



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**  
en Celaya



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO EN CELAYA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“ANÁLISIS DE COSTOS DE INVENTARIO DE TRABAJO  
EN PROCESO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN  
APLICANDO ESCENARIOS DE SIMULACIÓN”**

**TESIS PROFESIONAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PRESENTA:  
ING. DIANA FABIOLA GUERRERO GONZÁLEZ**

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

**CO-DIRECTOR DE TESIS:  
M.C. MOISÉS TAPIA ESQUIVIAS**

**CELAYA, GTO., MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2019**



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

**Asunto: Autorización de impresión de trabajo profesional.**

Celaya Gto.,

**09 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:

**“ANÁLISIS DE COSTOS DE INVENTARIO DE TRABAJO EN PROCESO EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN APLICANDO ESCENARIOS DE SIMULACIÓN”**

Presentado por el (a) pasante **C. ING. DIANA FABIOLA GUERRERO GONZALEZ (M1703077)** 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

**A T E N T A M E N T E**

**DR. SALVADOR HERNANDEZ GONZALEZ**  
Secretario



**M.C VICENTE FIGUEROA FERNANDEZ**  
Vocal

SECRETARIA DE  
EDUCACION PUBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL  
DE MEXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
DE CELAYA  
COORDINACION DE MAESTRIA  
DE INGENIERIA INDUSTRIAL

**M.C. MANUEL DARIO HERNANDEZ RIPALDA**  
Vocal Suplente

Ccp. Escolares  
Archivo.  
VFF\*MTE\*dmvp



## **Resumen**

En este trabajo se presenta un análisis de costos de los materiales que están en una fila esperando ser procesados, mejor conocido como inventario de trabajo en proceso (WIP, por sus siglas en inglés). El costo de inventario en proceso se analizó con tres métodos: 1. Un sistema de líneas de espera, 2. Lean Accounting y 3. Simulación de eventos discretos que ayuda a medir los beneficios de Lean Accounting, aplicando una función objetivo para determinar el costo mínimo de WIP. Esto se obtuvo aplicando una herramienta clave llamada Simrunner incluida en el software promodel. Para llegar al objetivo principal, determinar el costo mínimo de WIP, se estableció una estructura de desglose de costos en cada etapa del proceso.

Después de la revisión de la literatura especializada, no se ha encontrado por el momento investigaciones recientes que muestren de manera detallada y práctica la forma de identificar los costos relacionados al WIP, se realice un análisis de este y así mismo vaya enfocado a Lean. El presente trabajo es de interés para los administradores, responsables del equipo Lean y útil para la toma de decisiones a corto plazo.

## **Abstract**

In this research work an analysis of costs of the materials appears that are in a queue to be process it is presented, well-known like work in process inventory. The inventory in process was analyzed with three methods: 1. A system waiting lines. 2. Lean Accounting and 3. Simulation of discreet events which helps to measure the benefits of Lean Accounting, establishing strategies applying an objective function to determine the minimum cost of WIP. This was obtained applying a key tool called Simrunner included in the Promodel software. Also a structure of removal of costs in each stage of the process settled down. After the review of the specialized literature. At the moment no recent research has been found that shows in a detailed and practical way to identify costs related to WIP, an analysis of this is made and go focused on Lean. The present work is of interest to the administrators and managers of the Lean team and useful for short-term decision making.

## Índice de contenido

1	Marco de referencia.....	1
1.1	Introducción.....	1
1.2	Antecedentes.....	2
1.3	Planteamiento del problema.....	4
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	Objetivo general.....	4
1.4.2	Objetivos específicos.....	4
1.5	Hipótesis.....	5
1.6	Justificación.....	5
1.7	Alcances.....	6
1.8	Limitaciones.....	6
2	Marco teórico.....	7
2.1	Sistemas de producción.....	7
2.2	Lean Accounting.....	7
2.2.1	Ventajas y desventajas de implantar Lean Accounting.....	8
2.2.2	Value Stream Cost Analysis (VSCA):.....	9
2.3	Costos.....	10
2.3.1	Costos relacionados con la cadena de flujo de valor.....	11
2.4	Costo total de manufactura de un producto.....	13
2.4.1	Determinación algebraica: Costo directamente e inversamente proporcional...	14
2.5	Flujos de costo de una compañía manufacturera.....	14
2.6	Clasificación de costos para predecir el comportamiento del costo.....	15
2.7	Administración y control de inventarios.....	15
2.8	Inventarios.....	16
2.9	Modelos de inventarios.....	17
2.10	Simulación.....	18
2.10.1	Clasificación de los sistemas.....	18
2.11	Líneas de espera.....	23

2.11.1	Costos relacionados a un sistema de líneas de espera .....	26
2.11.2	Sistemas M/M/1.....	26
2.11.3	Modelo M/M/s.....	29
2.12	Redes de líneas de espera.....	30
2.13	Optimización.....	31
2.14	Optimización y simulación .....	31
2.15	Diseño y análisis de experimentos.....	33
2.16	Estado del arte.....	35
3	Método .....	44
3.1	Establecer sistema de producción a modelar .....	44
3.2	Definición del problema .....	44
3.3	Construcción del modelo de simulación.....	45
3.4	Elaboración del VSCA del proceso .....	45
3.5	Experimentación .....	46
4	Resultados .....	47
4.1.1	Establecer sistema de producción a modelar.....	47
4.1.2	Definición del problema.....	48
4.1.3	Modelo de simulación .....	48
4.1.4	Elaboración de VSCA del proceso.....	56
4.1.5	Analizar capacidad .....	57
4.1.1	Experimentación.....	65
4.1.2	Conclusiones .....	71
	Referencias .....	73

## Índice de figuras

Figura 2.1 Proceso de análisis de costos de flujo de valor. Fuente: (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011) .....	9
Figura 2.2 Costos incluidos en el VSCA. Fuente: (Ruiz de Arbulo & Díaz de Basurto, 2008).....	11
Figura 2.3 Flujo de costos en una empresa manufacturera. Fuente: Elaboración propia .....	15
Figura 2.4 Tipos principales de modelos de inventario. Fuente: Elaboración propia .....	18
Figura 2.5 Elementos de un sistema. Fuente: (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003) .....	19
Figura 2.6 Etapas del proceso de construcción del modelo. Fuente: (Hillier & Liberman, 2010).....	21
Figura 2.7 Componentes de un sistema de líneas de espera. Fuente: (Rama, 2007).....	24
Figura 2.8 Sistema de líneas de espera. Fuente: (Bronson, 1998).....	25
Figura 2.9 Representación de una red de Jackson. Fuente: (Feldman & Valdez-Flores, 2010).....	31
Figura 2.10 Relación entre algoritmo de optimización y modelo de simulación. Fuente: (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003).....	32
Figura 2.11 Proceso para estudiar el desempeño de sistemas (Douglas, 2001) .....	34
Figura 3.1 Pasos para el desarrollo de la investigación. Fuente: Elaboración propia .....	44
Figura 3.2 Pasos del proceso VSCA. Fuente: (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011).....	45
Figura 4.1 Red del sistema. Fuente: (Cabrera, 2009) .....	47
Figura 4.2 Descripción de locaciones. Fuente: elaboración propia.....	49
Figura 4.3 Descripción de las entidades. Fuente: elaboración propia. ....	50
Figura 4.4 Tiempos muertos en las locaciones. Fuente: elaboración propia.....	50
Figura 4.5 Rutas de los recursos. Fuente: elaboración propia.....	50
Figura 4.6 Descripción de interfases. Fuente: elaboración propia. ....	51
Figura 4.7 Descripción de recursos. Fuente: elaboración propia. ....	51
Figura 4.8 Descripción del proceso sin tiempos muertos. Fuente: Elaboración propia. ....	52
Figura 4.9 Descripción del proceso con tiempos muertos. Fuente: elaboración propia.....	53
Figura 4.10 Descripción de las llegadas. Fuente: elaboración propia.....	54
Figura 4.11 Resultados de prueba de hipótesis. Fuente: elaboración propia.....	55
Figura 4.12 Número de réplicas para modelo de simulación. Fuente: elaboración propia ..	56

## Índice de tablas

Tabla 2.1 Estado del arte. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 4.1 Datos del sistema simulado. Fuente: elaboración propia. ....	49
Tabla 4.2 Demanda mensual por tipo de pieza y rutas del proceso. Fuente: elaboración propia.....	49
Tabla 4.3 Frecuencias observadas. Fuente: elaboración propia. ....	54
Tabla 4.4 Operación y número de trabajadores en el sistema de producción. Fuente: elaboración propia.....	57
Tabla 4.5 Resumen operativo actual sin tiempos muertos. Fuente: elaboración propia. ....	57
Tabla 4.6 Resumen operativo actual con tiempos muertos. Fuente: elaboración propia ....	58
Tabla 4.7 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del proceso. Fuente: elaboración propia.....	59
Tabla 4.8 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza a. Fuente: elaboración propia.....	59
Tabla 4.9 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza b. Fuente: elaboración propia.....	59
Tabla 4.10 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza c. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 4.11 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza d. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 4.12 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza e. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 4.13 Precio de venta para cada tipo de pieza. Fuente: elaboración propia. ....	61
Tabla 4.14 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza a. Fuente: elaboración propia. ....	62
Tabla 4.15 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza b. Fuente: elaboración propia. ....	62
Tabla 4.16 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza c. Fuente: elaboración propia. ....	63
Tabla 4.17 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza d. Fuente: elaboración propia. ....	63

Tabla 4.18 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza e. Fuente: elaboración propia. ....	64
Tabla 4.19 Variables para el sistema de producción simulado propuestas por Simrunner. Fuente: elaboración propia. ....	66
Tabla 4.20 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza a. Fuente: elaboración propia. ....	67
Tabla 4.21 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza b. Fuente: elaboración propia. ....	67
Tabla 4.22 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza c. Fuente: elaboración propia. ....	68
Tabla 4.23 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza d. Fuente: elaboración propia. ....	68
Tabla 4.24 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza e. Fuente: elaboración propia. ....	69
Tabla 4.25 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia. .....	70
Tabla 4.26 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia. .....	70
Tabla 4.27 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia	70
Tabla 4.28 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia. .....	71
Tabla 4.29 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia	71



### 1 Marco de referencia

#### 1.1 Introducción

En el siglo XXI la competencia global está obligando a todas las empresas a ser mucho más eficientes en sus sistemas de producción para poder mantenerse en el mercado, lo cual resulta de vital importancia en el mundo de los negocios. Es así como la reducción de costos y desperdicios se vuelve un elemento crítico para las organizaciones que buscan permanecer y seguir a la vanguardia (Espinoza, Madrid, & Gamboa, 2015).

La aplicación de la filosofía Lean Accounting permitirá gestionar con gran éxito retos relacionados con los costos y nivel de entrega. El principal objetivo de esta filosofía es la eliminación o reducción de los “desperdicios”. Dentro de estos desperdicios se encuentran los inventarios de trabajo en proceso (WIP, por sus siglas en inglés) que incrementan los costos por área, se pueden volver obsoletos y se pierde flexibilidad del proceso.

Grandes cantidades de trabajo innecesario, recopilación y análisis de datos, producción de informes inútiles y generación de tareas adicionales que no agregan valor son razones negativas relacionadas con las deficiencias del sistema tradicional de contabilidad y control. Requieren urgentemente un nuevo sistema de contabilidad que pueda resolver los problemas que enfrentan la mayoría de las empresas. La idea emergente de Lean Accounting ha materializado esta tarea (Arora, 2016).

Actualmente, muchas empresas en todo el mundo están interesadas en Lean Accounting porque es una filosofía que promete importantes mejoras en términos de productividad, flexibilidad, entrega a tiempo y reducción de costos (López, 2008). Además, Erkman (2016) menciona que el proceso de contabilidad Lean no solo se refiere a la implementación de principios Lean, sino que también apunta al enfoque de gestión Lean. Por lo tanto, este enfoque solo puede lograrse a través de esta filosofía.

Vrat (2014) menciona que los costos estimados son insumos relevantes para los modelos de toma de decisiones y por lo tanto es importante que estos sean estimados apropiadamente. Estos costos son específicos de la situación y pueden ser diferentes para diferentes artículos, incluso para la misma organización, dependiendo de la naturaleza del artículo.

## CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA

Una preocupación muy importante en la gestión de la producción y el desarrollo del sistema es reconocer los factores perturbadores de un sistema de producción particular con el fin de descubrir las acciones adecuadas para mejorar su rendimiento general (Bernedixen, Pehrsson, & Antonsson, 2015). Sin embargo, formular un problema donde se puedan analizar los factores críticos en el mundo real puede resultar propensa a errores que pueden prohibir que las empresas manufactureras se beneficien, estos errores se pueden evitar haciendo experimentos por medio de simulación.

Un área donde la simulación está encontrando una mayor aplicación es en el diseño y mejora del sistema de fabricación y servicio. Su capacidad única para predecir con precisión el rendimiento de sistemas complejos lo hace ideal para la planificación de sistemas. La simulación del sistema reduce el riesgo de tener sistemas que operan ineficazmente o que no cumplen con los requisitos mínimos de desempeño (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003).

En esta investigación se propone desarrollar escenarios de simulación de eventos discretos como una alternativa para estudiar detalladamente los procesos aplicando un enfoque en la literatura especializada e identificar el efecto y la variabilidad de los productos procesados terminados que hay en él. Adicionalmente, aplicar un análisis económico relacionado al inventario de trabajo en proceso para proponer un nivel de dicho inventario que minimice sus costos.

### **1.2 Antecedentes**

Finalizada la segunda guerra mundial, los japoneses sorprendieron al mundo con productos de excelente calidad y bajos precios, acaparando el interés de sus competidores en conocer el secreto de sus sistemas de producción. Este radicaba más en la sencillez que en la complejidad y respondía a las condiciones socio-culturales y naturales de Japón. Los sistemas de producción no usaban complicados algoritmos de optimización ni sistemas sofisticados de computación, sino reglas muy claras para el manejo de los inventarios. Sin embargo, el mundo occidental tardó varias décadas en comprender cuál era el verdadero núcleo de su secreto: el control de los inventarios (Blanco, Romero, & Páez, 2006).

## CAPÍTULO 1 MARCO DE REFERENCIA

La importancia del control de inventarios en los negocios aumentó drásticamente con el aumento de las tasas de interés de los años 70. Era la hora liberar el capital operativo excedente inmovilizado en inventarios excesivos y utilizar la liquidez resultante para financiar nuevas inversiones. Desafortunadamente, los expertos en control de inventarios y los desarrolladores de aplicaciones de software seguían caminos separados. Por lo tanto, la oportunidad de encontrar las mejores soluciones, utilizando los potenciales combinados de la teoría, el análisis de problemas y la experiencia, no fue explotada (Bartmann & Beckmann, 1992).

Las empresas manufactureras están operando en un mercado global severamente competitivo, lo que les exige urgentemente explorar nuevos métodos para mejorar el desempeño de sus sistemas de producción a fin de mantener su competitividad. En cuanto al rendimiento de un sistema de producción, no es suficiente detectar qué operaciones mejorar, pero es obligatorio identificar las acciones correctas en el orden correcto para evitar desperdicios en tiempo y costo (Pehrsson & Bernedixen, 2016). Todas las instalaciones de producción tienen algunas limitaciones y se están realizando muchos estudios y muchos esfuerzos para minimizar las limitaciones y mejorar las capacidades de producción con un alto nivel de calidad a un costo mínimo (Ulla & Thajudeen, 2016).

En nuestro mundo, hasta cierto punto estamos conscientes de la importancia de los modelos de simulación. Boeing Corporation y Airbus Industries, por ejemplo, suelen construir modelos de simulación de sus aviones jet propuestos y luego, probar sus propiedades aerodinámicas. Los estudiantes de negocios toman cursos que usan juegos administrativos para simular situaciones de negocios competitivas reales. Miles de empresas, gobiernos y organizaciones de servicio, desarrollan modelos de simulación, para ayudar en la toma de decisiones, respecto al control de inventarios, programas de mantenimiento, distribución de planta, inversiones y pronósticos de ventas (Render, Stair, & Hanna, 2009).

Detty & yinglin (2000) utilizaron simulación para la toma de decisiones de la implementación de los principios de Lean Manufacturing en una empresa de ensamble. Además de los procesos, en el modelo incluye sistemas de almacenamiento, gestión de inventario y control de producción donde la simulación computarizada demostró ser una herramienta que ayuda a medir los beneficios de Lean Manufacturing. Por otro lado, Ainhoa (2017) presenta un proceso innovador que combina Lean Manufacturing, simulación y optimización para

mejorar el flujo de material de una empresa de fabricación. Dicha combinación se consideró valioso para el éxito del proyecto.

