la Vara (2008), describen el termino bloqueo de la siguiente manera:

Consiste en nulificar o tomar en cuenta, en forma adecuada, todos los factores que puedan afectar la respuesta observada. Al bloquear, se supone que el subconjunto de datos que se obtengan dentro de cada bloque (nivel particular del factor bloqueado), debe resultar más homogéneo que el conjunto total de datos. Por ejemplo, si se quieren comparar cuatro máquinas, es importante tomar en cuenta al operador de las máquinas, en especial si se cree que la habilidad y los conocimientos del operador pueden influir en el resultado. Una posible estrategia de bloqueo del factor operador, sería que un mismo operador realizara todas las pruebas del experimento.

2.3.4 Etapas para desarrollar un diseño de experimento

A continuación, se presenta la metodología para desarrollar un diseño de experimentos con base en el libro de (Montgomery, 2017) “Diseño y análisis del diseño de experimentos”. Esta metodología es tomada en cuenta en la presente investigación debido a su importancia para desarrollar la tesis.

Identificación y exposición del problema

Es necesario desarrollar todas las ideas acerca de los objetivos del experimento. Generalmente, es importante solicitar aportaciones de todas las áreas involucradas: ingeniería, aseguramiento de

calidad, manufactura, administración, el cliente y el personal (el cual por lo general conoce a fondo el proceso y al que con demasiada frecuencia se ignora) (Montgomery, 2017).

En la mayoría de los casos es conveniente hacer una lista de los problemas o las preguntas específicas que van a abordarse en el experimento. Una enunciación clara del problema contribuye sustancialmente a menudo para alcanzar una mejor comprensión de los fenómenos bajo estudio y la solución final del problema (Montgomery, 2017). También es muy probable que en esta parte del diseño de experimentos se tomen en cuenta que tipo de diseño experimental se requiere ejecutar.

Elección de los factores, los niveles y rangos

Los factores del diseño son los que se seleccionan realmente para estudiarlos en el experimento. Los factores que se mantienen constantes son variables que pueden tener cierto efecto sobre la respuesta, pero para los fines del experimento en curso no son de interés, por lo que se mantendrán fijos en un nivel específico (Montgomery, 2017). Esta parte del diseño es importante debido a que los factores pueden llegar a tener parte de la variable respuesta, pero es difícil llegar a variar este factor por lo que se toma como constante para todas las réplicas.

Una vez que el experimentador ha seleccionado los factores del diseño, debe elegir los rangos en los que hará variar estos factores, así como los niveles específicos con los que se realizarán las corridas. También deberá pensarse cómo van a controlarse estos factores en los valores deseados y cómo van a medirse (Montgomery, 2017).

Selección de la variable respuesta

Para seleccionar la variable de respuesta, el experimentador deberá tener la certeza de que esta variable proporciona en realidad información útil acerca del proceso bajo estudio. En la mayoría de los casos, el promedio o la desviación estándar (o ambos de la característica medida será la variable de respuesta (Montgomery, 2017).

Si la eficiencia de los instrumentos de medición es inadecuada, el experimentador sólo detectará los efectos relativamente grandes de los factores o quizá sean necesarias réplicas adicionales. En algunas situaciones en que la eficiencia de los instrumentos de mediciones pobre, el experimentador puede decidir medir varias veces cada unidad experimental y usar el promedio de las mediciones repetidas como respuestas observada (Montgomery, 2017).

Elección del diseño experimental

La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra (número de réplicas), la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación de si entran en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización (Montgomery, 2017).

Al seleccionar el diseño, es importante tener en mente los objetivos experimentales. En muchos experimentos de ingeniería se sabe de antemano que algunos de los niveles de los factores producirán valores diferentes de la respuesta. Por consecuencia, el interés se concentra en identificar qué factores causan esta diferencia y en estimar la magnitud del cambio de la respuesta (Montgomery, 2017).

Realización del experimento

Cuando se lleva a cabo el experimento es vital monitorear con atención el proceso a fin de asegurarse de que todo se esté haciendo conforme a la planeación. Los errores en el procedimiento experimental en esta etapa destruirán por lo general la validez experimental. Poner en primer plano la planeación es crucial para el éxito. Es fácil subestimar los aspectos de logística y planeación cuando se corre un experimento diseñado en un ambiente complejo de manufactura o de investigación y desarrollo (Montgomery, 2017). Otra cosa importante durante esta etapa es realizar pruebas piloto antes de realizar la prueba, con el fin de evitar errores experimentales y dar una oportunidad para revisar y tomar decisiones de lo que realmente se espera de la variable de respuesta y los factores.

Análisis estadístico de los datos

Deberán usarse métodos estadísticos para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo. Si el experimento se ha diseñado correctamente y si se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados (Montgomery, 2017).

Según con Montgomery (2017), los métodos de análisis estadísticos no logran demostrar el efecto particular de los factores, pero si proporcionan pautas generales de la confiabilidad y la validez de los resultados. Este análisis se realiza con los errores de los factores arrojados por los softwares que ayudan a conocer los niveles de confianza y así dar una conclusión sólida.

Conclusiones y recomendaciones

Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para representar los resultados. También deberán realizarse corridas de seguimiento o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento (Montgomery, 2017).

2.3.5 Diseño factorial 2^k

De acuerdo con Montgomery (2017), los diseños factoriales son los más usados cuando es necesario analizar el efecto de los factores en conjunto sobre la respuesta. En el diseño factorial 2^k se consideran dos factores para cada efecto y pueden estar definidos como nivel bajo o alto, fuerte o débil, etc. A la misma vez pueden ser factores cuantitativos o cualitativos. Este diseño proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo y son ampliamente utilizados en los experimentos de tamizado o selección de factores (Montgomery, 2017).

Diseño factorial 2^2

De acuerdo con Gutiérrez & De la Vara (2008), nombra que el diseño 2^2 estudia dos factores en dos niveles, con lo cual su diseño está dado por un $2 \times 2 = 4$ combinaciones o tratamientos. Además de estar denotadas por los signos +, - que son una manera práctica para ajustar en los modelos de regresión de datos.

Es necesario para este tipo de experimento denotar los factores por la notación de Yates [(1), a, b, ab]. La lógica de Yates es la siguiente: si una letra minúscula está presente, entonces el factor correspondiente se encuentra en su nivel alto; si está ausente, el factor está en su nivel bajo; por ejemplo, ab se refiere al tratamiento en el que los factores A y B están en su nivel alto (Gutiérrez & De la Vara, 2008). A continuación, se presenta en la tabla inferior la manera de establecer la matriz del diseño que permite calcular los efectos de interés.

Tabla 2. 1. Notación de los tratamientos del diseño 2²(Fuente: elaboración propia).

Factor		Combinación de tratamientos		Notación de Yates
A	B			
-	-	A bajo	B bajo	(1)
+	-	A alto	B bajo	a
-	+	A bajo	B alto	b
+	+	A alto	B alto	ab

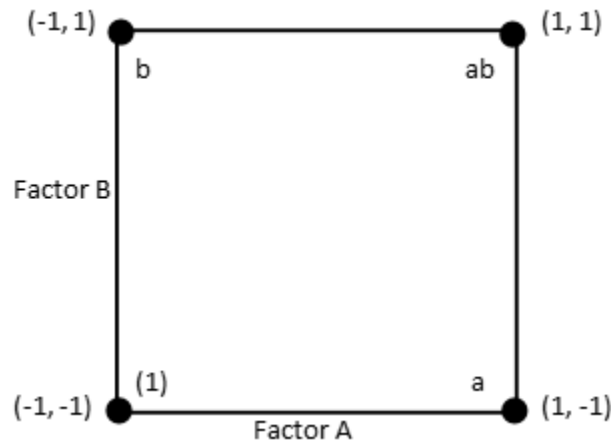


Figura 2. 4. Combinación del diseño factorial 2²(Fuente: elaboración propia).

Diseño factorial 2³

En este diseño factorial 2³ se encarga de estudiar tres distintos factores a dos niveles cada uno. En este caso la representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse con un cubo (Montgomery, 2017). La matriz de diseño se construye fácilmente alternando el signo menos y el signo más en la primera columna, dos menos y dos más en la segunda columna, y cuatro menos y cuatro más en la tercera; el diseño resulta acomodado en el orden estándar o de Yates (Gutiérrez & De la Vara, 2008). En la tabla 2.2 se muestran las notaciones de los tratamientos en sus niveles.

Tabla 2. 2. Notación de los tratamientos del diseño 2^3 (Fuente: elaboración propia).