### **1.3 Planteamiento del problema**

El problema principal a resolver en esta investigación trata de un análisis de costos de inventario de trabajo en proceso para determinar si los diferentes niveles de este tienen un impacto significativo para la empresa y establecer estrategias con ayuda de una función objetivo y experimentación para determinar el costo mínimo de dicho inventario.

Después de la revisión de la literatura especializada, no se ha encontrado por el momento investigaciones recientes que muestren de manera detallada y práctica la forma de identificar costos de inventario de trabajo en proceso y posterior se realice un análisis económico de dicho inventario y con ayuda de escenarios de simulación y optimización calcular los costos promedio de los productos y determinar si existen beneficios financieros en los sistemas de producción. Por esta razón se diseñará y desarrollará un modelo que le dará tratamiento a dicho costo inspirado en el pensamiento esbelto, Lean Accounting, además de determinar la forma de operar de manera que se minimicen los costos de inventario, aplicando escenarios de simulación como una herramienta clave.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar el inventario de trabajo en proceso desde una perspectiva financiera en sistemas de producción aplicando escenarios de simulación para identificar el mejor sistema de producción que genere el menor costo promedio del producto.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- a) Aplicar un método de costeo que permita calcular los costos relacionados al inventario de trabajo en proceso.
- b) Desarrollar escenarios de simulación para facilitar el análisis de los procesos.
- c) Estudiar los costos del inventario de trabajo en proceso que permitan dar respuesta a las necesidades de la industria.

- d) Proponer escenarios para el sistema simulado que minimice el inventario de trabajo en proceso.

### **1.5 Hipótesis**

Si se realiza un análisis de costos en el inventario de trabajo en proceso en empresas manufactureras, será posible establecer los tiempos de proceso en cada estación de trabajo, que permita alimentar las líneas de producción de manera que minimice el costo de trabajo en proceso y a la vez satisfacer la demanda de productos.

### **1.6 Justificación**

Los sistemas industriales se caracterizan por tener una alta variabilidad en los procesos y una inestabilidad en las salidas de producto terminado, por lo que resulta muy complejo y sobre todo costoso manipular las actividades para analizar los costos de WIP por lo que la aplicación de modelos de simulación y optimización permitirá analizar dichos costos. También, los sistemas industriales se caracterizan por aplicar los principios de la filosofía Lean Manufacturing aunque por lo regular no modifican los sistemas de gestión de costos y siguen utilizando los sistemas de costeo tradicionales que son procesos largos y complejos de entender por la mayoría de las personas. A pesar de que en esta investigación se simula un sistema de líneas de espera también se pueden calcular medidas de desempeño como inventario de trabajo en proceso, tiempo ciclo del proceso, identificar cuellos de botella y calcular costos de operación, mismas medidas de desempeño calculadas en sistemas enfocados a la filosofía Lean Manufacturing.

En esta investigación se propone aplicar la gestión de costos por cadena de valor (VSC, por sus siglas en inglés) propuesta por Brian Maskell y Bruce Baggaley para facilitar a las empresas calcular el costo de la producción cuando sus métodos de fabricación han alcanzado un estado de suficiente madurez.

### 1.7 Alcances

El presente trabajo tiene como alcance explorar el inventario de trabajo en proceso en un sistema de producción simulado bajo el enfoque de líneas de espera analizando los costos relacionados a dicho modelo.

### 1.8 Limitaciones

- En el sistema de producción simulado se analiza únicamente las medidas de desempeño del inventario de trabajo en proceso.
- En la etapa de optimización se considera el WIP de cada una de las líneas del sistema dejando fuera los costos complementarios a la cadena de flujo de valor

### 2 Marco teórico

#### 2.1 Sistemas de producción

Un sistema de producción es el proceso de diseño mediante el cual los elementos son formados en productos útiles (Riggs, 2012). Estos sistemas fabrican productos según el pedido, en el anaquel no pueden acumular inventarios de sus productos, por lo que se recomienda específicamente (Cuevas, 2008):

- Controlar y analizar el costo.
- Mejorar la eficiencia de los inventarios.

El objetivo tradicional de la función de producción ha sido aumentar la productividad y la eficiencia. Actualmente, los objetivos de la función de producción se centran en cuatro aspectos: Costes, tiempo, calidad y flexibilidad. La importancia relativa de los distintos objetivos depende de múltiples factores; entre otros la estrategia de negocio y de la estrategia corporativa de la empresa. Además, evolucionan a lo largo del tiempo, por lo que se hace necesario establecer para cada período cuáles son las prioridades estratégicas (Ríco & Sacristán, 2017).

Muchos son los factores estratégicos que hacen que, hoy por hoy, un sistema de producción en particular o unidad económica de producción triunfe en su actividad dentro del complejo mundo competitivo y globalizado del que forma parte. Cada sistema cuenta para ello, entre otros, con una serie de elementos de producción que, organizados bajo un criterio, tienen como resultado la conseguir sus objetivos. Entre dichos elementos se pueden destacar aspectos que van desde el ámbito de las finanzas hasta la forma en que haya decidido organizar su proceso productivo.

#### 2.2 Lean Accounting

Lean Accounting es un término que se refiere a un nuevo enfoque de los sistemas de información contables y de la gestión económica acorde con la filosofía «lean» en la que, como se ha indicado anteriormente, se persigue, como eje central, la eliminación de cualquier tipo de despilfarro. Si el Lean Manufacturing tiene como objetivo la eliminación del despilfarro en el proceso de producción, mediante su simplificación hasta sus elementos esenciales sin perder de vista los requerimientos del cliente, es necesario que la contabilidad

suministre la información, cuantitativa y cualitativa, consistente con dichos objetivos y que la eliminación del despilfarro se traduzca en menores costes y mayores resultados (Cordobes, 2014).

Hay razones tanto positivas como negativas por las que Lean Accounting es importante. Lean Accounting proporciona (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011) :

- Mediciones de rendimiento Lean, que reemplazan las mediciones tradicionales.
- Métodos para identificar el impacto financiero de las mejoras de fabricación Lean.
- Una mejor manera de comprender los costos, los costos del producto y los costos del flujo de valor.
- Métodos para eliminar grandes cantidades de desechos de los sistemas de contabilidad, control y medición.
- Nuevas formas de tomar decisiones de gestión relacionadas con la fijación de precios, la rentabilidad, la fabricación / compra, la racionalización del producto / cliente, etc.

Todas las razones negativas se relacionan con las deficiencias de los sistemas tradicionales de contabilidad, control y medición. Los sistemas tradicionales no funcionan para las empresas que persiguen el pensamiento Lean; de hecho, son activamente dañinos.

### **2.2.1 Ventajas y desventajas de implantar Lean Accounting**

El sistema Lean es una metodología más actual e innovador, que trata de aportar mayor flexibilidad a las empresas, haciendo que sean capaces de adaptarse a todo tipo de clientes, ofreciéndoles lo que estos desean. Es un sistema que no se centra exclusivamente en la cifra de coste, sino en las mejoras que pueden producirse dentro de las organizaciones mediante la reducción o la eliminación de todo aquello que no sea de interés para el cliente. De ahí, se centra directamente en la reducción de desperdicios, eliminando aquellas tareas o procesos que no vayan a ser consideradas por el consumidor final.

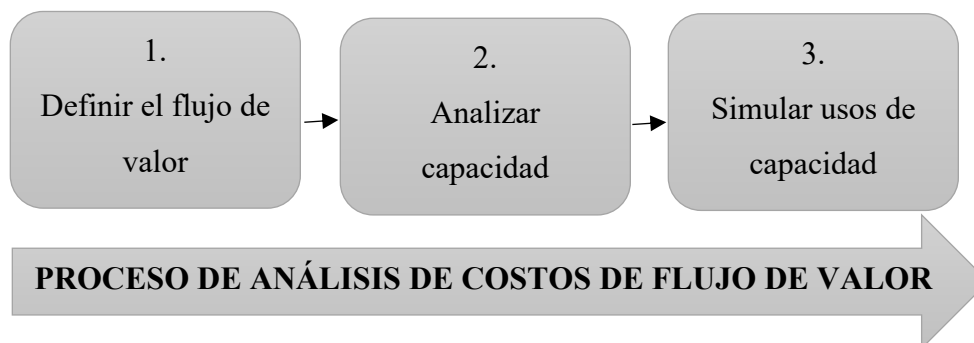
Sin embargo, la implantación del mismo, presenta una elevada incertidumbre, por su carácter innovador y la presencia de cambios bruscos así como avances tecnológicos a los que los empresarios tradicionales no están acostumbrados, por lo que la decisión de adentrarse en la implantación de un nuevo sistema puede ser difícil de llevar a cabo por generar desconfianza en los directivos (Díaz, 2016).



### 2.2.2 Value Stream Cost Analysis (VSCA):

VSCA representa la principal herramienta de contabilidad lean para evaluar los beneficios financieros de la aplicación de la producción ajustada (mejoras lean), ya que depende de la descripción de actividades de valor agregado, actividades sin valor agregado (que refleja el desperdicio) en cada flujo de valor para el estado actual. Con base en esta clasificación de actividades, la capacidad en el flujo de valor se analiza y clasifica a capacidad productiva, capacidad no productiva (debido a los desechos) y Capacidad disponible (Hesham, Atef, & Nasr-Eldeen, 2015).

Hay tres pasos en el proceso de VSCA los cuales se muestran en la figura 2.1



**Figura 2.1** Proceso de análisis de costos de flujo de valor. Fuente: (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011)

### Supuestos para medir el beneficio o rentabilidad de value stream

Principalmente, el análisis de la rentabilidad de la cadena de valor se basa en una comparación de los ingresos y los costos de operación de una empresa, divididos en flujos de valor y residuos. El enfoque alternativo para calcular el costo del flujo de valor se basa en la aplicación del método de resta, al reducir los costos totales por el costo de las fuentes individuales de desechos. En este enfoque, los costos del flujo de valor total se calculan como resultado de las correcciones de los costos operativos totales por (Kozarkiewicz & Lada, 2015):

- costos de la capacidad de producción no utilizada: estos incluyen una parte de los costos fijos relacionados con la escala de las operaciones.

- costos de consumo excesivo de recursos: partiendo de las diferencias entre los costos de capacidad utilizada y los costos estándar de elementos individuales de costos variables y fijos.

### **Costo promedio por unidad**

Costo promedio por unidad es importante para la mejora general de los procesos de flujo de valor. El costo promedio por unidad muestra la dirección general de la corriente de valor en la que se están produciendo cambios reales de mejora. A veces las mejoras no muestran un impacto financiero inmediato, los resultados se conocen a lo largo del tiempo. En este momento, estas mejoras se manifiestan en el costo promedio por unidad de medición. A medida que se producen las mejoras lean, el costo promedio se reduce (Arora, 2016).

$$\text{Costo promedio por unidad} = \frac{\text{Costo de value stream de una semana}}{\text{Número de unidades enviadas por el periodo}} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de value stream} = & \text{Costo de material} + \text{costo de mano de obra} + \\ & \text{costo de maquinaria} + \text{costos WIP} + \text{costos de operación} + \\ & \text{otros costos} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

### **2.3 Costos**

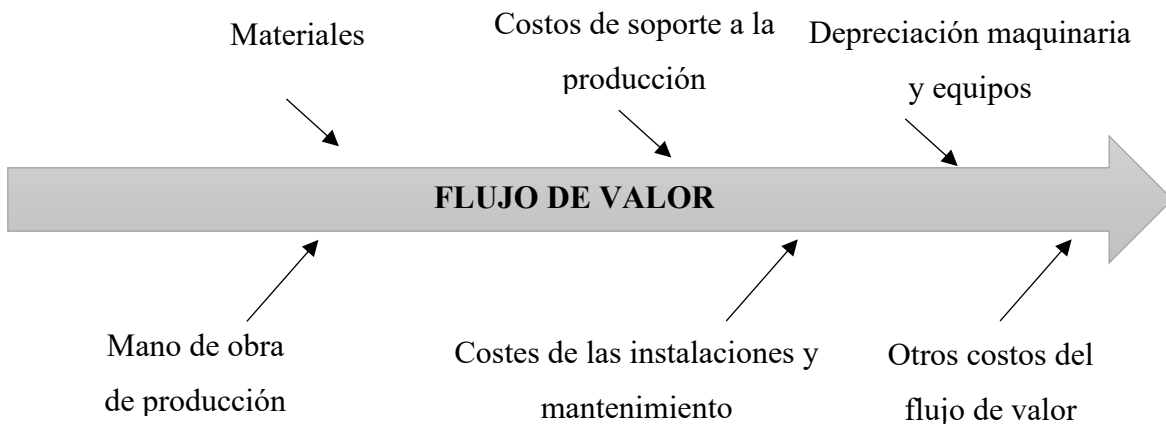
El costo representa los recursos económicos que han sido, deben o deberían sacrificarse para alcanzar cierto objetivo, independientemente de la forma de medición de los mismos (Billene, 1995).

Los costos sirven para registrar lo ocurrido en las empresas, atendiendo cuando se produjeron los acontecimientos que generaron una erogación, a donde se originaron (tipos de gasto) y cuánto se gastó (el registro de la magnitud del esfuerzo económico). Además, sirven para exponer y demostrar lo ocurrido contable, en función de quién gastó, en qué y por qué lo hizo, con lo que se sientan las bases para proyectar esfuerzos futuros y tomar decisiones (Faja & Ramos, 2006).

**2.3.1 Costos relacionados con la cadena de flujo de valor**

El costo del flujo de valor identifica y establece el costo de los pasos del proceso que se requiere para proporcionar valor al cliente. Considera todos los costos en el flujo de valor como directos. No hay distinción entre el costo directo y el costo indirecto dentro del flujo de valor. Los costos fuera del flujo de valor no se tienen en cuenta para este método de cálculo de costos. Finalmente, es un proceso para determinar cuánto valor es creado por cada paso del proceso.

Los costos relacionados al flujo de valor se muestran en la figura 2.2, mano de obra, materiales, soporte a la producción, depreciación (amortización) de maquinaria, mantenimiento e instalaciones, etc (Arora, 2016).



**Figura 2.2 Costos incluidos en el VSCA. Fuente: (Ruiz de Arbulo & Díaz de Basurto, 2008)**

**Costos directos de mano de obra**, incluyen los salarios que se pagan a los empleados y que una compañía puede rastrear en una forma económicamente factible. Ejemplo de esto es el salario de los operadores de máquinas y de los ensambladores. En las fábricas muy automatizadas donde existe una fuerza de trabajo flexible no hay costos directos de mano de obra, ¿Por qué? Porque los trabajadores dedican tiempo a productos numerosos, lo que hace que no sea factible en lo económico rastrear físicamente ningún costo directo de mano de obra hasta los productos específicos.

**Costos indirectos de mano de obra**, incluyen todos los costos asociados con el proceso de producción y que una compañía no puede rastrear hasta los bienes o servicios que produce, en una forma económicamente factible. Los contadores consideran que muchos gastos de mano obra son indirectos porque es posible, o no es económicamente factible, rastrearlos hasta los productos específicos, por ejemplo, los de limpieza, operadores de camiones, vigilantes de la planta y personal de almacenes.

**Materiales**, Incluye los costos de adquisición de toda la materia prima que una compañía identifica como parte de los bienes manufacturados y que puede rastrear en una forma económicamente factible hasta los bienes fabricados. Algunos ejemplos son los moldes de hierro, madera, láminas de aluminio y subensambles. Es frecuente que la materia prima directa no incluya conceptos menores, como tachuelas y pegamento por que los costos de rastrearlos serían mayores que los beneficios posibles de contar con costos más precisos de los productos.

- **Materia prima indirecta**, es la que se adiciona al costo unitario con cierta imprecisión, ya que no resulta conveniente establecer su fiel participación por la mínima importancia que tiene su valor dentro del costo final del artículo. Convertir estos elementos en directos no es, pues, una tarea imposible. Ellos también pueden ser medir, pero resultaría antieconómico hacerlo porque el esfuerzo que demandaría esa medición podría ser mayor que la influencia que tiene el material.

**Los costos de soporte**, como piezas de repuesto y herramientas, a menudo se compran para el flujo de valor utilizando una tarjeta de crédito de compra asignada al flujo de valor, por lo que los costos se contabilizan directamente en el centro de costo / beneficio del flujo de valor. Los costos de los consumibles, suministros y otros gastos cotidianos se asignan de manera similar a la corriente de valor (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011).

**Otros costos del flujo de valor**, incluyen piezas de repuesto, suministros, herramientas de consumo, viajes, etc. Es común que alguien en el flujo de valor sea responsable de comprar estos artículos. En su mayoría, se compran a proveedores que tienen contratos a largo plazo

y se pagan con la tarjeta de compra. La persona responsable realiza un seguimiento de lo que ha gastado y lo informa semanalmente.

### **Costos a corto plazo**

Es el periodo en el cual se cumplen dos condiciones:

- Las empresas existentes tienen límites impuestos por algún factor de producción fijo.
- No pueden entrar nuevas empresas a la industria, ni pueden salir de ella las empresas ya existentes.

A corto plazo, todas las empresas tienen costos que deben cubrir, no importa cuál sea su producción. En realidad, ciertos costos deben pagarse, aunque la empresa deje de producir. A ese tipo de costo se le conoce como costos fijos, lo que es importante recordar acerca de ellos es que las empresas no pueden hacer nada a corto plazo para eludirlos o modificarlos. Las empresas no tienen costos fijos a largo plazo, puesto que pueden expandirse, contraerse o salir de la industria.

Las empresas tienen ciertos costos a corto plazo que dependen del nivel de producción que cada una haya elegido. A los costos de ese tipo se les conoce como costos variables.

En conjunto, los costos fijos y los costos variables constituyen el costo total, es decir, los costos totales (Case & Fair, 1997).

### **2.4 Costo total de manufactura de un producto**

Consiste del costo de los materiales, herramental y mano de obra, los costos fijos y los costos de capital. Están involucrados varios factores en cada una de las categorías de costos. Los costos de manufactura se pueden minimizar analizando el diseño del producto para determinar si el tamaño y la forma de la pieza son óptimas y si los materiales seleccionados son los menos costosos con las propiedades y características deseadas. La posibilidad de sustituir o reemplazar un material por otro es una consideración importante en la minimización de los costos (Kalpakjian & Schmid, 2002).

### 2.4.1 Determinación algebraica: Costo directamente e inversamente proporcional

Las decisiones económicas frecuentemente involucran la elección del tamaño o la cantidad de una instalación o un factor de producción: una forma apropiada de manejar estos problemas es determinar el punto de costo mínimo de la función de costo total.

Si algún costo varía en proporción directa y otros costos en proporción inversa al tamaño de una instalación u otra variable de diseño, podemos generalizar una expresión algebraica de los costos totales como se muestra en la ecuación 2.3 (Barish, 1978):

$$C = AX + \frac{B}{X} + K \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde:

C= costo total

X=variable de diseño o factor de producción

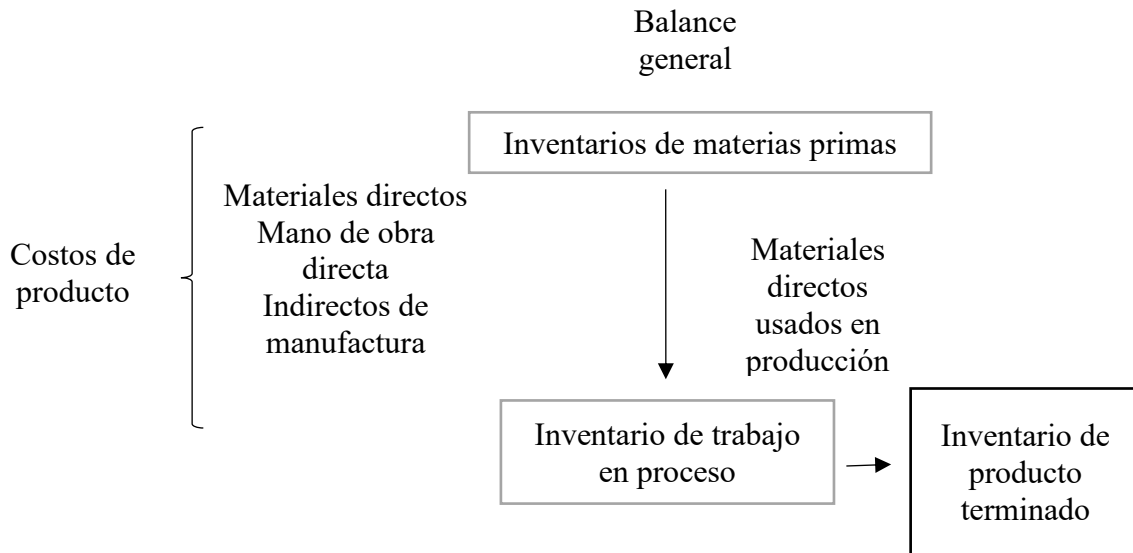
A, B y K= constante positiva o igual a cero

En la ecuación 2.4 para encontrar el punto mínimo del costo total, diferenciamos para encontrar la primera derivada de C, se iguala a cero y resuelve para X.

$$X = \sqrt{\frac{B^*}{A}} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

### 2.5 Flujos de costo de una compañía manufacturera

Para comprender más a fondo los costos por producto, examinemos brevemente el flujo de costos de una compañía manufacturera. De esta forma, podremos ver cómo los costos por producto se mueven a través de varias cuentas y afectan el balance general y el estado de ingresos en el curso de la manufactura y venta de bienes. Los flujos de costos por periodo y costos por producto a través de los estados financieros se ilustran en la figura 2.3 Todos los costos por producto aparecen en el balance general bajo el rubro “costos de inventario”. Si un producto se vende, sus costos de inventario en el balance general se transfieren al estado de ingresos bajo el rubro “costo de bienes vendidos”. Existen tres tipos de costos de inventario que se reflejan en el balance general (Park, 2009):



**Figura 2.3 Flujo de costos en una empresa manufacturera. Fuente: Elaboración propia**

## 2.6 Clasificación de costos para predecir el comportamiento del costo

En el análisis del flujo de efectivo, necesitamos predecir cómo se comportará cierto costo como respuesta a un cambio en la actividad. Por ejemplo, tal vez un gerente desea estimar el efecto que tendrá un 5% de aumento en la producción en los sueldos totales que paga la compañía, antes de que se tome la decisión de modificar la producción. El comportamiento del costo describe cómo reaccionará o responderá el costo ante cambios en la actividad de negocio.

## 2.7 Administración y control de inventarios

Los inventarios son un eslabón entre la producción y la venta de un producto. Una empresa de fabricación debe mantener cierta cantidad de inventario, que se conoce como trabajo en proceso, durante la producción. Aun cuando otros tipos de inventario en tránsito, materias primas e inventarios de productos terminados no son estrictamente necesarios, si dan flexibilidad a la empresa. El inventario en tránsito (es decir, el inventario entre distintas etapas de la producción o el almacenamiento) permite la programación eficiente de la producción y el aprovechamiento de los recursos. Sin este tipo de inventario habría que esperar que cada una de las etapas previas de producción completara una unidad (Van, 2002).

Uno de los aspectos de control de costos de producción e incluso de reducción de los mismos, que no siempre es reconocido como tal, descansa en el control de los costos aún no aplicados y designados como activos. Dentro de los activos más importantes en una empresa manufacturera figuran las existencias o inventarios de tres clases: materias primas, trabajo en proceso y productos terminados, de los cuales los primeramente citados constituyen una porción significativa del costo de producción (Cárdenas y Napoles, 2016).

### **2.8 Inventarios**

El inventario es un recurso ocioso que se compone de materiales para la producción: herramientas, partes compradas, materias primas y productos en proceso. Que el recurso se encuentre ocioso no quiere decir que no tenga ningún propósito. Está disponible cuando se le necesite (Riggs, 2012) . Por otra parte, Chase & Aquilano (1992), hacen referencia a un sistema de inventario que es el conjunto de políticas y controles que supervisa los niveles que deben mantenerse, cuando hay que reabastecer el inventario y de qué tamaño deben ser los pedidos.

Las empresas manufactureras generalmente tienen tres clases de inventarios; materias primas, trabajo en proceso (WIP) y producto terminado. Los niveles de los inventarios de materias primas reflejan la producción prevista, la estacionalidad de la producción, la estacionalidad de la producción, la seguridad de las fuentes de suministro, la eficiencia de las compras planeadas y las operaciones de producción. El nivel de los inventarios de productos terminados es una cuestión de coordinar la producción y las ventas.

#### **Inventario de Trabajo en proceso (WIP)**

El inventario de trabajo en proceso (también llamado inventario de trabajo en progreso) acumula el costo de las materias primas envasadas a la fábrica, el costo de la mano de obra directa utilizada en la producción, los costos indirectos de fabricación y el espacio requerido. Al finalizar el proceso de fabricación, la empresa física transfiere las unidades completadas de la fábrica al almacén de productos terminados. También transfiere los costos del producto de esas unidades completadas al inventario de productos terminados (Stickney, Weil, & Schipper, 2010).



### **Inventarios de materias primas**

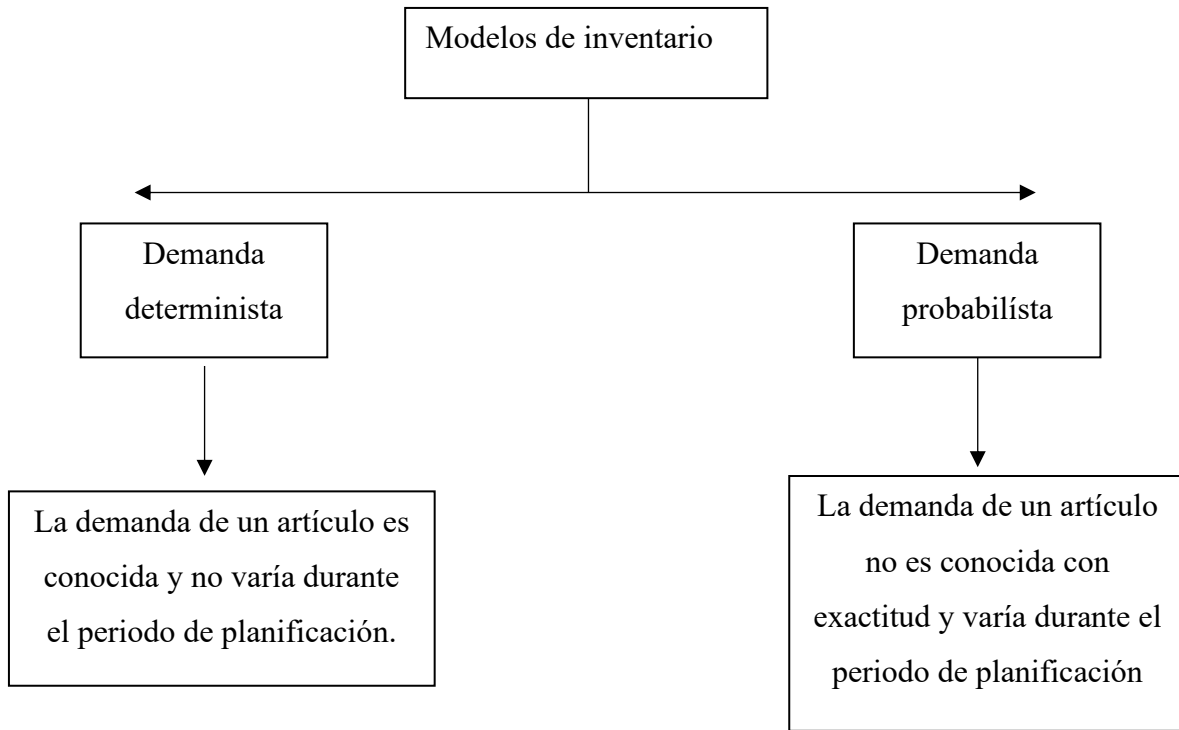
Se denominan inventarios de materias primas a aquellos que están constituidos por los productos que van a ser procesados. Los inventarios de este tipo transmiten información relativa a la producción prevista y a su estacionalidad, a la eficacia de la planificación y la seguridad de las fuentes de suministros (Pérez & Bastos, 2006).

### **Inventarios de productos terminados**

Comprenden estos, los artículos transferidos por el departamento de producción al almacén de productos terminados por haber alcanzado su grado de terminación total y que a la hora de la toma física de inventario se encuentren aun en los almacenes, es decir, los que todavía no han sido vendidos. El nivel de inventario de productos terminados va a depender directamente de las ventas, es decir, su nivel está dado por la demanda (Manco, 2014).

## **2.9 Modelos de inventarios**

Los modelos de inventarios como se muestra en la figura 2.4 hacen referencia a los controles que se deben analizar con el objetivo de reducir los costos de mantenimiento, recuperar la inversión, reducir costos de manejo de materiales y equilibrar el costo-servicio pero para poder llegar a ello es importante tener en cuenta algunas decisiones como: determinar tiempo y cantidad de unidades a ordenar o producir, que artículos de inventario merecen atención especial y coordinar funciones de producción (Eilon, 1999).



**Figura 2.4 Tipos principales de modelos de inventario. Fuente: Elaboración propia**

## 2.10 Simulación

Es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistema de negocios, económicos, sociales, físicos o químicos a través de largos periodo de tiempo (Coss Bu, 2003).

Para presentar los tipos de modelos de simulación y sus principales características, es imprescindible definir previamente que se entiende por sistema.

Casanovas, Figueras, & Guasch, (2002) define un sistema como una colección de objetos o entidades que interactúan entre sí para alcanzar un cierto objetivo.

### 2.10.1 Clasificación de los sistemas

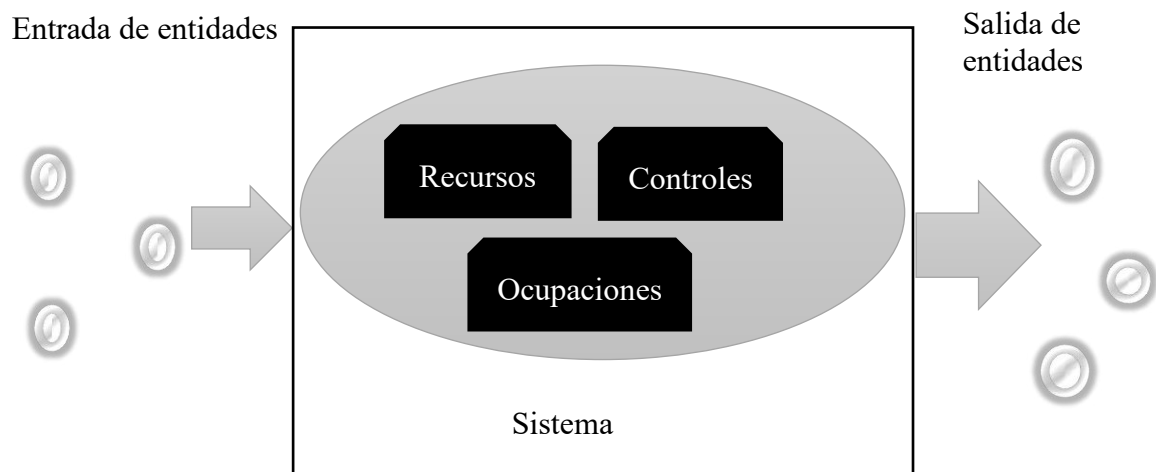
- a) Los sistemas deterministas son aquellos que no contienen ningún elemento aleatorio. Es decir, aquellos que en las relaciones funcionales entre las variables del sistema

están definidas de tal modo que las variables de salida e internas quedan determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado.

- b) Los sistemas estocásticos son los que siguen un patrón de comportamiento aleatorio. En consecuencia, aun teniendo variables de entrada y de estado conocidas no es posible determinar con certeza los valores de salida. Las variables de salida descansan en las probabilidades de ocurrencia de las distintas alternativas, por esa razón, en estos sistemas se desconoce el resultado que, finalmente arrojarán (Otal, Serrano, & Serrano, 2015).

### Elementos del sistema

Desde la perspectiva de la simulación, se puede decir que un sistema consiste en entidades, actividades, recursos y controles (Figura 2.5). Estos elementos definen el quién, qué, dónde, cuándo y cómo del procesamiento de la entidad.



**Figura 2.5 Elementos de un sistema. Fuente: (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003)**

### Entidades

Son los artículos procesados a través del sistema, tales como productos, clientes y documentos. Diferentes entidades pueden tener características únicas tales como costo, forma, prioridad, calidad o condición. Las entidades se pueden subdividir en los siguientes tipos:

- Humano o animado (clientes, pacientes, etc.).

- Inanimado (partes, documentos, papeleras, etc.).
- Intangible (llamadas, correo electrónico, etc.).