Factor			Combinaciones de tratamientos			Notación de Yates
A	B	C				
-	-	-	A bajo	B bajo	C bajo	(1)
+	-	-	A alto	B bajo	C bajo	a
-	+	-	A bajo	B alto	C bajo	b
+	+	-	A alto	B alto	C bajo	ab
-	-	+	A bajo	B bajo	C alto	c
+	-	+	A alto	B bajo	C alto	ac
-	+	+	A bajo	B alto	C alto	bc
+	+	+	A alto	B alto	C alto	abc

Con este diseño se pueden estudiar los $2^3 - 1 = 7$ efectos: tres efectos principales A, B, C; tres interacciones dobles AB, AC, BC y una interacción triple ABC (Gutiérrez & De la Vara, 2008). El objetivo principal del experimento se enfoca en estudiar los efectos principales, así como las interacciones. A continuación, se presenta la representación geométrica de los factores y sus niveles.

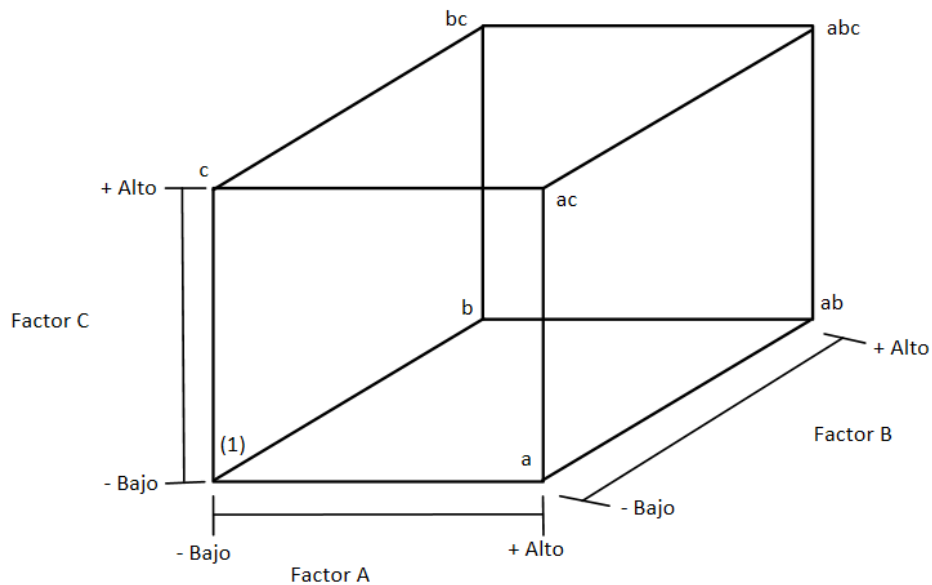


Figura 2. 5. Combinación del diseño factorial 2^3 (Fuente: elaboración propia).

Diseño general 2^k

En el siguiente párrafo Gutiérrez & De la Vara (2008), mencionan la manera en la que se genera un diseño general 2^k .

El caso general que es el diseño 2^k , en el cual se consideran k factores con dos niveles cada uno, y tiene 2^k tratamientos o puntos de diseño. Las k columnas y 2^k renglones que componen la matriz para este diseño, considerando una réplica, se construyen de la siguiente manera: en la primera columna, que corresponde a los niveles del factor A, se alternan signos + y -, empezando con - hasta llegar a los 2^k renglones; en la segunda columna se alternan dos signos menos con dos signos más; en la tercera, se alternan cuatro signos menos y cuatro signos más, y así sucesivamente hasta la k -ésima columna compuesta por 2^{k-1} signos -, seguidos de 2^{k-1} signos +.

Procedimiento de análisis para un diseño 2^k

De acuerdo con Montgomery (2017) sugiere una serie de pasos necesarios para realizar un análisis para un diseño 2^k .

- a. Estimar los efectos de los factores
- b. Formar el modelo inicial
- c. Realizar las pruebas estadísticas
- d. Refinar el modelo
- e. Analizar los residuales
- f. Interpretar los resultados

2.3.6 Diseño factorial mixto

El diseño factorial mixto es aquel donde los factores utilizados en el experimento no tienen el mismo número de niveles. De acuerdo con Gutiérrez & De la Vara (2008), un ejemplo de un diseño factorial mixto es el factorial $4 \times 3 \times 2$ y es aquel donde cada uno de los factores se encuentra en diferente nivel, con 4, 3 y 2 respectivamente. El diseño factorial mixto es más frecuente que se utilice cuando, por su naturaleza discreta o categórica, los factores tienen un número finito y distinto de niveles, y el interés es estudiar todos los niveles (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Para Montgomery (2017), el diseño factorial mixto es una mezcla entre los diseños factoriales y factoriales fraccionados, son utilizados en situaciones en las que es necesario incluir un o varios factores con niveles diferentes. Esto puede ocurrir cuando hay factores tanto cuantitativos en el experimento y un factor se encuentra en 3 niveles y otro en 2 niveles.

Factores con dos y tres niveles

De acuerdo con Montgomery (2017) los diseños en los que algunos factores tienen dos niveles y otros tres niveles pueden derivarse de las tablas de diseños 2^k usuales. En el caso en el que tengamos dos factores a dos niveles y otro factor a 3 es posible hacer una combinación de los dos factores de dos niveles para cambiarlo por un factor a tres niveles como se puede observar en la tabla 2.3.

Tabla 2. 3. Uso de dos niveles para crear un factor de tres niveles (Fuente: elaboración propia).

Factores con dos niveles		Combinación de tratamientos		Factor con tres niveles
A	B			
-	-	A bajo	B bajo	X1
+	-	A alto	B bajo	X2
-	+	A bajo	B alto	X2
+	+	A alto	B alto	X3

En la tabla 2.4 muestra el número de corridas necesarias para un experimento con dos factores donde un factor se encuentra a 2 niveles y el otro se encuentra a 3 niveles.

Tabla 2. 4. Un factor con dos niveles y un factor con tres niveles en un diseño 2^3 (Fuente: elaboración propia).

Corrida	Factor		Combinaciones de tratamientos	
	A	B		
1	-	-	Bajo	Bajo
2	+	-	Alto	Bajo
3	-	-	Bajo	Intermedio
4	+	-	Alto	Intermedio

CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO

5	-	+	Bajo	Intermedio
6	+	+	Alto	Intermedio
7	-	+	Bajo	Alto
8	+	+	Alto	Alto

2.4 Estado del arte

Tabla 2. 5. Estado del arte (Fuente: elaboración propia).

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
(2013)	Ingeniería Industrial	Aplicación de un modelo de simulación discreta en el sector automotor	Julián Andrés Ceballos Carrillo Eyder Daniel Restrepo Núñez Javier Darío Fernández Ledesma	<p>El artículo muestra la aplicación de un modelo de simulación de eventos discretos en una empresa de manufactura del sector automotor. Con la finalidad de mejorar sus indicadores de calidad, alcance, tiempo y costos.</p> <p>El trabajo está basado en la metodología del ciclo Deming (planear, hacer, verificar y aplicar) como herramienta para mejorar los procesos. Pero también, expone la aplicación de un diseño experimental como forma de encontrar escenarios de simulación, diseños de plan que permitan conocer el sistema y sus áreas de oportunidad.</p> <p>El objetivo del artículo es un apoyo para mejorar las PYMES, para romper las barreras competitivas que les impiden participar en el mercado internacional. A través de la planificación y la simulación, diseñando diferentes escenarios de simulación con distintas distribuciones de planta.</p>