### **Ocupaciones**

Son las tareas realizadas en el sistema que están directa o indirectamente involucradas en el procesamiento de las entidades. Algunos ejemplos de actividades incluyen el servicio a un cliente, cortar una pieza en una máquina o reparar una pieza de equipo. Las actividades generalmente consumen tiempo y a menudo implican el uso de recursos. Las actividades se pueden clasificar como:

- Procesamiento de la entidad (check-in, tratamiento, inspección, fabricación, etc.).
- Movimiento de entidad y recursos (viaje en montacargas, montando en un elevador, etc.).
- Ajustes de recursos, mantenimiento y reparaciones (configuración de la máquina, reparación de copiadora, etc.).

### **Controles**

Dicte cómo, cuándo y dónde se realizan las actividades. Los controles imponen orden en el sistema. En el nivel más alto, los controles consisten en horarios, planes y políticas. En el nivel más bajo, los controles toman la forma de procedimientos escritos y lógica de control de la máquina. En todos los niveles, los controles proporcionan la información y la lógica de decisión sobre cómo debe funcionar el sistema. Los ejemplos de controles incluyen:

- Secuencias de enrutamiento.
- Planes de producción.
- Programas de trabajo.
- Priorización de tareas.
- Software de control.
- Hojas de instrucciones.

### **Recursos**

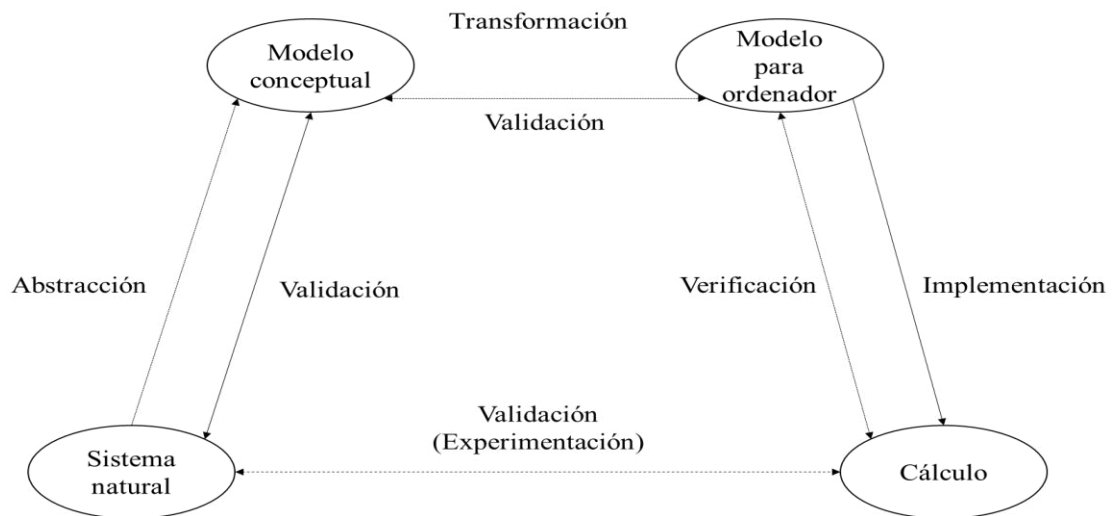
Un recurso puede ser una persona, herramienta, vehículo u otro objeto que se pueda usar para:

- Material de transporte entre ubicaciones y enrutamiento

- Realizar una operación en una ubicación
- Realizar mantenimiento en una ubicación u otro recurso que esté inactivo.

Para preparar la simulación de un sistema complejo, es necesario contar con un modelo de simulación detallado para formular y describir la operación del sistema y cómo debe simularse como se muestra en la figura 2.6, el cual consta de varios bloques de construcción básicos (Hillier & Liberman, 2010) :

- Definir el estado del sistema (como el número de clientes en un sistema de colas).
- Identificar los estados posibles del sistema que pueden ocurrir.
- Identificar los eventos posibles (como las llegadas y terminaciones de servicio en un sistema de colas) que cambian el estado del sistema.
- Contar con un reloj de simulación, localizado en alguna dirección del programa de simulación, que registrará el paso del tiempo (simulado).
- Un método para generar los eventos de manera aleatoria de los distintos tipos.
- Una fórmula para identificar las transiciones de los estados que generan los diferentes tipos de eventos.



**Figura 2.6 Etapas del proceso de construcción del modelo. Fuente: (Hillier & Liberman, 2010)**

### Tipos de simulación

- a) **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.
- b) **Modelos continuos.** Aquellos en los que las relaciones entre las variables relevantes de la situación real se definen por medio de ecuaciones diferenciales, dado que éstas permiten conocer el comportamiento de las variables en un lapso de tiempo continuo. Problemas como saber de qué manera se transfiere el calor en un molde o determinar cómo fluye cierto material dentro de una tubería, e incluso discernir el comportamiento del nivel de un tanque de gasolina al paso del tiempo mientras el vehículo está en marcha, pueden simularse en estos términos (García, García, & Cárdenas, 2006).

### Simulación versus experimentación con el sistema real

En la bibliografía especializada se dan a conocer las comparaciones de simulación con respecto a la experimentación en un sistema real. Robinson (2004) menciona que Hay algunas razones obvias, y menos obvias, por las que la simulación es preferible a dicha experimentación directa algunos ejemplos son:

- **Costo.** La experimentación con el sistema real es probable que sea costosa. Es costoso interrumpir las operaciones cotidianas para probar nuevas ideas. Además del costo de realizar cambios, puede ser necesario cerrar el sistema para el período de tiempo en el que se realizan las modificaciones.
- **Tiempo.** Lleva mucho tiempo experimentar con un sistema real. Puede tomar muchas semanas o meses (posiblemente más) antes de que se pueda obtener una verdadera reflexión del rendimiento del sistema. Dependiendo del tamaño del modelo y la velocidad de la computadora, una simulación puede correr muchas veces más rápido que en tiempo real. En consecuencia, los resultados en el rendimiento del sistema se pueden obtener en cuestión de minutos, tal vez horas.
- **Control de las condiciones experimentales.** Al comparar alternativas, es útil controlar las condiciones bajo las cuales se realizan los experimentos para poder hacer comparaciones directas. Esto es difícil cuando se experimenta con el sistema real.

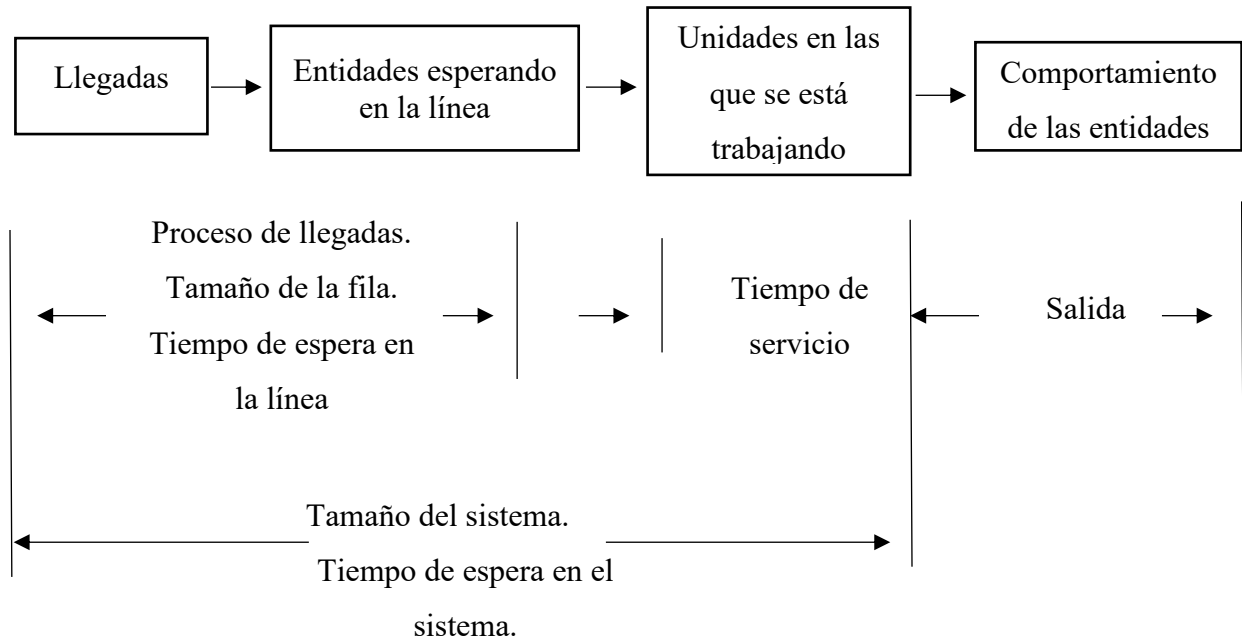
- **El sistema real no existe.** Una dificultad muy obvia con la experimentación en el mundo real es que el sistema real puede no existir todavía. Además de construir una serie de sistemas alternativos del mundo real, que es poco probable que sea práctico en las situaciones más triviales, la experimentación directa es imposible en tales circunstancias. La única alternativa es desarrollar un modelo.

### 2.11 Líneas de espera

Esperar que nos atiendan es parte de la vida diaria. Esperamos en los restaurantes, hacemos fila para abordar un avión, y nos formamos en la cola para que nos atiendan en dependencias oficiales. El fenómeno de esperar no se limita a los seres humanos: los trabajos esperan para ser procesados, los aviones vuelan en círculos a diferentes alturas hasta que se les permite aterrizar, y los autos se detienen en los semáforos. Eliminar la espera por completo no es una opción factible debido a que el costo de instalación y operación del centro de operación puede ser prohibitivo. Nuestro único recurso es buscar el equilibrio entre el costo de ofrecer un servicio y el de esperar a que lo atiendan (Taha, 2007).

Se debe recordar que cuando hablamos de cola, tenemos que lidiar con dos elementos, es decir, las llegadas y servicio. El sistema completo de colas puede ser descrito completamente por (Rama, 2007) :

- La entrada (patrón de llegada)
- El mecanismo de servicio o patrón de servicio,
- La disciplina de la cola
- Comportamiento del cliente.

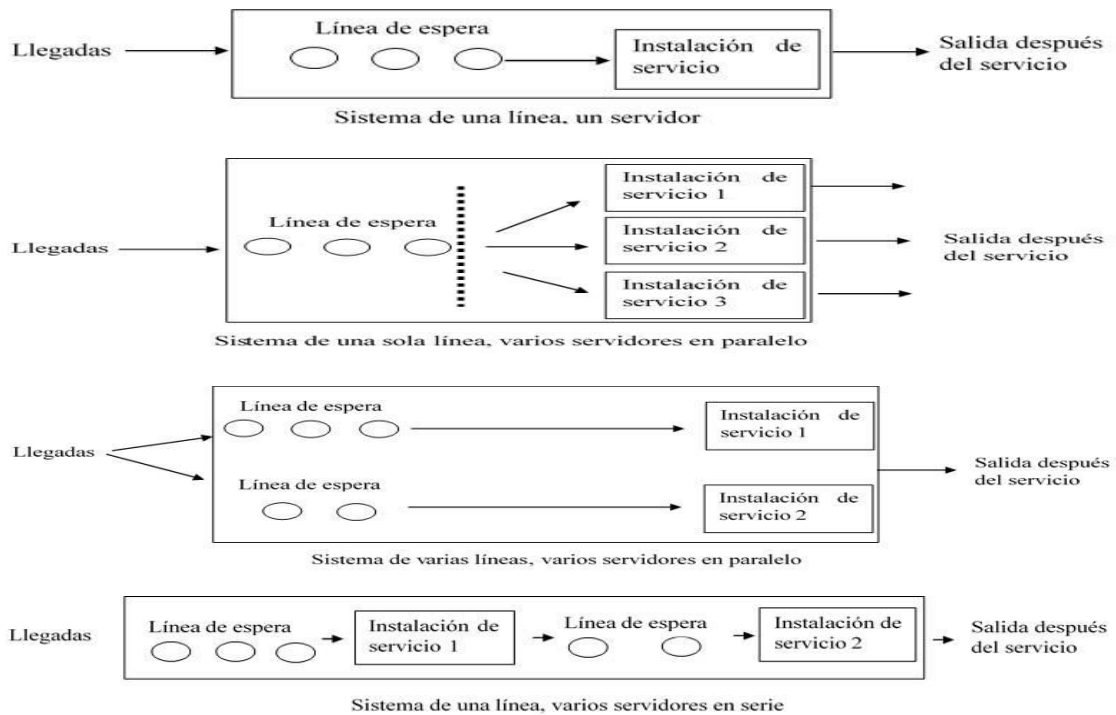


**Figura 2.7 Componentes de un sistema de líneas de espera. Fuente: (Rama, 2007)**

### **Configuraciones básicas del sistema de líneas de espera**

Los sistemas de servicio generalmente se clasifican en términos del número de servidores, y el número de fases o de número de paradas de servicio, que deben realizarse como se muestra en la figura 2.8.





**Figura 2.8 Sistema de líneas de espera. Fuente: (Bronson, 1998)**

### Evaluación de costos en líneas de espera

Los problemas económicos que implican el tiempo de espera están presentes en muchos aspectos de la operación de la empresa cuando hay variabilidad aleatoria en los requisitos para el servicio principal y / o en el tiempo requerido para proporcionar los servicios.

Para resolver problemas de tiempo de espera se debe saber lo siguiente (Barish, 1978):

- El patrón de entrada.
- Orden de llegadas.
- Salidas.
- El número de estaciones de servicio.
- Cantidades que cada estación de servicio puede manejar y los patrones (distribuciones) de variación de los tiempos de servicio.
- Política de servicio.

### 2.11.1 Costos relacionados a un sistema de líneas de espera

El objetivo principal de un modelo de optimización orientado a líneas de espera es minimizar el tiempo de espera y el número de entidades en las filas. Dentro de la definición de los parámetros que afectan un sistema de líneas de espera, debe existir claridad acerca de cuáles son los costos implícitos en él y el impacto financiero en el sistema de producción o empresarial (Martínez & Camilo, 2009).

#### **Costos de mano de obra**

La mano de obra es sin duda el recurso más valioso en la prestación de un servicio y también el más costoso. A nivel mundial, el 63% de las empresas del sector privado están pagando más en costos de personal que hace un año. La carga prestacional de poseer muchos empleados puede llevar a la quiebra a cualquier negocio, ya que, dentro del costo unitario de producir un bien, alrededor del 80% representan la materia prima y la mano de obra.

#### **Costos de operación**

Uno de los costos más importante a la hora de definir cómo prestar un servicio son las instalaciones físicas. Junto con el lugar se asocian muchos más costos que son derivados del mismo y que son necesarios para mantener el lugar de operación en las condiciones pertinentes y aptas para desarrollar la actividad que éste prevista.

#### **Costos de espera**

La espera de entidades en el sistema está asociada con el tiempo ocioso que éstos pierden mientras esperan por ser procesados. Evaluar este costo es un factor clave al momento de cuantificar el efecto que éste tiene en la eficiencia de un negocio.

### 2.11.2 Sistemas M/M/1

Un sistema M/M/1 es un sistema de líneas de espera que tiene tiempos entre llegadas distribuidos exponencialmente, con parámetro  $\lambda$ , tiempos de servicio distribuidos exponencialmente, con parámetro  $\mu$ ; un servidor; la capacidad de sistema no tiene límite y una disciplina de línea de espera del tipo primero en llegar, primero en atenderse (Bronson, 1998).

Para un sistema M/M/1, se define al factor de utilización (o intensidad de tránsito), es decir la fracción esperada del tiempo que los servidores individuales están ocupados (Hillier & Liberman, 2010). Ésta se define como lo indica la Ecuación 2.5:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}; \rho < 1 \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

Donde:

$\rho$  = Tasa de utilización

$\lambda$  = Tasa de llegadas al sistema

$\mu$  = Tasa de servicio de la estación

Si  $\rho > 1$ , las llegadas se presentan con una tasa mayor que lo que el servidor puede manejar: la longitud esperada de la línea aumenta sin límite y no se presenta un estado estable (Mejía, 2018).

### Medidas de desempeño

Para un sistema de líneas de espera en estado estable, las medidas de mayor interés son el trabajo en proceso promedio del sistema, trabajo en proceso promedio de la línea de espera, tiempo de ciclo o tiempo de espera promedio del sistema y tiempo de ciclo o tiempo de espera promedio de la línea de espera (Gross, Shortle, Thompson, & Harris, 2008).

Número promedio de entidades en el sistema

$$L = WIP_s = \frac{\rho}{1-\rho} \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

Donde:

$WIP_s$  = Trabajo en proceso del sistema

$\rho$  = Factor de utilización

Número promedio del trabajo en proceso del sistema

$$L = WIPs = \lambda TCs \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

Donde:

$\lambda$ = Tasa de llegadas al sistema

$TC_s$  = Tiempo de ciclo del sistema

Longitud promedio de la línea de espera

$$Lq = WIPq = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

Donde:

$WIP_q$  = Trabajo en proceso o número de entidades que esperan a ser atendido por el servidor

$\rho$  =Factor de utilización

Número promedio de trabajo en proceso que espera a ser atendido por el servidor

$$Lq = WIPq = \lambda TCq \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

Donde:

$TC_q$  =Tiempo de ciclo promedio en la cola

$\lambda$ = Tasa de llegadas al sistema

Tiempo promedio que una entidad permanece en el sistema

$$W = TCs = \frac{\mu}{\mu-\lambda} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

Donde:

$\lambda$ = Tasa de llegadas al sistema

$\mu$ = Tasa de servicio de la estación

$$W = TCs = TCq + E[ts] \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Donde:

$TC_q$ = Tiempo de ciclo promedio en la cola

$E[ts]$  = Media del tiempo de servicio del sistema

Tiempo promedio que una entidad permanece (o espera) en la línea

$$Wq = TCq = \frac{\rho}{\mu - (1 - \rho)} \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

Dónde:

$\rho$  = Tasa de utilización

$\lambda$  = Tasa de llegadas al sistema

$\mu$  = Tasa de servicio de la estación

Tiempo de ciclo promedio en la línea de espera (antes de pasar al servidor)

$$Wq = TCq = TCs - E[ts] \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

Donde:

TCs = Tiempo de ciclo del sistema

$E[ts]$  = Media del tiempo de servicio del sistema

### 2.11.3 Modelo M/M/s

Modelo multiservidor M / M / s: las llegadas son Poisson con tasa  $\lambda$ , hay servidores s, y cada servidor tiene un tiempo de servicio de distribución exponencial, independiente e idéntica con media de  $1 / \mu$  (Gross, Shortle, Thompson, & Harris, 2008).

Cuando  $s\mu$  excede la tasa media de llegadas  $\lambda$ , es decir, cuando

$$\rho = \frac{\lambda}{s\mu} < 1, \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

Un sistema de colas que se ajuste a este modelo tarde o temprano alcanzara la condición de estado estable (Hillier & Liberman, 2010).

### Medidas de desempeño

Para este modelo se tienen las siguientes relaciones:

Número esperado de entidades en el sistema

$$WIPs = Lq + \rho \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

Tiempo de espera en la línea

$$TCq = \frac{Lq}{\lambda} \quad \text{Ecuación (2.16)}$$

Tiempo de espera en el sistema

$$TCS = \frac{Ls}{\lambda}$$

Ecuación (2.17)

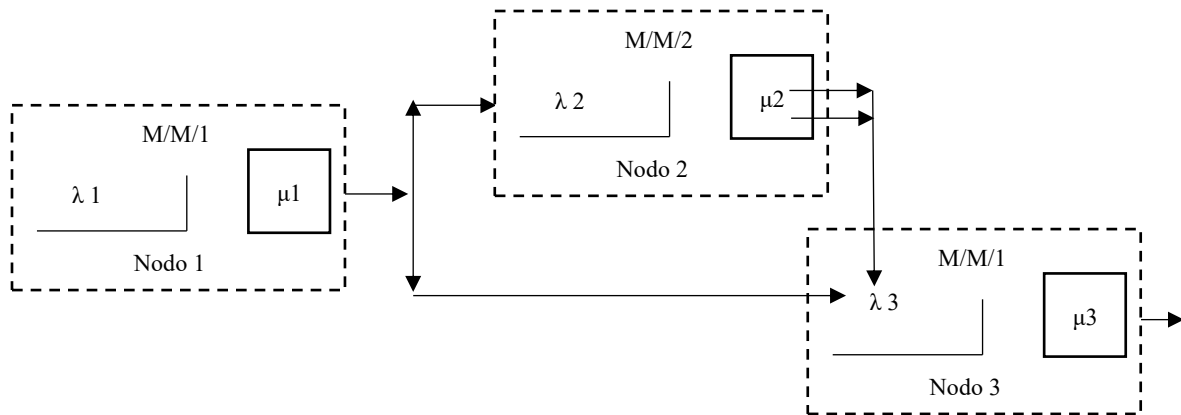
### 2.12 Redes de líneas de espera

Las redes de líneas de espera son redes de instalaciones de servicio en las que los clientes solicitan el servicio de algunas o todas ellas. Por ejemplo, las órdenes que se procesan en un taller se deben programar a través de una secuencia de máquinas entre un grupo (instalaciones de servicio). Es necesario, entonces, estudiar toda la red para obtener información sobre el tiempo esperado total, número esperado de entidades en todo el sistema, etcétera (Hillier & Liberman, 2010).

#### Redes de Jackson

Un tipo importante de redes son las redes de Jackson, que reciben este nombre en honor a James R. Jackson, quien primero estableció, hace ya varias décadas, las características de las redes y demostró que se cumple esta propiedad, su representación se muestra en la figura 2.9. Una red de colas se llama red de Jackson si se cumplen las siguientes condiciones (Feldman & Valdez-Flores, 2010) :

- Todas las llegadas externas a cada sistema de espera en la red deben realizarse de acuerdo con un proceso de Poisson.
- Todos los tiempos de servicio deben ser distribuidos exponencialmente.
- Todas las colas deben tener capacidad ilimitada.
- Cuando un trabajo deja un sistema de colas, la probabilidad de que vaya a otro sistema de colas es independiente del historial pasado de ese trabajo y es independiente de la ubicación de cualquier otro trabajo.



**Figura 2.9 Representación de una red de Jackson. Fuente: (Feldman & Valdez-Flores, 2010)**

### 2.13 Optimización

La optimización es el proceso de encontrar las mejores decisiones para una medida particular de desempeño.

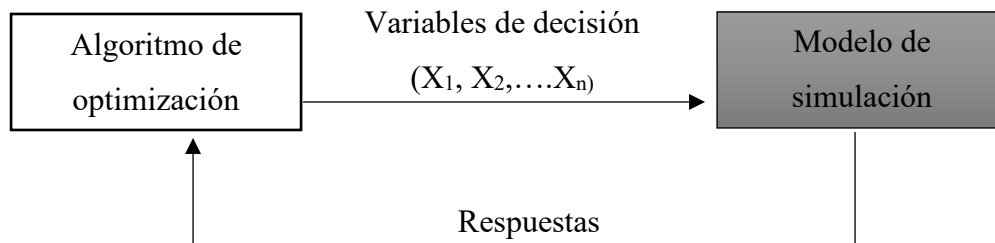
Los elementos de un problema de optimización son un conjunto de decisiones, un criterio y quizás un conjunto de condiciones requeridas, o restricciones, que las decisiones deben satisfacer. Estos elementos se prestan a la descripción en un modelo matemático (Baker, 2011).

### 2.14 Optimización y simulación

Los modelos de simulación de sistemas se construyen por muchas razones. Algunos modelos están diseñados para obtener una mejor comprensión de un sistema, para pronosticar la salida de un sistema o para comparar un sistema con otro. Si la razón para crear modelos de simulación es encontrar respuestas a preguntas como ¿Cuáles son los ajustes óptimos para minimizar (o maximizar)?, Entonces la optimización es la tecnología adecuada para combinar con la simulación. La optimización es el proceso de probar diferentes combinaciones de valores para las variables que se pueden controlar para buscar la combinación de valores que proporciona el resultado más deseable del modelo de simulación (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003).

En muchas situaciones, es imposible formular una sola ecuación que describa con precisión el comportamiento de un sistema. Por esta razón, se utilizan técnicas como la simulación para

modelar y estudiar estos sistemas. Aunque la simulación en sí no se optimiza, actúa como una función para informarle (según su modelo del sistema) qué resultados obtendrá de un conjunto dado de factores de entrada (Simrunner, 2002) . La relación entre optimización y simulación se describe en la figura 2.10.



**Figura 2.10 Relación entre algoritmo de optimización y modelo de simulación. Fuente: (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003)**

El problema de optimización de la simulación se expresa más formalmente como (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003):

$$\text{Min o Max } E [ f (X_1, X_2, \dots, X_n ) ]$$

Sujeto a restricciones:

$$\text{Límite inferior } \leq X_i \leq \text{Límite superior} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

Donde:

$E [f (X_1, X_2, \dots, X_n)]$  denota el valor esperado de la función objetivo, que se estima.

### Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos (EA) son una clase de técnicas de búsqueda directa que se basan en conceptos de la teoría de la evolución. Imitan el proceso evolutivo subyacente en el que las entidades se adaptan a su entorno para sobrevivir. Los EA manipulan una población de soluciones a un problema de tal manera que las soluciones deficientes se desvanecen y las buenas soluciones evolucionan continuamente en su búsqueda del óptimo. Las técnicas de búsqueda basadas en este concepto han demostrado ser sólidas, ya que se han utilizado con éxito para resolver una amplia variedad de problemas difíciles (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003).



Por lo general, estos programas comienzan con una fase de inicialización de las entidades y su entorno, y seguidamente ejecutan repetidamente ciclos dentro de los cuales podemos distinguir tres etapas (de la Herrerán Gascón, 1998):

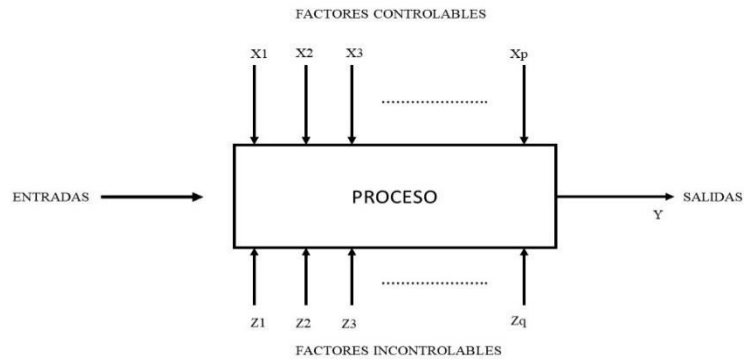
- **Evaluación:** se trata de asignar un valor de peso a cada individuo, en función de lo bien que resuelve el problema.
- **Selección:** ahora debemos clasificar a los agentes en cuatro tipos, según sobrevivan o no, y según se reproduzcan o no, en función de los pesos.
- **Reproducción:** se generan los nuevos individuos, produciéndose algunas mutaciones en los nacimientos.

### 2.15 Diseño y análisis de experimentos

Los experimentos son realizados por los investigadores en prácticamente todos los campos, usualmente para descubrir algo sobre un proceso particular o sistema. Literalmente un experimento es una prueba o una serie de pruebas en las que cambios intencionados son hechos a las variables de entrada de un proceso o sistema para que podamos observar e identificar las razones de cambios que podrían ser observadas en la variable de respuesta.

En general los experimentos son usados para estudiar el desempeño de sistemas y procesos. El sistema o proceso puede ser representado por el modelo mostrado en la figura 2.8. Podemos visualizar el proceso como una combinación de máquinas, métodos, gente y otros recursos que transforman alguna entrada (por lo general un material) en una salida que tiene una o más respuestas observables. Algunas de las variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son controlables mientras que otras  $z_1, z_2, \dots, z_n$  son no controlables (aunque podrían ser controlables para propósitos de experimentación). Los objetivos de un experimento podrían incluir (Douglas, 2001):

- Determinar que variables son las más influyentes sobre la respuesta ‘y’.
- Determinar a qué nivel colocar las x’s influyentes de tal modo que ‘y’ está casi siempre cerca del valor nominal deseado.
- Determinar a qué nivel colocar las x’s de tal modo que el efecto de las z’s se minimice.



**Figura 2.11 Proceso para estudiar el desempeño de sistemas (Douglas, 2001)**

El diseño de experimentos es una herramienta de importancia crítica en el mundo ingenieril para la mejora del desempeño de procesos de manufactura. También tiene extensa aplicación en el desarrollo de nuevos procesos, La aplicación de las técnicas de diseño experimental en etapas tempranas pueden resultar en (Douglas, 2001) :

- Mejora en el rendimiento de procesos
- Reducción de la variabilidad y desempeño más cercano a los requerimientos objetivo o nominales
- Reducción del tiempo de desarrollo
- Reducción de costos generales

### **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. Asimismo, el experimento permite aumentar el conocimiento acerca del sistema (Gutiérrez, 2012).

### **Unidad experimental**

Son las piezas que se utilizan para generar un valor que sea representativo del resultado del resultado del experimento o prueba. En cada estudio experimental es importante definirla de manera cuidadosa, ya que la unidad experimental puede ser una pieza o conjunto de piezas producidas, dependiendo del proceso que se estudia (Gutiérrez, 2012).

### **Factores controlables**

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

### **Tratamiento**

La condición específica del experimento bajo del cual está sujeto la unidad experimental. Es una de las formas que, en cantidad y calidad, el factor a estudiar toma durante el experimento (Badii & Castillo, 2007).

### **Clasificación y selección de los diseños experimentales**

Los cinco aspectos que más influyen en la selección de un diseño experimental son (Gutiérrez, 2012):

- a) El objetivo del experimento.
- b) El número de factores a estudiar.
- c) El número de niveles que se prueban en cada factor.
- d) Los efectos que interesa investigar (relación factores-respuesta)
- e) Los costos del experimento, tiempo y precisión deseada.

Los diseños se pueden clasificar como:

- a) Diseño para comparar dos o más tratamientos.
- b) Diseño para estudiar el efecto de varios factores sobre las respuestas.
- c) Diseño para determinar el punto óptimo de operación del proceso.
- d) Diseño para la optimización de una mezcla.
- e) Diseño para hacer el producto o proceso sensible a factores no controlables.

### **2.16 Estado del arte**

En la tabla 2.1 se estudia la literatura especializada en la cual hasta donde se realizó un profundo estudio no se encontró un estudio idéntico al que en esta investigación se estudia, sin embargo, se encontraron varios temas relacionados a los inventarios de trabajo en proceso, simulación y análisis económico.

**Tabla 2.1 Estado del arte. Fuente: Elaboración propia**

Año	Revista	Título	Autor	Resumen
(2017)	Nova Scientia	Numerical analysis of minimum cost network flow with queuing stations: the M/M/1 case	(Hernández, Flores, Hernández, & Jiménez)	Este documento menciona que los modelos de colas analíticos se utilizan para determinar propiedades tales como el trabajo en proceso, algunas de sus aportaciones son obtener una solución óptima, calcular el trabajo en proceso y el tiempo ciclo de las órdenes de producción. Este artículo me ayuda bastante en relación a los objetivos que se desean demostrar en esta tesis.
(2017)	Scientia iranica	Human errors incorporation in work in process group manufacturing	(Ullah & Sakar)	Aporta un amplio panorama sobre los factores de ruido que se deben considerar al desarrollar un modelo matemático relacionado con el inventario de trabajo en proceso.