(2012)	Conciencia Tecnológica	Elementos que afectan el nivel de inventario en proceso (WIP) y los costos de una línea de producción	Pedro Moreno Vázquez Jesús Mora Ruíz	<p>El artículo hace una breve explicación acerca de los problemas que puede provocar el no tener una correcta distribución de planta y generar trabajo en proceso en exceso. Recalcando lo que dicen los autores en el artículo hacen mención de que el trabajo en proceso pertenece de manera directa a la mala distribución de planta además de afirmar que el trabajo en proceso es una fuente generadora de aumento de los costos de producción y desperdicios de personal como de materiales.</p> <p>Se muestran algunas de sus observaciones para conseguir una distribución de planta correcta y con esta se deben tomar en cuenta lo siguiente: espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento y espacios necesarios para que el personal realice sus labores.</p> <p>La investigación sigue el método propuesto por Hernández Sampieri que consiste en un diseño cuasiexperimental de tipo prueba-posprueba con grupos de control. Se obtienen resultados para concluir que el trabajo en proceso se disminuye al</p>
--------	---------------------------	---	--	---

				tener una distribución de planta más efectiva, pero también se disminuyen los costos de producción.
(2012)	Colciencias	El WIP como objetivo estratégico en la distribución de planta	Daniel Cardona Luis Felipe Cardona Juan Diego Forero Leonardo Rivera	<p>Este artículo da a conocer cómo reducir los niveles de trabajo en proceso (WIP), mediante un enfoque de teoría de colas y una metodología de diseño de experimentos expuesta por Gutiérrez y de la Vela (2008) para un diseño al azar. El objetivo de la investigación busca tener un impacto en los costos de manufactura, el inventario de trabajo en proceso (WIP), el tiempo de ciclos y la productividad de la planta.</p> <p>Las características de la planta siguen un sistema <i>pull</i> y una producción tipo <i>flowline</i>, lo cual se dice que cada producto sigue una ruta específica y toma en cuenta un valor esperado de la demanda. Para tener un acercamiento más real del proceso se agregaron variables del manejo de los materiales con diferentes tiempos.</p> <p>En conclusión, se recomienda utilizar un solo sistema de materiales para las diferentes entidades de manejo de los materiales. Permite evaluar con mayor precisión</p>

				los sistemas productivos y ayuda a obtener modelos más cercanos a la realidad.
(2014)	Universidad autónoma de Madrid. Fundación general	Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación	Carmen Fullana Belda Elena Urquía Grande	<p>El artículo muestra modelos de simulación con un enfoque para mejora de procesos e implementación de innovaciones, simulando actividades para recopilar datos del rendimiento de los procesos y analizar indicadores que lleven a la toma de decisiones.</p> <p>El artículo menciona las etapas necesarias para desarrollar un modelo de simulación empezando por la representación del proceso de forma gráfica, tener conocimiento de cada actividad, recolectar toda información relacionada con la actividad, analizar la información relacionada con las actividades y analizar la variación de cada proceso a fin de realizar predicciones.</p>
(2009)	Dyna	Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación	Juan Carlos Salazar Armando Baena Zapata	De acuerdo con el artículo expone su punto de vista de la simulación aplicada a estudios científicos, a su vez utiliza un diseño de experimentos para analizar los niveles robustos de los resultados. hace uso de la metodología del diseño y análisis de experimentos en los estudios de simulación, explicándolo de una manera muy peculiar y sencilla basándose con los

				<p>pasos para realizar un diseño de experimentos del libro de diseño y análisis de experimentos de Montgomery. Específicamente se basa en “robustez de un modelo de Markov de tres estados bajo distintas especificaciones distribucionales de los tiempos de transición” que permite analizar cómo llevar a cabo la aplicación de diseño de experimentos paso a paso y permitiendo entender cada elemento, variables, variables no controlables, factores o bloques, covariables, regresión múltiple, entre otras.</p>
(2007)	Innovaciones de negocios	Diseños experimentales e investigación científica	<p>M.H. Badii J. Castillo M. Rodríguez A. Wong P. Villalpando</p>	<p>Lo que se presenta en este artículo es como debe de realizarse distintos diseños experimentales y para que realizarlo tomando en cuenta que al analizar los resultados puedes obtener respuesta sobre lo significativo que son las variables. Realiza una explicación breve de los conceptos que se encuentran en la literatura de los diseños experimentales con lo que ayuda a comprender e interpreta resultados. Explica las características de los diseños experimentales tales como: diseño completamente aleatorio, diseño de bloques al azar, diseño de cuadro latino, diseño de parcelas y diseños factoriales.</p>

				Tomando en cuenta lo anterior puede decirse que el artículo ayuda a elegir que diseño experimental utilizar en la presente investigación, además de una guía para entender cómo se debe aplicar para obtener los resultados e interpretar.
(2014)	Panorama administrativo	Manufactura esbelta (lean manufacturing) principales herramientas	Francisco Gonzáles Correa	<p>El presente artículo expone las principales herramientas de la manufactura esbelta (lean manufacturing), como una forma de eliminar los desperdicios y actividades que no agregan valor al producto. Está basada en la implementación de herramientas como 5s, SMED, TPM, trabajo estandarizado y otras más.</p> <p>Se mencionan estas herramientas de lean manufacturing como una forma de mejorar procesos, pero también otras áreas administrativas, para agregar valor a las actividades de la empresa. El resultado de trabajar con estas metodologías es disminuir los desperdicios y mejorar la calidad, para generar buenos resultados en organizaciones que están comprometidas con la mejora continua.</p>

(2018)	IFAC- PapersOnLine	Simulation-based analysis of inventory strategies in lean supply chains	Satie Ledoux Takeda Guilherme Luz Tortorella Enzo Morosini Frazzon	Este trabajo tiene como objetivo analizar diferentes estrategias de gestión de inventario en relación proveedor-cliente en un entorno a lean supply chain management. Para realizar este análisis se utilizó simulación computacional para modelar cuatro estrategias diferentes. Los resultados se midieron utilizando los indicadores de tiempo y nivel de servicio. Este artículo ayudo a conocer acerca de las técnicas actuales aplicadas a las mejoras de procesos entre empresa y cliente. Los modelos de simulación utilizados sirvieron para aprender sobre diferentes métodos de simulación discreta aplicada a procesos industriales.
(2017)	European Journal of Operational Research	Dynamic facility layout problem based on open queuing network theory	Hani Pourvaziri Henri Pierreval	En este artículo se considera el uso de un enfoque analítico que utiliza la teoría de la red de colas abiertas y se basa en una formulación de problemas de asignación cuadrática. Los enfoques se centran en reducir los costos de manejo y reorganización, este artículo también considera la cantidad de trabajo en proceso para una clase particular de problemas. El trabajo en proceso resulta del fenómeno de colas y depende de la disponibilidad de unidades de

				<p>transporte. Todo esto ayuda a conocer métodos recientes aplicados a la reducción del trabajo en proceso y a conocer otros motivos por los que es necesario la reducción del trabajo en proceso dentro de los procesos. El método utilizado es llamado como (C-MOSA), utilizando experimentos computacionales y los resultados eficientes para resolver el problema de diseño dinámico de instalaciones con múltiples objetivos.</p>
(2017)	Scientia Iranica	Human errors incorporation in work-in-process group manufacturing system	C. W. Kang M. Ullah B. Sarkar	<p>El análisis de este artículo es alrededor de los errores humanos al tomar decisiones y que pueden afectar dentro de la línea de producción. Incorpora errores humanos en el proceso de toma de decisiones que se centran en el modelo de inventario de tecnología de grupo, en el que intervienen procesos de mecanizado de alto valor agregado. Por lo tanto, se desarrolla un modelo matemático para el tamaño de lote óptimo teniendo en cuenta los errores humanos en el proceso de toma de decisiones y el proceso de producción imperfecto, centrado en el inventario de procesos de trabajo en proceso. El tamaño del lote se optimiza en función de la minimización del costo promedio al</p>

				incorporar el error humano Tipo I y el error humano Tipo II.
--	--	--	--	--

CAPÍTULO 3 MARCO METODOLÓGICO

La metodología propuesta en la presente investigación está basada en la simulación de eventos discretos de Coss (2002), en la parte experimental se propuso aplicar un diseño de experimentos de acuerdo con Montgomery (2017), para apoyar la investigación y facilitar la planeación de los distintos escenarios, con lo que agiliza el análisis de los resultados para analizar su efectividad mediante herramientas estadísticas. A continuación, en el siguiente diagrama se especifica la secuencia que se llevó a cabo para la obtención de los resultados.