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

(2016)	Industrial management & data systems	Monitoring processes through inventory and manufacturing lead time	(Cuatrecasas & Santos)	<p>En el presente trabajo se investiga la relación que existe entre el inventario de trabajo en proceso, lead time de fabricación y tamaños de lotes con la finalidad de verificar si estas relaciones respaldan los principios empíricos de la manufactura esbelta. Dichas relaciones muestran que cuando WIP aumenta, LT también aumenta y viceversa. Finalmente, estas relaciones proporcionan un marco para la reducción de WIP y la reducción de LT de fabricación y están de acuerdo con los principios empíricos de la manufactura esbelta.</p>
2015	Proceeding of the 2015 winter simulation conference	Lean, simulation and optimización: a win-win combination	(Ainhoa, Urenda, & H.C, 2015)	<p>Este documento presenta los beneficios mutuos que se obtienen al combinar lean, simulación y</p>

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

				optimización. Agregar simulación y optimización en la herramientas lean puede fortalecer algunas de las limitaciones de la filosofía lean.
(2013)	Procedia CIRP	Work in process control for a high product mix manufacturing system	(Oladipupo, Q Van, & Erlend)	Aplica modelos matemáticos para regular el WIP a nivel de producto y da a conocer la relación que hay entre diferentes sistemas de planeación y control con el trabajo en proceso.
(2012)	Ingeniería industrial	Aplicación de simulación para el incremento de la productividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca	(Efrain, Moras, Fernández, & Álvarez)	Consultar este artículo me permite tener una idea más clara de la construcción de los escenarios de simulación que se desarrollaran en este trabajo de investigación, así como identificar los factores que se deben tomar en cuenta para su elaboración a fin de

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

				evitar errores en dichos modelos.
(2012)	Conciencia tecnológica	Elementos que afectan el nivel de inventario en proceso (WIP) y los costos de una línea de producción	(Vázquez & Mora)	El presente trabajo me ayuda a comparar con mi trabajo de investigación los elementos que deben considerarse para medir el nivel de inventarios en proceso como la mano de obra directa, los tiempos de entrega de materiales y una distribución de planta eficiente por mencionar algunos.
(2007)	International journal of production research	Economic analysis of inventory systems	(Gurnani)	La consulta de este artículo me ayuda a confirmar la importancia de un análisis económico, así como la diferencia que hay entre un análisis económico respecto a un análisis de costos en inventarios, en un análisis económico se recomienda analizar el flujo de efectivo, se aplican herramientas

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

				como algebra elemental y calculo diferencial.
(2006)	Proceeding of the 2006 winter simulation conference	Why lean needs simulation	(Standrige & Marvel)	En este trabajo se menciona que los métodos lean se han convertido en el enfoque estándar para la solución de problemas de diseño y operativos en producción, sin embargo, el enfoque de lean tiene deficiencias. Estas deficiencias incluyen el modelo y la evaluación de los efectos de la variación haciendo uso de todos los datos disponibles, validando los efectos de los cambios propuestos antes de la implementación identificando otras posibles mejoras y evaluando los efectos de interacción entre el componente del sistema.
(2006)	International journal of	The relationship of work in process	(Rao)	En este trabajo se describe la relación que



## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

	production economics	inventories, manufacturing lead time and waiting line analysis.		existe entre los inventarios de trabajo en proceso, los plazos de entrega y las colas que se acumulan en configuraciones de fabricación típicas, como líneas de flujo y talleres de trabajo. Muestra como la teoría de colas puede jugar un papel muy importante en la comprensión de estos aspectos de fabricación.
(1995)	Calhoun. Mathematical problems in engineering	Economic analysis of production bottlenecks	(Stephen & Buss)	En este documento el concepto de cuello de botella económico permite enmarcar las decisiones de capacidad y demanda en términos de identificar que centros de trabajo limitan los flujos de efectivo. Se desarrollan modelos matemáticos que demuestran que el comportamiento de la minimización de costos conduce a la creación

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

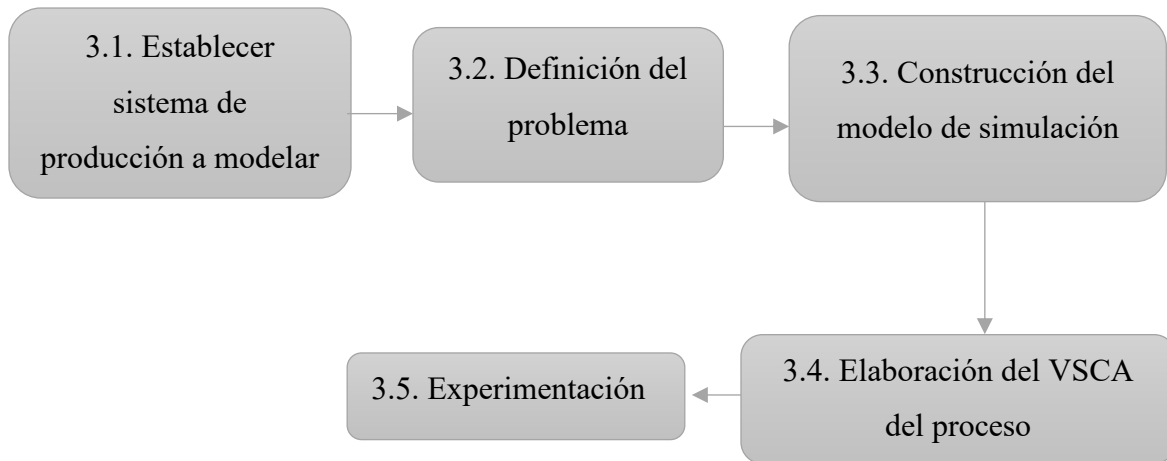
				de cuellos de botella de producción, cuando se desea optimizar recursos es inevitable la creación de cuello de botella.
(1990)	Departmen of manufacturing & engineering systems	WIP cost-related effectiveness measure for the application of an IBE to simulation analysis	(Wu)	<p>Este articulo habla sobre el diseño y desarrollo de una medida de desempeño (costo de WIP) basado en un análisis detallado de la estructura de costos de producción. Este costo WIP permite un análisis simple y efectivo de la operación de producción global y reduce la complejidad de integrar un modelo de simulación por computadora a la operación manufacturera.</p> <p>También se menciona que uno de los problemas de la simulación es la variedad /variabilidad en un proceso manufacturero y para</p>

## CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

				que este sea efectivo debe limitarse.
(1990)	Operations research society of america	How many parts to make at once	(Harris )	Se menciona la importancia al decidir el tamaño de lote de un inventario, los factores y costos que se deben considerar para evitar incurrir a un error. El modelo desarrollado en esta investigación calcula el costo mínimo total en relación a la cantidad óptima que se debe tener de inventario. Puede decirse que este método no es rigurosamente exacto debido a los factores que se excluyen, sin embargo, se puede objetar que los intereses y la depreciación figuran en todos los costos.

### 3 Método

Los pasos que se muestran en la figura 3.1 se desarrollaron para analizar el comportamiento y los costos del inventario de trabajo en proceso en el sistema de producción bajo el supuesto de que sus métodos de fabricación Lean han alcanzado un estado de suficiente madurez. Metodología propuesta por el autor.



**Figura 3.1 Pasos para el desarrollo de la investigación. Fuente: Elaboración propia**

Estableciendo el sistema de producción, se modelará como un sistema de líneas de espera tomando como parámetros de interés, demanda, tiempos de proceso, llegadas, tiempos de espera y WIP.

#### 3.2 Definición del problema

El problema consiste en medir los beneficios financieros y operativos en el sistema simulado con el objetivo de determinar el nivel de servicio que minimiza el costo total esperado del servicio y el costo del inventario máximo de trabajo en proceso. La medición se basa en:

1. Sistema de líneas de espera representado en modelos de simulación de eventos discretos con Promodel para calcular las medidas de desempeño (WIP, total de piezas producidas y tiempo ciclo del proceso, etc) con la finalidad de facilitar el análisis de los costos del flujo de valor.

2. Herramienta de Lean Accounting. VSCA para analizar los costos de producción relacionados al tiempo de espera.
3. Optimización con Simrunner encontrando un valor para el tiempo de inspección y los tiempos entre llegadas de las entidades que minimice los costos del WIP.

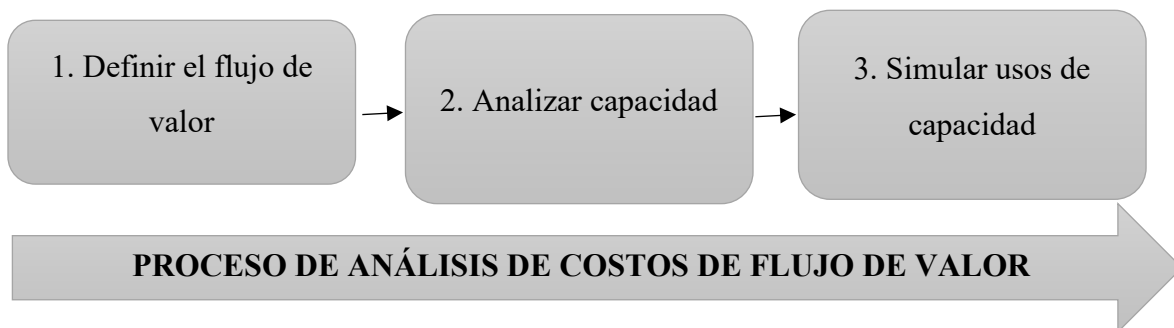
### 3.3 Construcción del modelo de simulación

Para este propósito se consideran las sugerencias de García, García & Cárdenas (2006), Harrell, Ghosh , & Bowden, (2003) y Render, Stair, & Hanna, (2009, 509) las cuales son:

1. Recolección de datos
2. Construcción del modelo
3. Verificación del modelo
4. Validación del modelo
5. Determinación del periodo de calentamiento y número de réplicas

### 3.4 Elaboración del VSCA del proceso

Existen tres pasos, representados en la figura 3.2, para implementar la herramienta análisis de costos de flujo de valor (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011, 391).



**Figura 3.2 Pasos del proceso VSCA. Fuente: (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011)**

El costo del flujo de valor generalmente se calcula semanalmente y tiene en cuenta todos los costos en la corriente de valor como se muestra en la figura 2.2 del capítulo 2. No se hace distinción entre los costos directos e indirectos. Todos los costos de la cadena de valor se consideran directos. Los costos fuera de la cadena de valor no se incluyen.

### 3.5 Experimentación

Usar herramienta Simrunner para determinar el nivel de servicio que minimiza el costo total esperado del servicio y el costo del inventario máximo de trabajo en proceso.

La forma más segura de encontrar la solución óptima es seguir estos pasos (Harrell, Ghosh, & Bowden, 2003):

Paso 1. Identifique todas las variables de decisión posibles que afectan la salida del sistema.

Paso 2. En base a los valores posibles de cada variable de decisión, identifique todas las soluciones posibles.

Paso 3. Evalúa cada una de estas soluciones con precisión.

Paso 4. Compara cada solución de manera justa.

Paso 5. Graba la mejor respuest

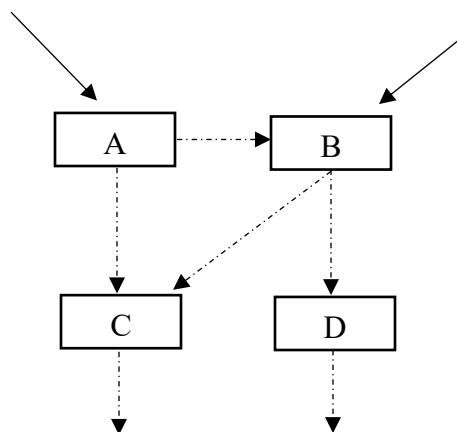
**4 Resultados**

**4.1.1 Establecer sistema de producción a modelar**

El sistema de producción a modelar se extrae de la tesis de (Cabrera, 2009) titulado manual de prácticas de simulación de sistemas discretos con Promodel. El problema es una red de Jackson abierta con 4 nodos (A, B, C y D) mostrado en la figura 4.1. El objetivo principal de esta tesis es elaborar casos prácticos de simulación que se basen en la realidad de los sistemas productivos. Como complemento para este trabajo de investigación se analizan los costos del inventario de trabajo en proceso bajo el enfoque Lean Accounting, y optimización agregando un nuevo modelo de simulación rutas para los operarios y tiempos muertos durante el proceso.

Se selecciona un sistema de producción donde se fabrican piezas metálicas, las cuales se clasifican en 5 categorías, cada categoría con una demanda mensual diferente. El proceso de producción se compone de 4 estaciones (A, B, C y D). En la estación A se trabaja con 3 máquinas, la de B 3 máquinas, la de C 1 máquina y D con 3 máquinas. Las demandas son las siguientes:

Se sabe que el ritmo de producción por hora en una máquina de tipo A es de 2 unidades, el de B de 2 unidades, el de C de 4 unidades y el de D de 2 unidades por hora, con un mes de 20 días y 8 horas diarias de trabajo, se asumen tiempos exponenciales.



**Figura 4.1 Red del sistema.**

**Fuente: (Cabrera, 2009)**

### 4.1.2 Definición del problema

El problema consiste en medir los beneficios financieros y operativos en el sistema simulado con el objetivo de determinar el nivel de servicio que minimiza el costo total de la cadena de flujo de valor sin que se afecte las salidas del producto terminado y pongan en riesgo la satisfacción de la demanda representada en la tabla 4.2. La medición se basa en:

1. Red abierta de Jackson representado en modelos de simulación de eventos discretos con Promodel para calcular las medidas de desempeño (WIP, total de piezas producidas y tiempo ciclo del proceso, etc) con la finalidad de facilitar el análisis de los costos del flujo de valor.
2. Herramienta de Lean Accounting. VSCA para analizar los costos de producción relacionados al tiempo de espera.
3. Optimización con Simrunner encontrando un valor para el tiempo de inspección y los tiempos entre llegadas de los subensambles que minimice los costos del WIP que esperan en la fila y los costos relacionados con el tiempo promedio en inspección.

### 4.1.3 Modelo de simulación

A continuación, se desglosan las etapas básicas para el desarrollo de un modelo de simulación describiendo a detalle lo que se debe realizar en cada uno de estos pasos para garantizar el éxito de un proyecto de simulación.

Para este propósito se consideran las sugerencias de García, García & Cárdenas (2006), Harrell, Ghosh , & Bowden, (2003) y Render, Stair, & Hanna, (2009).

#### 4.1.3.1 Recolección de datos

En esta etapa se establece la información necesaria extraída de Hillier & Lieberman, (2001) Taha, (2007) y Cabrera, (2009) para la construcción del modelo simulado red abierta de Jackson en Promodel, que de acuerdo al sistema representado en la figura 4.1 se definen los siguientes datos en la tabla 4.1 y 4.2 mostrando también las rutas del proceso:



Tabla 4.1 Datos del sistema simulado. Fuente: elaboración propia.

Nodo	$\lambda$ (número de llegadas por unidad de tiempo)	$\mu$ (número de servicios por unidad de tiempo)	S (número de servidores)	$\rho$ (condición de no saturación)
A	4.68	2	3	0.78
B	5.55	2	3	0.95
C	3.01	4	1	0.75
D	4.21	2	3	0.7

Tabla 4.2 Demanda mensual por tipo de pieza y rutas del proceso. Fuente: elaboración propia.

	Pieza tipo a	Pieza tipo b	Pieza tipo c	Pieza tipo d	Pieza tipo e
Demanda	68	409	272	272	136
Recorridos	A,B,C	A,B,D	B,D	A,C	B,C

#### 4.1.3.2 Construcción del modelo

En las figuras 4.2 a la 4.10 se muestran el desglose de las variables de entrada para la construcción del modelo de simulación que describe las locaciones, entidades, llegadas, proceso con tiempos muertos, proceso sin tiempos muertos y lógica del proceso y lógica de movimiento.

```

*****
*                               Locations                               *
*****
Name      Cap      Units Stats      Rules      Cost
-----
Estacion_a      1      3      Time Series Oldest, , First
Estacion_a.1    1      1      Time Series Oldest, ,
Estacion_a.2    1      1      Time Series Oldest, ,      15/hr
Estacion_a.3    1      1      Time Series Oldest, ,      15/hr
Estacion_b      1      3      Time Series Oldest, , First
Estacion_b.1    1      1      Time Series Oldest, ,      20/hr
Estacion_b.2    1      1      Time Series Oldest, ,      20/hr
Estacion_b.3    1      1      Time Series Oldest, ,      20/hr
Estacion_c      1      1      Time Series Oldest, ,      24/hr
Estacion_d      1      3      Time Series Oldest, , First
Estacion_d.1    1      1      Time Series Oldest, ,      27/hr
Estacion_d.2    1      1      Time Series Oldest, ,      27/hr
Estacion_d.3    1      1      Time Series Oldest, ,      27/hr
almacen      INFINITE 1      Time Series Oldest, ,
fila_a      INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
fila_b      INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
fila_c      INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
fila_d      INFINITE 1      Time Series Oldest, FIFO,
    
```

Figura 4.2 Descripción de locaciones. Fuente: elaboración propia.

```

*****
*                               Entities                               *
*****

```

Name	Speed (fpm)	Stats	Cost
pieza_a	150	Time Series	
pieza_b	150	Time Series	
pieza_c	150	Time Series	
pieza_d	150	Time Series	
pieza_e	150	Time Series	

Figura 4.3 Descripción de las entidades. Fuente: elaboración propia.

```

*****
*                               Usage downtimes for Locations        *
*****

```

Loc	Frequency	First Time	Priority	Logic
Estacion_a	100	100	99	GET Mecanico_1 DISPLAY "se descompuso estacion a" WAIT 10 MIN FREE Mecanico_1
Estacion_a.1	100	100	99	GET Mecanico_1 DISPLAY "se descompuso estacion a" WAIT 10 MIN FREE Mecanico_1
Estacion_a.2	100	100	99	GET Mecanico_1 DISPLAY "se descompuso estacion a" WAIT 10 MIN FREE Mecanico_1
Estacion_a.3	100	100	99	GET Mecanico_1 DISPLAY "se descompuso estacion a" WAIT 10 MIN FREE Mecanico_1
Estacion_c	50	50	99	GET Mecanico_2 DISPLAY "se descompuso estacion c" WAIT 15 MIN FREE Mecanico_2