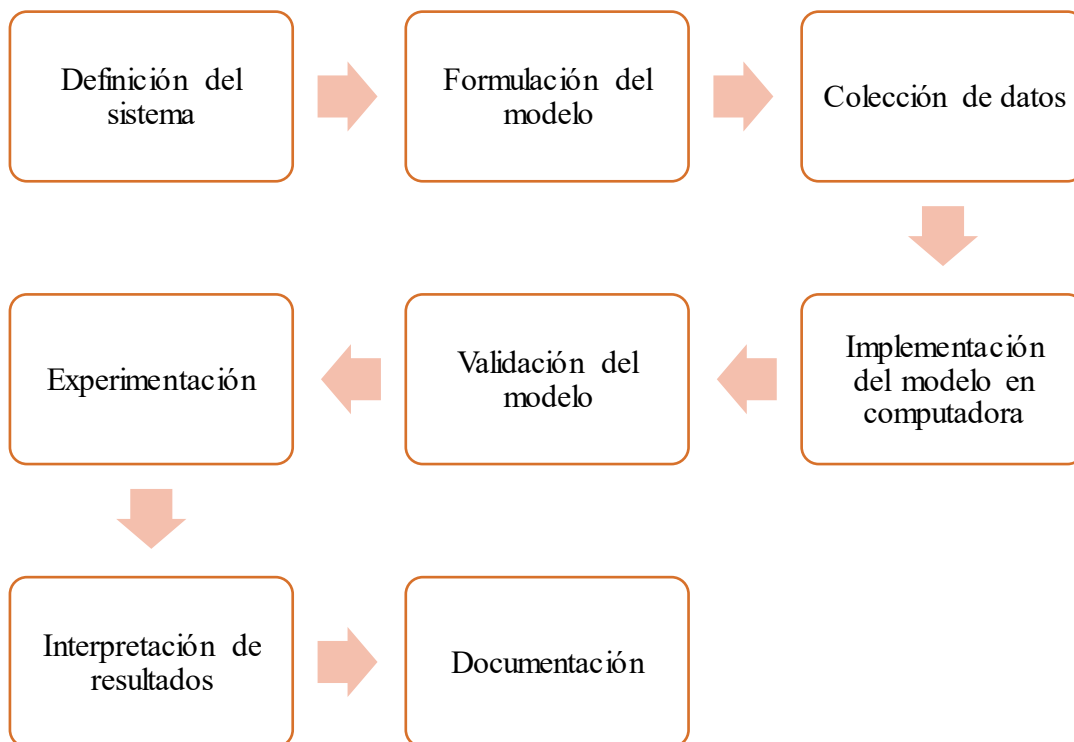


Figura 3. 1. Metodología (Fuente: elaboración propia).

3.1 Definición del sistema

En esta etapa se debe definir la dirección del proyecto en términos de: identificar los requisitos; establecer objetivos claros y posibles de realizar; equilibrar las demandas concurrentes de calidad,

alcance, tiempo y costos; adaptar las especificaciones, los planes y el enfoque a las diversas inquietudes y expectativas de los diferentes interesados (Ceballos et al., 2013). Esto facilitará la comprensión del tema para llevar el proyecto de manera adecuada rumbo a su desarrollo.

Es necesario conocer el objetivo general para determinar los alcances y formular los problemas que se derivan de las actividades del proyecto. Por lo que también es necesario conocer las variables del proceso y como interactuarán en el modelo. En esta primera etapa se establece el tema central que se va a analizar y se puede plantear el alcance de la investigación.

3.2 Formulación del modelo

Esta segunda etapa consiste en analizar los resultados esperados del proyecto, servirá para la elaboración de un modelo capaz de obtener resultados. Una vez definido el modelo con el que se trabajará para obtener los resultados planteados en la primera etapa, se debe tomar en cuenta la relación que tiene cada variable sobre el modelo. Es decir que se deben considerar todas las posibles interacciones que puedan existir durante su desarrollo.

Una opción con la cual se puede apoyar para conocer el modelo es mediante un diagrama de flujo, que sirve para describir de una manera secuencial y completa las estaciones del modelo.

3.3 Colección de datos

La colección de los datos con la que se trabajará para el desarrollo del modelo será mediante la experimentación o en su defecto generando números aleatorios en caso de que no existan, los cuáles sirven para conocer cómo se comportará el modelo cuando este sea procesado y asegurarse de que los datos obtenidos estén acordes a los esperados.

3.4 Implementación del modelo en computadora

Esta siguiente etapa consiste en seleccionar el programa mediante el cual se creará el modelo y procesarán los datos para obtener los resultados deseados. Es importante utilizar un programa que ayude a evaluar el método y proporcione resultados concretos. De acuerdo con Pergher & Vaccaro

(2013), la simulación es una metodología eficaz y generalizada que proporciona visibilidad dinámica y mejora del proceso con la cual se obtienen ventajas al aplicar el modelo a computadora. El software utilizado en esta investigación es ProModel ya que es capaz de crear un modelo para procesar y arrojar los resultados que servirán para conocer la eficiencia del proceso. De acuerdo con Jayaprakash, Kumar & Ambedkar (2015) y Bernal, Cock, & Restrepo (2015), ProModel es un software de programación de eventos discretos utilizado alrededor del mundo para simular operaciones, capaz de: reducir cuellos de botella, reducir la acumulación de inventarios, obtener mejoras en la productividad, optimización de la producción, disminuir costos, además de evaluar ideas y diseños de nuevos sistemas. Es importante seleccionar un software que cumpla con los requerimientos de los procesos que se van a evaluar, por lo que el software ProModel cumple con los requerimientos necesarios para procesar y analizar los datos mediante la simulación de eventos discretos.

3.5 Validación del modelo

Esta etapa es la encargada de medir la eficiencia del modelo y verificar que realmente se obtengan los resultados planeados. Es importante conocer cuáles son los resultados que se esperarán del proceso para identificar fallas.

De acuerdo con Coss (2002), menciona una serie de pasos para la validación del modelo a computadora:

- a) La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
- b) La exactitud con que se predican datos históricos.
- c) La exactitud en la predicción del futuro.
- d) La comprensión de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
- e) La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.

3.6 Experimentación

La experimentación servirá para generar los datos necesarios para la interpretación de resultados, por lo cual es necesario obtener el modelo correcto. Después de la obtención de los datos es posible utilizar algunas herramientas estadísticas para la validación de resultados.

El estudio de un proceso a través de un diseño de experimentos comienza con la determinación de los objetivos del experimento y la posterior selección de los factores del proceso y sus niveles. Se entiende por nivel o tratamiento de un factor al valor que adopta el mismo en cada una de las corridas que forman el diseño de experimentos (Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2008).

En esta parte de la investigación se propone el diseño de experimentos para planear la serie de pruebas que se van a llevar a cabo. Lo que ayudará a identificar cuáles de los factores utilizados y a qué nivel, tiene mayor efecto sobre la variable de respuesta.

3.7 Interpretación de resultados

La función de la interpretación sirve para estudiar los resultados y analizarlos para tomar decisiones, las cuáles serán tomadas en cuenta de acuerdo con lo recolectado en el diseño de experimentos y utilizando las técnicas estadísticas como pruebas de normalidad y análisis de varianza, que serán generadas mediante el software MINITAB para buscar la optimización del modelo.

3.8 Documentación

Esta última etapa de documentación se encargará de plasmar el uso del modelo para facilitar el uso o implementación de la investigación. Por lo cual debe de contener registro de las aplicaciones, documentar los problemas durante su desarrollo, los cambios generados durante la marcha, las decisiones claves que ayudan a mejorar su estudio y las ideas o recomendaciones que puedan ayudar a mejorar en un futuro.

CAPÍTULO 4 CASO DE ESTUDIO

4.1 Definición del sistema

En el modelo siguiente se busca optimizar el trabajo en proceso que fue tomado del libro “Introducción a la investigación de operaciones” de Hillier & Lieberman (2010). El caso número 17.1 “Reducción de inventario en proceso” página (770), tiene como objetivo principal la optimización del trabajo en proceso, donde se analiza desde un enfoque de simulación y diseño de experimentos para encontrar los niveles de trabajo que deben ejercer las máquinas y los operadores.

4.2 Formulación del modelo

En la figura 4.1 se representa el flujo del proceso para la elaboración de alas, que se analiza en el caso de estudio, el cual ayuda a comprender las etapas del proceso que deben realizarse para obtener el producto terminado, incluye desde la llegada del producto al proceso hasta su salida después de la inspección.

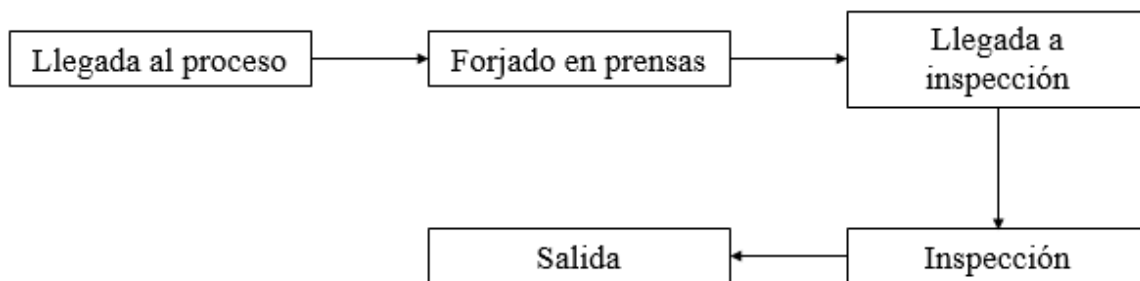


Figura 4. 1. Diagrama de bloques del proceso de elaboración de alas (Fuente: elaboración propia).

4.3 Colección de los datos

Una vez definido el proceso y sus componentes, es necesario conocer cuáles serán tanto llegadas que abastecerán, así como los tiempos necesarios para ejecutar las operaciones de las máquinas. Los datos que se analizan son proporcionados por el mismo problema, los cuales se pueden observar en la tabla 4.1, la cual especifica los tiempos de cada proceso, así como de las llegadas.

Los tiempos para algunos eventos están definidos por distribuciones de probabilidad, también se menciona que las llegadas son partes de metal, que al pasar por la prensa terminan como alas, después pasan al área de inspección para finalmente salir del proceso.

Tabla 4. 1. Colección de datos de los tiempos del proceso (Fuente: elaboración propia).

Proceso	Tiempo
Llegadas al proceso	7 cada hora
Forjado en prensa	Distribución exponencial con media de 60 minutos
Llegadas a inspección	7 cada hora
Inspección	7.5 minutos

Como parte de los datos proporcionados del problema se encuentra en la parte de abajo los valores con los que puede trabajar el proceso; potencia de la prensa con sus tiempos y se respectivo costo por hora; el tipo de inspector es decir que se puede utilizar un inspector que haga su trabajo en 7.2 minutos u otro que lo haga en 7.5 minutos, cada uno de ellos con diferente costo por hora.

A=Potencia de la prensa

- Nivel bajo E (48) minutos costo=\$7.50 por hora
- Nivel intermedio E (60) minutos costo=\$7.00 por hora
- Nivel alto E (72) minutos costo=\$6.50 por hora

B=Inspector

- Nivel bajo 7.2 minutos costo=\$19.00 por hora
- Nivel alto 7.5 minutos costo=\$17.00 por hora

4.4 Implementación del modelo en computadora

El modelo de la figura 4.2 fue elaborado mediante el software ProModel en base a los datos recolectados anteriormente. El modelo contiene una fila donde llega la materia prima, 10 prensas encargadas de procesar la materia prima para crear alas, una fila para alas salidas de la prensa, un inspector y una última área de inspección.

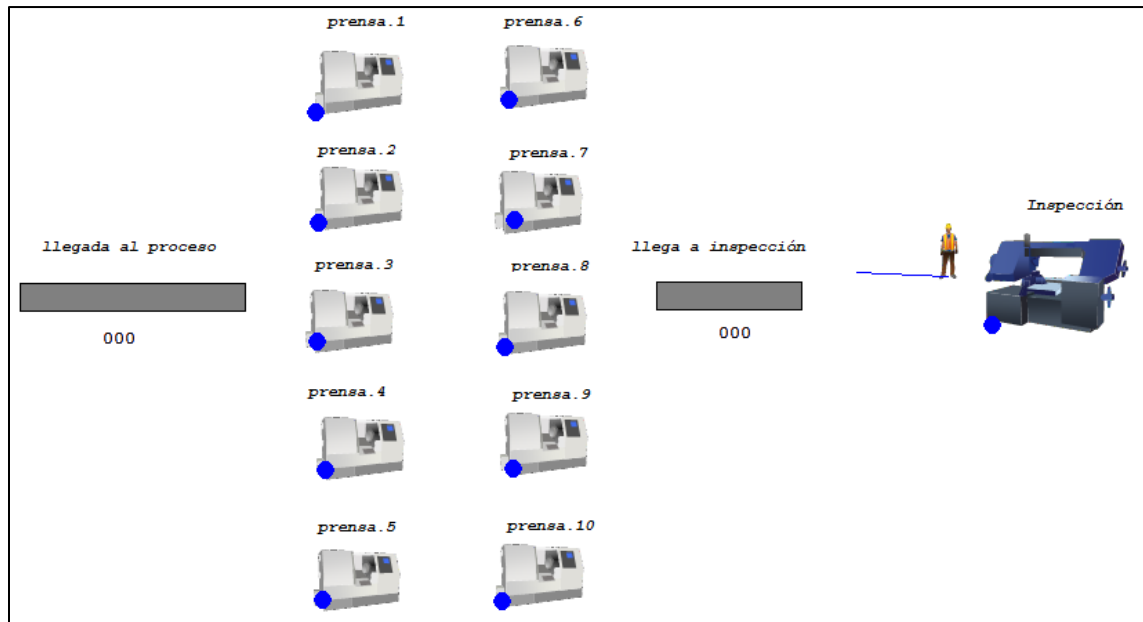


Figura 4. 2. Modelo de simulación en ProModel (Fuente: elaboración propia).

4.5 Validación del modelo

De acuerdo con Herrera & Becerra (2014), el método de la predicción futura es un método utilizado para validar procesos de simulación, el cual se aplicó para analizar los datos de arribos del sistema real del problema de la tabla 4.1 en contraste con el promedio de dos réplicas de entradas por hora del modelo propuesto de la tabla 4.2.

Debido a que se trata de un problema que se obtuvo de la literatura especializada, se aseguró que las entradas en el modelo coincidieran con las entradas del modelo propuesto, además de que se construyeron las entidades, locaciones, arribos y el proceso como lo especifica el problema. Al ser corrido el modelo no se presentaron complicaciones en cuanto a enrutamientos ni arribos fallidos, lo cual es importante para poder recolectar resultados que ayuden con el análisis. Con esto, es posible decir que no hay diferencia significativa entre los valores obtenidos de la simulación y los valores reales proporcionados.

Tabla 4. 2. Llegadas al proceso del sistema simulado (Fuente: elaboración propia).

Escenario	Réplica	Nombre	Tiempo programado (Hr)	Total de entradas	Promedio de entradas (Hr)
Escenario 1	1	Llegada al proceso	8	57	7.125
Escenario 1	2	Llegada al proceso	8	57	7.125
Escenario 1	1	Prensa	80	60	0.75
Escenario 1	2	Prensa	80	61	0.7625
Escenario 1	1	Llegada a inspección	8	54	6.75
Escenario 1	2	Llegada a inspección	8	58	7.25
Escenario 1	1	Inspección	8	55	6.875
Escenario 1	2	Inspección	8	59	7.375

4.6 Experimentación

Una vez construido el modelo es necesario planear los experimentos en base a los niveles de cada factor como se muestra en la tabla 4.2, el diseño es factorial con niveles mixtos debido a que se tiene el factor de inspección a dos niveles y la velocidad de la prensa se encuentra a tres niveles como se mostró en la colección de los datos, la potencia de la prensa expresada con la letra “A” cuenta con tres niveles: bajo, intermedio y alto, que se refiere a la velocidad con la que la prensa puede trabajar. En cuanto a la inspección está definida por la variable “B” que se encuentra en los niveles bajo y alto, debido al tiempo que puede durar cada tipo de inspector en realizar su trabajo. Por lo cual se dice que es un diseño factorial 3 X 2 con niveles mixtos con 6 tratamientos, para tener mejores resultados se proponen dos replicas, por lo que se tendrán 12 corridas experimentales, además de ayudar a obtener mayores grados de libertad para el error y obtener un resultado más certero.

En la tabla 4.3, en las dos últimas columnas se encuentran los datos que facilitarán la creación de escenarios en ProModel mediante Macros, que servirán para obtener los valores de la variable de respuesta, en este caso son: cantidades de trabajo en proceso quien ayudará a calcular el costo por

el tiempo de inventario en proceso y el costo total de la producción. Con la obtención de las combinaciones de la tabla 4.2 y el software ProModel, se crearon dos Macros con los nombres “tiempo de inspección” basada en el tipo de inspector y “tiempo de la prensa” dado por las velocidades que puede tomar la prensa.

Tabla 4. 3. Notación de los tratamientos (Fuente: elaboración propia).

Corrida	Combinación		Combinación real			
	A	B	A	B	Tiempo de la prensa (A)	Tiempo de inspección (B)
1	-1	-1	Bajo	Bajo	48 min	7.2 min
2	-1	+1	Bajo	Alto	48 min	7.5 min
3	0	-1	Intermedio	Bajo	60 min	7.2 min
4	0	+1	Intermedio	Alto	60 min	7.5 min
5	+1	-1	Alto	Bajo	72 min	7.2 min
6	+1	+1	Alto	Alto	72 min	7.5 min

4.7 Interpretación de resultados

Una vez simulados los escenarios se recolectaron los datos arrojados por el software ProModel como se observa en la tabla 4.4, la cual muestra los resultados de la simulación y la réplica de cada escenario durante un periodo de 8 horas. Contiene el total de salidas, la cantidad de material actual (inventario de alas actual), así como el tiempo promedio en el sistema que está dado por la suma de tiempo de espera, tiempo en operación y tiempo de bloqueo.