Figura 4.4 Tiempos muertos en las locaciones. Fuente: elaboración propia.

```

*****
*                               Path Networks                        *
*****

```

Name	Type	T/S	From	To	BI	Dist/Time	Speed Factor
Red_1	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	58.83	1
			N2	N3	Bi	159.42	1
Red_2	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	24.32	1
			N2	N3	Bi	121.28	1
Red_3	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	82.80	1
			N2	N3	Bi	83.14	1
Red_4	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	19.65	1
			N2	N3	Bi	132.56	1
Red_5	Passing	Speed & Distance	N1	N2	Bi	16.80	1
			N2	N3	Bi	37.57	1
Red_6	Passing	Speed & Distance	N1	N4	Bi	17.57	1
			N1	N2	Bi	49.64	1
			N2	N3	Bi	65.49	1

Figura 4.5 Rutas de los recursos. Fuente: elaboración propia.

```
*****
*                               Interfaces                               *
*****
```

Net	Node	Location
Red_1	N1	Estacion_a
	N2	fila_b
Red_2	N1	Estacion_a
	N2	fila_c
Red_3	N2	fila_c
	N1	Estacion_b
Red_4	N1	Estacion_b
	N2	fila_d
Red_5	N1	Estacion_c
	N2	almacen
Red_6	N1	Estacion_d
	N2	almacen

Figura 4.6 Descripción de interfases. Fuente: elaboración propia.

```
*****
*                               Resources                               *
*****
```

Name	Units	Stats	Res Search	Ent Search	Path	Motion
operario_1	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_1 Home: N1	Empty: 15 fpm Full: 12 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
operario_2	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_2 Home: N1	Empty: 15 fpm Full: 12 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
operario_3	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_3 Home: N1	Empty: 15 fpm Full: 12 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
operario_4	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_4 Home: N1	Empty: 15 fpm Full: 12 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
Operario_5	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_5 Home: N1	Empty: 15 fpm Full: 12 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
Operario_6	2	By Unit	Closest	Oldest	Red_6 Home: N1	Empty: 15 fpm Full: 12 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
Mecanico_1	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_1 Home: N1	Empty: 150 fpm Full: 150 fpm Pickup: 3 Seconds Deposit: 6 Seconds
Mecanico_2	1	By Unit	Closest	Oldest	Red_5 Home: N4	Empty: 150 fpm Full: 150 fpm

Figura 4.7 Descripción de recursos. Fuente: elaboración propia.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

```

*****
*                               Processing                               *
*****

```

Entity	Location	Process	Blk	Output	Routing	Move Logic
ALL	fila_a	<pre> IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_a THEN &lt; INC ingA RENAME AS pieza_a INC ing_tot INC WIP_a &gt; IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_b THEN &lt; INC ingB RENAME AS pieza_b INC ing_tot INC WIP_b &gt; IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_d THEN &lt; INC ingD RENAME AS pieza_d INC ing_tot INC WIP_d &gt; INC WIP_general </pre>				
ALL	Estacion_a	<pre> WAIT E&lt;30&gt; Rb1 = 3*1/E&lt;30&gt; </pre>	1	ALL	Estacion_a	FIRST 1
ALL	fila_b	<pre> IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_c THEN &lt; INC ingC RENAME AS pieza_c INC ing_tot INC WIP_c &gt; IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_e THEN &lt; INC ingE RENAME AS pieza_e INC ing_tot INC WIP_e &gt; </pre>	1	<pre> pieza_a  fila_b pieza_b  fila_b pieza_d  fila_c </pre>	<pre> IF ENTITY&lt;&gt;=pieza_a. 1 IF ENTITY&lt;&gt;=pieza_b IF ENTITY&lt;&gt;=pieza_d </pre>	
ALL	Estacion_b	<pre> Rb2 = 3 * 1/E&lt;30&gt; WAIT E&lt;30&gt; </pre>	1	ALL	Estacion_b	FIRST 1
ALL	fila_c		1	<pre> pieza_a  fila_c pieza_e  fila_c pieza_b  fila_d pieza_c  fila_d </pre>	<pre> IF ENTITY&lt;&gt;= pieza_a. 1 IF ENTITY&lt;&gt;= pieza_e IF ENTITY&lt;&gt;= pieza_b IF ENTITY&lt;&gt;= pieza_c </pre>	MOVE FOR 5 MIN
ALL	fila_d		1	ALL	Estacion_d	FIRST 1
ALL	Estacion_c	<pre> Rb3 = 1/E&lt;15&gt; WAIT E&lt;15&gt; WAIT E&lt;15&gt; IF ENTITY&lt;&gt;=pieza_a THEN &lt; INC procA INC proc_tot DEC WIP_a &gt; IF ENTITY&lt;&gt;=pieza_d THEN &lt; INC procD INC proc_tot DEC WIP_d &gt; IF ENTITY&lt;&gt;=pieza_e THEN &lt; INC procE INC proc_tot DEC WIP_e &gt; </pre>	1	ALL	almacen	FIRST 1
ALL	Estacion_d	<pre> Rb4 = 3 * 1/E&lt;30&gt; WAIT E&lt;30&gt; IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_b THEN &lt; INC procB INC proc_tot DEC WIP_b &gt; IF ENTITY&lt;&gt; = pieza_c THEN &lt; INC procC INC proc_tot DEC WIP_c &gt; DEC WIP_general </pre>	1	ALL	almacen	FIRST 1
ALL	almacen	<pre> dia = int(clock(hr)/8)*1 WAIT UNTIL int(dia/10)=dia/10 </pre>	1	ALL	EXIT	FIRST 1

```

CI_a = CLOCK< MIN> - att_a
CI_general = CI_a
CI_b = CLOCK< MIN> - att_b
CI_general = CI_b
CI_c = CLOCK< MIN> - att_c
CI_general = CI_c
CI_d = CLOCK< MIN> - att_d
CI_general = CI_d
CI_e = CLOCK< MIN> - att_e
CI_general = CI_e
LOG "tiempo de ciclo a". att_a
LOG "tiempo de ciclo b". att_b
LOG "tiempo de ciclo c". att_c
LOG "tiempo de ciclo d". att_d
LOG "tiempo de ciclo e". att_e

```

Figura 4.8 Descripción del proceso sin tiempos muertos. Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

```

*****
*                               Processing                               *
*****

```

Entity	Location	Process	Blk	Output	Routing	Destination Rule	Move Logic
ALL	fila_a	IF ENTITY() = pieza_a THEN < INC ingA RENAME AS pieza_a INC ing_tot INC WIP_a > IF ENTITY() = pieza_b THEN < INC ingB RENAME AS pieza_b INC ing_tot INC WIP_b > IF ENTITY() = pieza_d THEN < INC ingD RENAME AS pieza_d INC ing_tot INC WIP_d > INC WIP_general MOVE	1	ALL	Estacion_a	FIRST 1	
ALL	Estacion_a	GET operario_1 WAIT E(30) Rb1 = 3 * 1/E(30) FREE operario_1	1	pieza_a pieza_b pieza_d	fila_b fila_b fila_c	IF ENTITY()=pieza_a, 1 IF ENTITY()=pieza_b IF ENTITY()=pieza_d	MOVE WITH operario_1 FOR 5 SEC THEN FREE MOVE WITH operario_1 FOR 5 SEC THEN FREE MOVE WITH operario_2 FOR 5 SEC THEN FREE
ALL	fila_b	IF ENTITY() = pieza_c THEN < INC ingC RENAME AS pieza_c INC ing_tot INC WIP_c > IF ENTITY() = pieza_e THEN < INC ingE RENAME AS pieza_e INC ing_tot INC WIP_e >	1	ALL	Estacion_b	FIRST 1	MOVE FOR 5 SEC
ALL	Estacion_b	Rb2 = 3 * 1/E(30) WAIT E(30)	1	pieza_a pieza_e pieza_b pieza_c	fila_c fila_c fila_d fila_d	IF ENTITY()= pieza_a, 1 IF ENTITY()= pieza_e IF ENTITY()= pieza_b IF ENTITY()= pieza_c	MOVE WITH operario_3 FOR 5 SEC THEN FREE MOVE WITH operario_3 FOR 5 SEC THEN FREE MOVE WITH operario_4 FOR 5 SEC THEN FREE MOVE WITH operario_4 FOR 5 SEC THEN FREE
ALL	fila_c		1	ALL	Estacion_c	FIRST 1	MOVE FOR 5 SEC
ALL	fila_d		1	ALL	Estacion_d	FIRST 1	MOVE FOR 5 SEC
ALL	Estacion_c	Rb3 = 1/E(15) WAIT E(15) IF ENTITY()=pieza_a THEN < INC procA INC proc_tot DEC WIP_a > IF ENTITY()=pieza_d THEN < INC procD INC proc_tot DEC WIP_d > IF ENTITY()=pieza_e THEN < INC procE INC proc_tot DEC WIP_e >	1	ALL	almacen	FIRST 1	MOVE WITH Operario_5 FOR 2 SEC THEN FREE
ALL	Estacion_d	Rb4 = 3 * 1/E(30) WAIT E(30) IF ENTITY() = pieza_b THEN < INC procB INC proc_tot DEC WIP_b > IF ENTITY() = pieza_c THEN < INC procC INC proc_tot DEC WIP_c > DEC WIP_general	1	ALL	almacen	FIRST 1	MOVE WITH Operario_6 FOR 2 SEC THEN FREE
ALL	almacen	dia = int(clock(hr)/8)+1 WAIT UNTIL int(dia/10)=dia/10	1	ALL	EXIT	FIRST 1	CT_a = CLOCK( MIN) - att_a CT_general = CT_a CT_b = CLOCK( MIN) - att_b CT_general = CT_b CT_c = CLOCK( MIN) - att_c CT_general = CT_c CT_d = CLOCK( MIN) - att_d CT_general = CT_d CT_e = CLOCK( MIN) - att_e CT_general = CT_e LOG "tiempo de ciclo a", att_a LOG "tiempo de ciclo b", att_b LOG "tiempo de ciclo c", att_c LOG "tiempo de ciclo d", att_d LOG "tiempo de ciclo e", att_e

Figura 4.9 Descripción del proceso con tiempos muertos. Fuente: elaboración propia.

```

*****
*                               Arrivals                               *
*****
Entity  Location Qty Each  First Time Occurrences Frequency      Logic
-----
pieza_a  fila_a   1      0      68      E<160/68*60> att_a = CLOCK< MIN>
pieza_b  fila_a   1      0     409      E<160/409*60> att_b = CLOCK< MIN>
pieza_c  fila_b   1      0     272      E<160/272*60> att_c = CLOCK< MIN>
pieza_d  fila_a   1      0     272      E<160/272*60> att_d = CLOCK< MIN>
pieza_e  fila_b   1      0     136      E<160/136*60> att_e = CLOCK< MIN>

```

Figura 4.10 Descripción de las llegadas. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.3.3 Verificación del modelo

Para la verificación del modelo de simulación se inspecciono de manera visual el comportamiento de las variables de entrada para comprobar su correcto funcionamiento y validar que todos los parámetros usados en la descripción del sistema funcionan correctamente.

#### 4.1.3.4 Validación del modelo

El proceso de validación del sistema simulado consiste en realizar una serie de pruebas con la información de entrada real que se describe en la recolección de datos para ratificar su comportamiento y analizar sus resultados. En este caso se analiza el comportamiento de los arribos al sistema real el cual se define en datos históricos que las piezas llegan a la estación C con una distribución poisson, a una tasa promedio  $\lambda = 3.01$ . Para replantear el proceso de llegadas se toma una muestra aleatoria contando el número de piezas que llegan a la estación de inspección, los datos agrupados se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Frecuencias observadas. Fuente: elaboración propia.

Número de piezas	Observaciones
0	2
1	2
2	9
3	13
4	13
5	8
6 o más	3
Total	50

A partir del parámetro definido para los datos se plantean las hipótesis que se desean probar:

$$H_0: \text{Poisson } (\lambda = 3)$$

$H_1$ : Otro tipo de distribución

Las pruebas de hipótesis son realizadas mediante la aplicación de Fit de Stat:Fit con un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  mostrando en la figura 4.11 que no se rechaza  $H_0$ , los datos se comportan de acuerdo a una distribución poisson cercanos a  $\lambda = 3.01$ .

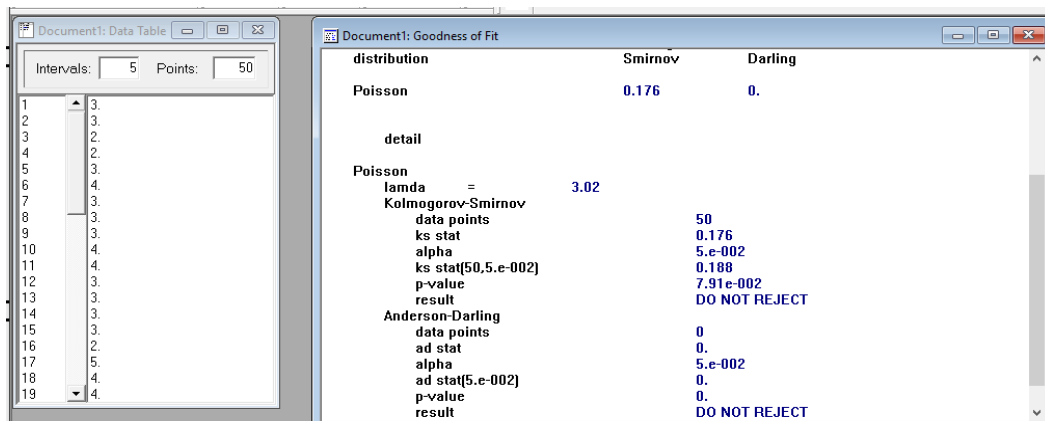
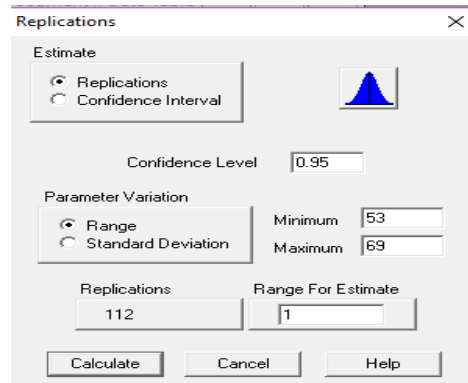


Figura 4.11 Resultados de prueba de hipótesis. Fuente: elaboración propia

#### 4.1.3.5 Determinación del periodo de calentamiento

Para iniciar la corrida del modelo se ejecutó una simulación preliminar del sistema con 30 réplicas, bajo este contexto se definieron el número de réplicas considerando un error máximo permitido de 1, por lo que se definió  $e = 1$ . Además, se estableció un nivel de confianza del 95%. De esta manera, se definió entonces un tamaño de 112 réplicas como se muestra en la figura 4.12 garantizando así la estabilidad de los resultados. Es importante mencionar que para llevar a cabo la estimación se tomó como base el total de piezas tipo a que salen del sistema.



**Figura 4.12 Número de réplicas para modelo de simulación. Fuente: elaboración propia**

En este capítulo se desarrollan detalladamente los resultados obtenidos de acuerdo con los pasos de la metodología propuesta.

En el modelo de simulación se estima la cantidad de tiempo necesario para que el sistema se estabilice o caliente (Promodel, 2011), se tomó como referencia la variable WIP, este tiempo de calentamiento terminó alrededor de 12000 segundos (3.33 horas). Para evitar un sesgo en el modelo se toma un periodo de calentamiento de 5 horas. Al estimar el periodo de calentamiento de 5 horas las observaciones informadas en la salida de simulación ya no se verán afectadas.

#### **4.1.4 Elaboración de VSCA del proceso**

Una vez validado el modelo de simulación se extraen los resultados arrojados por Promodel como son: tiempo ciclo, WIP, total de piezas producidas, tiempo de espera, etc, facilitando el análisis de costos de flujo de valor.

Existen tres pasos, representado anteriormente en la etapa del método, figura 3.2. para implementar la herramienta análisis de costos de flujo de valor (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011).

El costo del flujo de valor generalmente se calcula semanalmente y tiene en cuenta todos los costos en la corriente de valor. No se hace distinción entre los costos directos e indirectos. Todos los costos de la cadena de valor se consideran directos. En este caso se incluyen los costos del WIP y costos de operación.