El objetivo principal de esta investigación se centra en optimizar el trabajo en proceso al mismo tiempo de reducir el costo de producción, por lo que busca optimizar las cantidades de inventario antes de cada estación de trabajo de manera que se minimice el tiempo de espera de las alas sin procesar. El tiempo en el sistema está dado por la suma de la espera, operación y bloqueo como se muestra en la tabla 4.4, al reducir estos indicadores ayudará a cumplir el objetivo de minimizar el trabajo en proceso y minimizar el costo de producción.

Tabla 4. 4. Tiempos del inventario en proceso en el sistema (Fuente: elaboración propia).

Escenario	Material	Total de salidas	Cantidad actual	Tiempo promedio en el sistema	Espera	Operación	Bloqueo
1	Ala	55	0	67.80	8.62	54.20	4.99
1	Ala	58	1	61.08	3.52	53.00	4.56
2	Ala	54	1	71.75	10.94	54.84	5.97
2	Ala	58	1	62.76	4.34	53.30	5.12
3	Ala	52	3	80.84	10.10	65.11	5.63
3	Ala	58	0	78.07	8.12	63.95	6.00
4	Ala	52	3	83.61	12.20	65. 41	6.00
4	Ala	58	0	82.50	11.66	64.25	6.59
5	Ala	51	2	87.54	10.65	69.92	6.97
5	Ala	58	1	101.48	16.56	77.75	7.17
6	Ala	52	2	90.26	13.17	69.66	7.44
6	Ala	56	3	106.03	20.22	78.36	7.45

Como se mencionó anteriormente, debido a que el objetivo es optimizar el inventario en proceso y el costo total de producción, se toman en cuenta los costos del trabajo en proceso (WIP) por hora y los costos de utilizar diferente inspector; como también el costo de trabajar con la prensa a diferentes potencias. Los costos se encuentran especificados en la tabla 4.5.

Tabla 4. 5. Costos aplicados al proceso (Fuente: elaboración propia).

Costos	
Costo de WIP por hora	\$8
Potencia Prensa (A)	
Bajo	\$7.5
Intermedio	\$7
Alto	\$6.5
Inspección (B)	

Bajo	\$19
Alto	\$17

Con ayuda de la tabla 4.4 y 4.5 se plantean las ecuaciones de costos para obtener los valores de las variables de respuesta para una jornada de 8 horas. La ecuación 4.1 representa el costo del trabajo en proceso (WIP). La ecuación 4.2 representa el costo de la mano de obra donde el costo de inspección y de la prensa son multiplicados por 8, debido al total de horas de la jornada de trabajo que se analiza. En la ecuación 4.3 se representa el costo total de producción la cual expresa la suma los costos de mano de obra y WIP.

$$t * (r + s) * x = u \tag{4.1}$$

$$z * 8 + y * 8 = v \tag{4.2}$$

$$u + v = w \tag{4.3}$$

Donde:

r= total de salidas

s= cantidad actual de material

t= tiempo promedio en el sistema

u= costo de WIP

v= costo de mano de obra

w= costo total de producción

x= costo de WIP por hora

y= costo por potencia de la prensa

z= costo de inspección

Los resultados obtenidos de la simulación son convertidos a costos mediante las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 dados en la tabla 4.6, donde se pueden observar las variables de respuesta “costo de WIP” y “Costo de producción total” que se analizaran mediante el diseño de experimentos. En cuanto a las variables de respuesta de la columna de “costo de la mano de obra” fue utilizada para generar el “costo de producción total”.

Tabla 4. 6. Costo WIP, mano de obra y producción por escenario (Fuente: elaboración propia).

Escenario	Costo de WIP (\$)	Costo de la mano de obra (\$)	Costo de producción total (\$)
1	497.2	212	709.2
2	526.166	196	722.166
3	592.826	208	800.826

4	613.14	192	805.14
5	618.616	204	822.616
6	649.872	188	837.872
7	480.496	212	692.496
8	493.712	196	689.712
9	603.741	208	811.741
10	638.00	192	830.00
11	798.309	204	1002.309
12	834.102	188	1022.102

Una vez obtenido los resultados es importante asegurarse de que estos sean útiles para realizar el diseño de experimentos. Los métodos estadísticos se utilizan para analizar los datos, procurando que los resultados y las conclusiones sean objetivos (Izarbe et al., 2007). Debido a esto será necesario aplicar una prueba de normalidad a las variables de respuestas como lo muestran Garza (2013) y Pérez, Arango & Agudelo (2009) donde la regla de normalidad es que si p-value es mayor a 0.05 con un nivel de confianza del 95%, entonces los datos son normales. En este caso se puede observar en las figuras 4.3 y 4.4 que se tiene un p-value de 0.133 y 0.059 respectivamente con que se confirma que los datos están dentro del rango de normalidad.

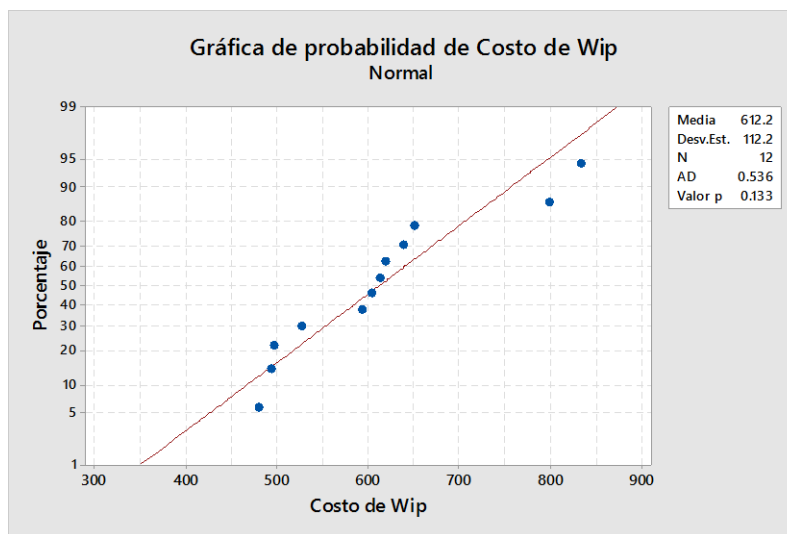


Figura 4. 3. Gráfica de probabilidad de costo de WIP (Fuente: elaboración propia).

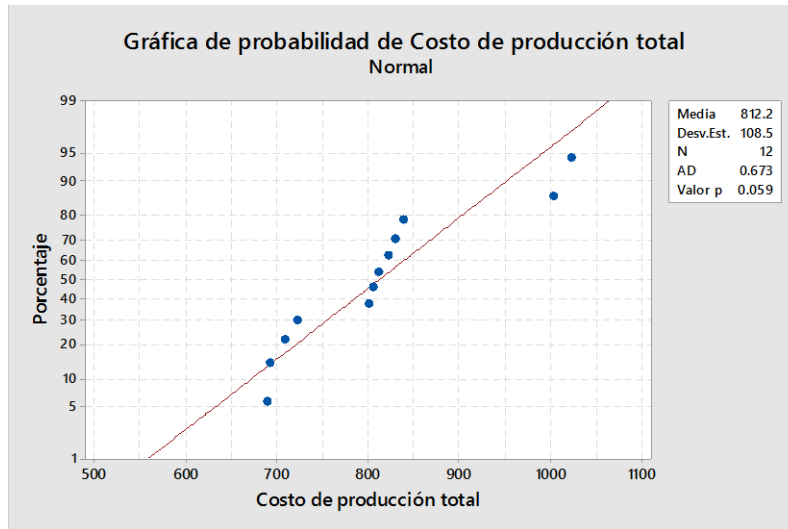


Figura 4. 4. Gráfica de probabilidad de costo de producción total (Fuente: elaboración propia).

Una vez obtenidos los datos y comprobada su normalidad, fue utilizado el software MINITAB como herramienta para aplicar el diseño de experimentos. Al analizar un diseño factorial con niveles mixtos fue necesario ingresarlo como un diseño factorial completo general con 2 factores, donde el tiempo de la prensa toma tres niveles (48 min, 60 min, 72 min) y el tiempo de inspección a dos niveles (7.2 min, 7.5 min), recordado que se toman en cuenta 2 réplicas. En la tabla 4.7 se muestra el diseño factorial completo que se analizó mediante el software.

Tabla 4. 7. Diseño factorial completo del experimento (Fuente: elaboración propia).

Orden Estándar	Orden Corrida	Tiempo de la prensa	Tiempo de inspección	Costo de WIP (\$)	Costo de mano de obra (\$)	Costo de producción total (\$)
1	1	48	7.2	497.2	212	709.2
2	2	48	7.5	526.166	196	722.166
3	3	60	7.2	592.826	208	800.826
4	4	60	7.5	613.14	192	805.14
5	5	72	7.2	618.616	204	822.616
6	6	72	7.5	649.872	188	837.872
7	7	48	7.2	480.496	212	692.496

8	8	48	7.5	493.712	196	689.712
9	9	60	7.2	603.741	208	811.741
10	10	60	7.5	638.00	192	830.00
11	11	72	7.2	798.309	204	1002.309
12	12	72	7.5	834.102	188	1022.102

El análisis de varianza (ANOVA) ayuda a identificar la importancia de cada uno de los factores y las interacciones mediante los efectos de cada una de las variables, con lo que se puede definir qué factores son significativos (Ekren & Ornek, 2008) y (Eswaran, Sivakumar, & Subramaniyan, 2018). En el ANOVA del costo de WIP se puede apreciar que el factor con mayor significancia en el modelo es el tiempo de la prensa.

Se analizó el Valor p (p-value) tomado en cuenta un nivel de confianza del 95%, por lo que un valor de P menor a 0.05 significa que este factor es importante para el modelo. Tomando en cuenta el nivel de confianza del 95% en la tabla 4.8, se puede concluir que el único valor significativo en el modelo es el tiempo de la prensa. En la tabla 4.8 también se puede observar que la $R^2=75.34\%$ se refiere a que los factores significativos dentro del ANOVA explican el modelo en un 75.34%.

Tabla 4. 8. Análisis de varianza del costo de WIP (Fuente: elaboración propia).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	104313	20862.6	3.67	0.073
Lineal	3	104236	34745.3	6.10	0.030
Tiempo de la prensa	2	102000	51000.0	8.96	0.016
Tiempo de inspección	1	2236	2236.0	0.39	0.554
Interacciones de 2 términos	2	77	38.6	0.01	0.993
Tiempo de la prensa*	2	77	38.6	0.01	0.993
Tiempo de inspección					
Error	6	34150	5691.7		

Total	11	138463							
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: left;">S= 75.4432</td> <td style="text-align: left;">R² = 75.34%</td> <td style="text-align: left;">R² adj= 54.78%</td> <td style="text-align: left;">R² pred= 1.35%</td> <td></td> </tr> </table>					S= 75.4432	R ² = 75.34%	R ² adj= 54.78%	R ² pred= 1.35%	
S= 75.4432	R ² = 75.34%	R ² adj= 54.78%	R ² pred= 1.35%						

Al analizar el ANOVA el costo de producción total en la tabla 4.9 se puede decir que el valor con mayor efecto es el tiempo de la prensa al presentar el valor más alto de los efectos, además se analizó el valor P en el cual se nota que el único valor significativo dentro del modelo para el costo de producción total es el tiempo de la prensa al ser un valor menor a 0.05 según el nivel de confiabilidad utilizado. En la tabla 4.9 se puede observar que la R²=73.63% que se refiere a que los factores significativos dentro del ANOVA explican el modelo en un 73.63%.

Tabla 4. 9. Análisis de varianza del costo de producción total (Fuente: elaboración propia).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p					
Modelo	5	95362	19072.4	3.35	0.087					
Lineal	3	95284	31761.5	5.58	0.036					
Tiempo de la prensa	2	94901	47450.7	8.34	0.019					
Tiempo de inspección	1	383	383.1	0.07	0.804					
Interacciones de 2 términos	2	77	38.6	0.01	0.993					
Tiempo de la prensa*	2	77	38.6	0.01	0.993					
Tiempo de inspección										
Error	6	34150	5691.7							
Total	11	129512								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: left;">S= 75.4432</td> <td style="text-align: left;">R² = 73.63%</td> <td style="text-align: left;">R² adj= 51.66%</td> <td style="text-align: left;">R² pred= 0.00%</td> <td></td> </tr> </table>						S= 75.4432	R ² = 73.63%	R ² adj= 51.66%	R ² pred= 0.00%	
S= 75.4432	R ² = 73.63%	R ² adj= 51.66%	R ² pred= 0.00%							

Optimización del modelo

Para la parte de optimización se realizó con las herramientas del software MATLAB “optimización de respuesta” obteniendo los resultados de la figura 4.5 donde se puede observar que el modelo se

Conclusiones

La serie de pasos aplicados en la metodología elaborada mediante diseño de experimentos y simulación discreta facilitaron la elaboración y análisis del modelo, así como la obtención y análisis de los resultados finales, con lo que se puede decir que la metodología empleada en el presente artículo fue capaz de reducir el inventario en proceso y por consiguiente el costo de WIP y el costo de producción total.

La utilización de la simulación discreta mediante el software ProModel fue parte fundamental de la investigación al ayudar a la construcción del modelo a computadora y a la obtención de las variables de respuesta que sirvieron para el análisis del diseño de experimentos.

La aplicación de software MINITAB fue necesaria para aplicar pruebas estadísticas y realizar el diseño de experimentos para facilitar el análisis del ANOVA, en el que se agregaron los factores A (tiempo de la prensa), B (tiempo de inspección) e interacción AB. Se obtuvieron resultados con los que se pueden concluir que el único valor significativo en el proceso es el tiempo de la prensa, al ser analizado con un nivel de confianza (p-value) del 95% y resultar que el único valor por debajo del .05 dentro del ANOVA.

Se puede concluir que la metodología empleada fue capaz de cumplir el objetivo de optimizar el trabajo en proceso, con la simulación y los resultados de la tabla 4.4 se observa que el tiempo del inventario en proceso dado por los tiempos de espera, operación y bloqueo del escenario 1 y su réplica llegan a ser menor que en los escenarios 2,3,4,5 y 6, debido a esto en la tabla 4.6 se puede apreciar que según los tiempos es como aumenta el costo de WIP y el costo de producción total.

Se logró optimizar los costos de WIP y los costos de producción total al conocer los niveles de cada factor, donde el tiempo de la prensa debe de estar en 48 minutos y el tiempo de inspección debe de estar en 7.2 minutos. El factor con mayor impacto para el inventario en proceso y los costos, es el tiempo de la prensa con lo cual se puede decir que en el caso de querer reducir aún más el inventario en proceso y los costos lo primero que se debería de realizar es disminuir el tiempo de la prensa.

Bibliografía

- Adeyemi, B. (2015). *A cross - disciplinary systematic literature review on Kanban*. University of Oulu.
- Badii, M. H., Castillo, J., Rodríguez, M., Wong, A., & Villalpando, P. (2007). Diseños experimentales e investigación científica (Experimental designs and scientific research). *InnOvaciOnes de NegOciOs*, 4(2), 283–330. <https://doi.org/10.1665-9627>
- Barceló, J. (1996). *Simulacion De Sistemas Discretos* (Isdefe). Madrid, España.
- Bernal, M. E., Cock, G., & Rastrope, J. H. (2015). Productividad en una celda de manufactura flexible simulada en promodel utilizando path networks type crane. *Tectura*, 19(44), 133–144. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a10>
- Blanco, L. E., Romero, E., & Páez, J. A. (2006). Conwip un sistema de control de producción. *Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, (June), 21–27. Retrieved from http://www.cse.fau.edu/~maria/laccei/Papers/EDU063_Blanco.pdf
- Bolaños, O. (2014). *Importancia de la simulación en la mejora de procesos*. Universidad nacional autónoma de México. <https://doi.org/10.1063/1.1497462>
- Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Cooper, M. B. (2007). *Administración y logística en la cadena de suministros*. México, D.F: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cardona, D., Forero, J. D., Cardona, L. F., & Rivera, L. (2012). El WIP como objetivo estratégico en la distribución de planta. *Ingenium*, 6(14), 23. <https://doi.org/10.21774/ing.v6i14.190>
- Ceballos, J. A., Restrepo, E. D., & Fernández, J. D. (2013). Aplicación De Un Modelo De Simulación Discreta En El Sector Del Servicio Automotor. *Revista Ingeniería Industrial UPB*, 01(01), 51–61. Retrieved from <https://revistas.upb.edu.co/index.php/industrial/article/download/2308/2058>
- Chakraborty, T., Giri, B. C., & Chaudhuri, K. S. (2007). Production lot sizing with process deterioration and machine breakdown. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 606–618. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.011>
- Chase, R. B., & Jacobs, F. R. (2014). *Administración de operaciones producción y cadena de suministros* (Vol. 3). México, D.F: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chen, L., & Meng, B. (2014). The Application of Value Stream Mapping Based Lean Production System. *International Journal of Business and Management*, 5(6), 203–209.

<https://doi.org/10.5539/ijbm.v5n6p203>

- Correa González, F. (2014). Manufactura Esbelta (Lean Manufacturing). Principales Herramientas. *Revista Panorama Administrativo*, (2), 85–112.
- Corredor, I. A. (2015). *Sin identificación de los 7 desperdicios no hay lean*. Universidad nacional autónoma de México. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7710/Tesis.pdf>
- Coss, R. (2002). *Simulación un enfoque práctico*. México, D.F: Limusa Noriega Editores.
- Costa, E., Sousa, R., Bragança, S., & Alves, A. (2013). An industrial application of the smed methodology and other lean production tools. In *Integrity, Reliability and Failure of Mechanical Systems* (Vol. 1, pp. 1–8). Retrieved from http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/25314/1/2013_Costa_et_al_SMED.pdf
- Cristina, A., Carvalho, V. De, & Granja, A. D. (2017). A Systematic Literature Review on Integrative Lean and Sustainability Synergies over a Building ' s Lifecycle. *Sustainability (Switzerland)*, 9, 1156–1173. <https://doi.org/10.3390/su9071156>
- Dinas, J. A., Franco, P., & Rivera, L. A. (2009). Aplicación de herramientas de pensamiento sistémico para el aprendizaje de Lean Manufacturing. *Sistemas & Telemática*, 7(14), 109–144. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/4115/411534381003.pdf>
- Doncel, C., & Torres, M. L. (2005). Comparación del desempeño de los simuladores arena y promodel en un modelo de producción. In *Advances in Engineering and Technology: A Global Perspective* (pp. 1–7). Cartagena, Colombia.
- Ekren, B. Y., & Ornek, A. M. (2008). A simulation based experimental design to analyze factors affecting production flow time. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(3), 278–293. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2007.11.016>
- Eswaran, P., Sivakumar, K., & Subramaniyan, M. (2018). Minimizing error on circularity of FDM manufactured part. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6675–6683. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.324>
- Fullana, C., & Urquía, E. (2014). Simulation models: A multidisciplinary investigation tool, 1–11. Retrieved from http://www.encuentros-multidisciplinares.org/Revistanº32/Carmen_Fullana_Belda_y_Elena_Urquía_Grande.pdf
- García, E., García, H., & Cárdenas, L. E. (2013). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*.

- México, D.F: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Garza, J. (2013). Aplicacion de diseno de experimentos para el analisis de secado de un producto (Experiment design application for analysis of the drying a product). *Innovaciones de Negocios*, 10(1), 145–158. Retrieved from http://www.web.facpya.uanl.mx/rev_in/Revistas/10/A7.pdf
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México, D.F: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Heizer, J., & Render, B. (2009). *Principios de administración de operaciones*. Pearson Educación. (Séptima ed). México, D.F: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Herrera, O. J., & Becerra, L. A. (2014). Diseño general de las etapas de simulación de procesos con énfasis en el análisis de entrada. In *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology* (p. 10). Guayaquil, Ecuador. Diseño: Excellence in Engineering To Enhance a Country's Productivity. Retrieved from <http://www.laccei.org/LACCEI2014-Guayaquil/RefereedPapers/RP152.pdf>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (novena edi, Vol. 3). México, D.F: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Iizarbe, L., Tanco, M., Viles, E., & Álvarez, M. J. (2007). El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta. *Tecnura*, 10, 127–138. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021012011>
- Jayaprakash, J., Kumar, K. M., & Ambedkar, P. (2015). Simulation of Mixed Model Assembly Line Sequencing Using Pro-Model Software. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10, 854–856.
- Jiang, J., & Rim, S. (2017). Strategic WIP Inventory Positioning for Make-to-Order. In E. Jiménez (Ed.), *Mathematical Problems in Engineering* (pp. 1–7). Republic of Korea: Jingjing Jiang and Suk-Chul Rim. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2017/8635979>
- Kang, C. W., Ullah, M., & Sarkar, B. (2017). Human errors incorporation in work-in-process group manufacturing system. *Scientia Iranica*, 24(4), 2050–2061.
- Kim, T., & Choi, B. K. (2014). Simulation Modelling Practice and Theory Production system-based simulation for backward on-line job change scheduling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 40, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2013.08.003>

- Ledoux, S., Luz, G., & Morosini, E. (2018). Simulation-based analysis of inventory strategies in lean supply chains. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1453–1458. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.310>
- Lin, Q., Liu, L., Wang, D., & Li, Y. (2015). Process Optimization for Operating Room Base on Pro-Model. In *Proceedings of the 2015 IEEE IEEM There* (pp. 1332–1336). Shanghai, China.
- Menéndez, G., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2008). Los Diseños de Experimentos y la Tecnología del Hormigón. *Revista de La Construcción*, 7(1), 94–104.
- Montgomery, D. C. (2017). *Diseño y análisis de experimentos* (Segunda ed, Vol. 46). México, D.F: Editorial Limusa, S.A. de C.V. <https://doi.org/10.1080/00224065.2014.11917962>
- Mukhopadhyay, S. K., & Shanker, S. (2005). Kanban implementation at a tyre manufacturing plant: A case study. *Production Planning and Control*, 16(5), 488–499. <https://doi.org/10.1080/09537280500121778>
- Olaitan, O., & Quan, E. (2017). Work In Process control for a high product mix manufacturing system. *Procedia CIRP*, 63, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.352>
- Paredes, L. A., & Penagos, J. P. (2012). *Análisis del impacto del control de la carga de trabajo sobre la cadena de suministro considerando el lead time*. Universidad del valle.
- Pérez, G., Arango, M. D., & Agudelo, Y. (2009). Aplicación del diseño de experimentos para el análisis del proceso de doblado. *Revista EIA*, 11, 145–156.
- Pergher, I., & Vaccaro, G. L. R. (2013). Work in process level definition: a method based on computer simulation and electre tri. *Production*, 24(3), 536–547. <https://doi.org/10.1590/s0103-65132013005000067>
- Pourvaziri, H., & Pierreval, H. (2017). Dynamic facility layout problem based on open queuing network theory. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.011>
- Quesada, H., Buehlmann, U., & Arias, E. (2012). Pensamiento Lean : Ejemplos y Aplicaciones en la Industria de Productos de Madera. *Virginia State University*, 1–17. <https://doi.org/10.1002/elps.201000063>
- Rahani, A. R., & Al-Ashraf, M. (2012). Production flow analysis through Value Stream Mapping: A lean manufacturing process case study. *Procedia Engineering*, 41(Iris), 1727–1734. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.375>
- Ruiz, J. M. (1998). La Simulación como Instrumento de Aprendizaje. *Revista ADIE*, 11, 1–18.

- Salazar, J. C., & Baena Zapata, A. (2009). Análisis y Diseño de Experimentos Aplicados a Estudios de Simulación. *Dyna*, 76(159), 249–257. Retrieved from http://www.udea.edu.co/portal/page/portal/bibliotecaSedesDependencias/unidadesAcademicas/FacultadMedicina/BibliotecaDiseno/Archivos/jornadas3/a-d/analisis_y_diseño_de_experimentos_aplicados_a_estudios_de_simulacion.PDF
- Sanchez, P. A., Ceballos, F., & Torres, G. S. (2015). A dressmaking factory production process analysis modeling and simulation. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 137–150. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18359/rcin.1436>
- Sugimori, Y., Kusunoki, K., Cho, F., & Uchikawa, S. (2007). Toyota production system and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15(6), 553–564. <https://doi.org/10.1080/00207547708943149>
- Sundar, R., Balaji, A. N., & SatheeshKumar, R. M. (2014). A review on lean manufacturing implementation techniques. *Procedia Engineering*, 97, 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.341>
- Takeda, S. L., Tortorella, G. L., & Frazzon, E. M. (2018). Simulation-based analysis of inventory strategies in lean supply chains. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1453–1458. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.310>
- Teresa, M., Jiménez, J. A., Medina, J. M., & Melchor, M. Á. (2015). Análisis del Estado del Arte de Empresas que Utilizan el Sistema Kanban en sus Cadenas de Suministro. In *Academia Journals Celaya* (pp. 5647–5652). Celaya, Guanajuato, México: Copyright Academia Journals 2015 Celaya,.
- Valenzuela, J., & Palacios, J. (2014). Reducir el tiempo de preparación utilizando el sistema SMED en una máquina de producción por medio de la metodología DMAIC. In *Ingeniería Vertice 2010* (pp. 13–24). Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
- Villaseñor, A., & Galindo, E. (2007). *Manual lean manufacturing*. México, D.F.: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (2012). *Probabilidad y estadísticas para ingeniería y ciencias* (novena edi). México, D.F.: Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Wang, C., Huang, Y., Le, T., & Ta, T. (2016). An Innovative Approach to Enhancing the Sustainable Development of Japanese Automobile Suppliers. *Sustainability (Switzerland)*, 8,

420–439. <https://doi.org/10.3390/su8050420>