**4.1.4.1 Definir el flujo de valor**

De acuerdo a la metodología propuesta en el flujo de valor se muestran en la tabla 4.4 las operaciones del sistema, sus tiempos y sus puestos de trabajo para la situación actual. Para definir el flujo de valor se ha elegido el periodo mensual, suponiendo que se labora un turno diario de 8 horas de lunes a viernes (1 mes = 20 días x 8 horas / día).

**Tabla 4.4 Operación y número de trabajadores en el sistema de producción. Fuente: elaboración propia**

Proceso	Descripción	Tiempo (min) (por máquina)	Número de trabajadores
Estación A	Corte	Exponencial 30	2
Estación B	Pulido	Exponencial 30	2
Estación C	Pintura	Exponencial 15	1
Estación D	Estampado	Exponencial 30	2
Total		105	7

**4.1.5 Analizar capacidad**

A continuación, en la tabla 4.5, se muestran los análisis operativos del sistema de producción con las medidas de desempeño de mayor importancia que deben controlarse (Maskell, Baggaley, & Grasso, 2011) las cuales se calcularon con Promodel. En la productividad de unidades por mes se observa que no se cumple con la demanda de ningún tipo de pieza.

**Tabla 4.5 Resumen operativo actual sin tiempos muertos. Fuente: elaboración propia.**

	Resumen operativo			
	Tiempo ciclo (min)	Número de piezas ingresadas al sistema por mes	Productividad (unidades/mes)	WIP
Pieza tipo a	9592.01	65	60	12
Pieza tipo b	9590.53	400	368	48
Pieza tipo c	9587.78	266	249	30
Pieza tipo d	9588.34	265	260	20
Pieza tipo e	9590.68	132	123	20
Total	47949.34	1128	1060	130

En la tabla 4.6 se muestra un resumen operativo con los paros de mantenimiento debido a las fallas las máquinas en las estaciones a y c donde se puede observar una reducción en la productividad de unidades por mes y un incremento en el WIP.

**Tabla 4.6 Resumen operativo actual con tiempos muertos. Fuente: elaboración propia**

Resumen operativo				
	Tiempo ciclo (min)	Numero de piezas ingresadas al sistema por mes	Productividad (unidades/mes)	WIP
Pieza tipo a	33511.67	68	26	65
Pieza tipo b	33487.88	409	155	392
Pieza tipo c	33526.98	272	271	158
Pieza tipo d	33478.753	272	101	253
Pieza tipo e	33526.98	136	101	80
Total	167532.263	1157	654	948

Para llevar a cabo la aplicación del VSC se ha elegido el periodo mensual ya antes mencionado y se han considerado como centros de costos: las estaciones de trabajo (nodos) A, B, C y D del sistema simulado. A partir de aquí se han tomado en cuenta los consumos de materiales extraídos de Ruiz de Arbulo & Díaz de Basurto, (2008), (\$48000 pesos, correspondientes a la capacidad de producción total de 1128 piezas, esto corresponde al total de piezas que entran al sistema, es decir, pieza tipo a, b, c, d y e, los costos de personal (\$4000 / mes por persona), los costes de amortizaciones (nodos A, B y D \$8000 para la nodo C \$3000), costos de WIP es de \$80 pesos por pieza, costos de operación para el nodo A \$15, nodo B \$20, nodo C \$24 y nodo D \$27 y otros costes correspondientes a los consumos de materias principales en cada una de las instalaciones. Es importante mencionar que por el momento no se consideran los paros de maquinaria pues los precios y los costos de las piezas están calculados con el modelo original. Los costos de WIP y costos de operación se obtuvieron de (Taha, 2007).

La tabla 4.7 muestra los costos totales de la cadena de valor, en el proceso que suman la cantidad de \$ 384252.4 pesos.

**Tabla 4.7 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del proceso. Fuente: elaboración propia**

Costos de flujo de valor	Costos de material (\$)	Costos de personal (\$)	Costos de amortización (\$)	Costos de WIP (\$)	Costos de operación (\$)	Costos de maquinaria (\$)	Costos de mantenimiento (\$)	Otros costos	Costo total
Nodo A	48000	8000	8000	1840	2081.71	25000	7317.37		100239.1
Nodo B	48000	8000	8000	6000	5821.79	25000	7317.37	1973.62	110112.8
Nodo C	48000	4000	3000	2000	1587.36	10000	2439.12		71026.48
Nodo D	48000	8000	8000	880	5676.65	25000	7317.37		102874
Total	192000	28000	27000	10720	15167.51	85000	24391.23333	1973.62	384252.4

Debido a que no todas las piezas pasan por el mismo proceso se realiza un costeo de flujo de valor para cada pieza tomando como referencia la ruta del proceso, en las tablas 4.8 a la 4.12 se presentan los costos totales del flujo de valor para el tipo de pieza a, b, c, d y e respectivamente.

**Tabla 4.8 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza a. Fuente: elaboración propia**

Costos de flujo de valor	Costos de material (\$)	Costos de personal (\$)	Costos de amortización (\$)	Costos de WIP (\$)	Costos de operación (\$)	Costos de maquinaria (\$)	Costos de mantenimiento (\$)	Otros costos	Costo total
Estación A	48000	8000	8000	1840	2081.71	25000	7317.37		100239.1
Estación B	48000	8000	8000	6000	5821.79	25000	7317.37	1973.62	110112.8
Estación C	48000	4000	3000	2000	1587.36	10000	2439.12		71026.48
Total	144000	20000	19000	9840	9490.86	60000	17073.86	1973.62	281378.3

**Tabla 4.9 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza b. Fuente: elaboración propia**

Costos de flujo de valor	Costos de material (\$)	Costos de personal (\$)	Costos de amortización (\$)	Costos de WIP (\$)	Costos de operación (\$)	Costos de maquinaria (\$)	Costos de mantenimiento (\$)	Otros costos	Costo total
Estación A	48000	8000	8000	1840	2081.71	25000	7317.37		100239.1
Estación B	48000	8000	8000	6000	5821.79	25000	7317.37	1973.62	110112.8
Estación D	48000	8000	8000	880	5676.65	25000	7317.37		102874
Total	144000	24000	24000	8720	13580.15	75000	21952.11	1973.62	313225.9

**Tabla 4.10 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza c. Fuente: elaboración propia**

Costos de flujo de valor	Costos de material (\$)	Costos de personal (\$)	Costos de amortización (\$)	Costos de WIP (\$)	Costos de operación (\$)	Costos de maquinaria (\$)	Costos de mantenimiento (\$)	Otros costos	Costo total
Estación B	48000	8000	8000	6000	5821.79	25000	7317.37	1973.62	110112.8
Estación D	48000	8000	8000	880	5676.65	25000	7317.37		102874
Total	96000	16000	16000	6880	11498.44	50000	14634.74	1973.62	212986.8

**Tabla 4.11 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza d. Fuente: elaboración propia**

Costos de flujo de valor	Costos de material (\$)	Costos de personal (\$)	Costos de amortización (\$)	Costos de WIP (\$)	Costos de operación (\$)	Costos de maquinaria (\$)	Costos de mantenimiento (\$)	Otros costos	Costo total
Estación A	48000	8000	8000	1840	2081.71	25000	7317.37		100239.1
Estación C	48000	4000	3000	2000	2694.1	10000	2439.12		72133.22
Total	96000	12000	11000	3840	4775.81	35000	9756.49		172372.3

**Tabla 4.12 Costos del flujo de valor (VSC) de la situación actual del sistema de producción para el tipo de pieza e. Fuente: elaboración propia**

Costos de flujo de valor	Costos de material (\$)	Costos de personal (\$)	Costos de amortización (\$)	Costos de WIP (\$)	Costos de operación (\$)	Costos de maquinaria (\$)	Costos de mantenimiento (\$)	Otros costos	Costo total
Estación B	48000	8000	8000	6000	8060.17	25000	7317.37	1973.62	112351.2
Estación C	48000	4000	3000	2000	1587.36	10000	2439.12		71026.48
Total	96000	12000	11000	8000	9647.53	35000	9756.49	1973.62	183377.6

Los resultados financieros se recolectan para la cadena del flujo de valor total (value stream), los cuales se resumen para el periodo elegido (en este caso, el mes) y el cálculo del costo promedio para cada tipo de pieza se obtiene dividiendo el costo total de la cadena de valor entre el número de unidades producidas.

- Costo promedio por unidad para pieza tipo a =  $\frac{281378.3}{60} = 4689.64$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo b =  $\frac{313225.9}{368} = 851.16$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo c =  $\frac{212986.8}{249} = 855.37$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo d =  $\frac{172372.3}{260} = 662.97$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo e =  $\frac{183377.6}{123} = 1490.88$

A continuación, para fines del proyecto de investigación se calcula el costo promedio por unidad para cada tipo de pieza considerando el modelo de simulación con tiempos muertos.

- Costo promedio por unidad para pieza tipo a =  $\frac{281378.3}{26} = 10822.24$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo b =  $\frac{313225.9}{155} = 2020.81$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo c =  $\frac{212986.8}{271} = 785.92$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo d =  $\frac{172372.3}{101} = 1706.65$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo e =  $\frac{183377.6}{101} = 1815.61$

**4.1.5.1 Introducción de cuentas de resultados por cadena de valor**

En la tabla 4.13 se muestra el precio unitario de venta para cada tipo de pieza tomando como referencia el modelo de simulación sin tiempos muertos. Típicamente para calcular el precio de venta unitario se suma el 85% del costo promedio por unidad (Hingston, 2002). También se puede observar que solo las piezas tipo c y e tienen ganancias pues el resto de ellas, el costo promedio considerado con tiempos muertos, está por arriba del precio unitario de venta calculado anteriormente con los costos totales del flujo de valor del modelo de simulación sin paros de maquinaria.

**Tabla 4.13 Precio de venta para cada tipo de pieza. Fuente: elaboración propia.**

<b>Precio unitario de venta</b>	
<b>Pieza</b>	<b>Precio (\$)</b>
Tipo a	8675.83
Tipo b	1574.65
Tipo c	1582.43
Tipo d	1226.49
Tipo e	2758.13

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

En las tablas 4.14 a 4.18 se desarrollarán las cuentas de resultados de la empresa por cadenas de valor para calcular el beneficio de la planta para cada una de las piezas producidas donde se muestran los beneficios totales de la planta sin y con tiempos muertos para los tipos de pieza.

**Tabla 4.14 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza a. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza a sin tiempos muertos			Tipo de pieza a con tiempos muertos		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	520550.04	520550.04	520550.04	225571.684	225571.684	225571.684
Costo de materiales	144000	6833.77	150833.77	144000	6833.77	150833.77
Costo de personal	20000	483.6	20483.6	20000	483.6	20483.6
Costo de amortización	19000		19000	19000		19000
Costos de WIP	960		960	5200		5200
Costo de operación	16224.05		16224.05	16224.05		16224.05
Beneficio / pérdidas del value stream	320365.99	513232.67	313048.62	21147.634	218254.314	13830.264
Gastos generales			5973.62			5973.62
Beneficios planta			307075			7856.644

**Tabla 4.15 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza b. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza b sin tiempos muertos			Tipo de pieza b con tiempos muertos		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	579469.728	579469.728	579469.728	244070.13	244070.13	244070.13
Costo de materiales	144000	6833.77	150833.77	144000	6833.77	150833.77
Costo de personal	24000	483.6	24483.6	24000	483.6	24483.6
Costo de amortización	24000		24000	24000		24000
Costos de WIP	3840		3840	31360		31360
Costo de operación	21873.03		21873.03	21873.03		21873.03
Beneficio / pérdidas del value stream	361756.698	572152.358	354439.328	-1162.9	236752.76	-8480.27
Gastos generales			5973.62			5973.62
Beneficios planta			348465.708			-14453.89

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

**Tabla 4.16 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza c. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza c sin tiempos muertos		Tipo de pieza c con tiempos muertos	
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	394026.1905	394026.1905	428839.7495	428839.7495
Costo de materiales	96000	96000	96000	96000
Costo de personal	16000	16000	16000	16000
Costo de amortización	16000	16000	16000	16000
Costos de WIP	2400	2400	12640	12640
Costo de operación	16403.25	16403.25	16403.25	16403.25
Beneficio / pérdidas del value stream	247222.9405	247222.9405	271796.4995	271796.4995
Gastos generales		5973.62		5973.62
Beneficios planta		241249.3205		265822.8795

**Tabla 4.17 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza d. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza d sin tiempos muertos			Tipo de pieza d con tiempos muertos		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	318888.57	318888.57	333606.504	123875.9445	123875.9445	123875.9445
Costo de materiales	96000	6833.77	102833.77	96000	6833.77	102833.77
Costo de personal	12000	468	12468	12000	468	12468
Costo de amortización	11000		11000	11000		11000
Costos de WIP	1600		1600	20240		20240
Costo de operación	8163.88		8163.88	8163.88		8163.88
Beneficio / pérdidas del value stream	190124.69	311586.8	197540.854	-23527.9355	116574.1745	-30829.7055
Gastos generales			4000			4000
Beneficios planta			193540.854			-34829.7055

**Tabla 4.18 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza e. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza e sin tiempos muertos			Tipo de pieza e con tiempos muertos		
	Manufactura flujo de valor 1 (S)	Mantenimiento flujo de valor 2 (S)	Total planta (S)	Manufactura flujo de valor 1 (S)	Mantenimiento flujo de valor 2 (S)	Total planta (S)
Ventas	339249.744	339249.744	339249.744	278570.928	278570.928	278570.928
Costo de materiales	96000	6833.77	102833.77	96000	6833.77	102833.77
Costo de personal	12000	468	12468	12000	468	12468
Costo de amortización	11000		11000	11000		11000
Costos de WIP	1600		1600	6400		6400
Costo de operación	10754.27		10754.27	10754.27		10754.27
Beneficio / pérdidas del value stream	207895.474	331947.974	200593.704	142416.658	271269.158	135114.888
Gastos generales			5973.62			5973.62
Beneficios planta			194620.084			129141.268

En las tablas 4.15 y 4.17 se observa que los tipos de piezas b y d con tiempos muertos está generando el -104.15% y -118% respectivamente ganancias a la empresa.

En esta investigación se plantea el objetivo de generar ganancias para todos los tipos de piezas producidas, incrementado la producción y reduciendo los costos de WIP. A continuación, se empleará la etapa de experimentación en simrunner para obtener los mejores tiempos de proceso y llegadas que haga cumplir el objetivo.



### 4.1.1 Experimentación

Una vez analizados los costos bajo el enfoque Lean Accounting se procedió a su utilización con fines de optimización y así cumplir con los objetivos fijados en la investigación. Se toma como variable respuesta los costos de hacer que los subensambles esperen en la fila dentro de la función objetivo mostrado en las ecuaciones 4.2 a 4.5. Se plantea como objetivo encontrar la tasa de servicio y el tiempo entre llegadas de las entidades que minimice el costo total de la cadena de flujo de valor.

- $MIN CT = (C1 * \text{fila a maximum contents})$  **Ecuación (4.2)**
- $MIN CT = (C1 * \text{fila b maximum contents})$  **Ecuación (4.3)**
- $MIN CT = (C1 * \text{fila c maximum contents})$  **Ecuación (4.4)**
- $MIN CT = (C1 * \text{fila d maximum contents})$  **Ecuación (4.5)**

Donde:

C1: Costo por mantener el WIP en el sistema

Fila maximum contents: Número máximo de WIP en el transcurso de simulación

Las restricciones (variables de decisión) para el problema se identifican de la siguiente manera:

- $137 \leq X_1 \leq 142$
- $19 \leq X_2 \leq 24$
- $31 \leq X_3 \leq 36$
- $66 \leq X_4 \leq 71$
- $25 \leq X_5 \leq 30$
- $10 \leq X_6 \leq 15$

Donde:

- $X_1$ : Tiempo entre llegadas de pieza a – fila a
- $X_2$ : Tiempo entre llegadas de pieza b – fila a
- $X_3$ : Tiempo entre llegadas de pieza c y d – fila b
- $X_4$ : Tiempo entre llegadas de pieza e – fila a
- $X_5$ : Tiempo de proceso en estación A, B y D

- $X_6$ : Tiempo de proceso en estación C

Para poder ejecutar el modelo de optimización en Simrunner se incluyen macros o variables de decisión en el modelo de simulación para las variables que se desean optimizar (Simrunner, 2002), para este caso se agregan los tiempos entre llegadas de cada tipo de pieza y los tiempos de proceso en cada estación como ya se mencionó anteriormente.

**4.1.1.1 Optimización**

La ejecución de 25 experimentos en el módulo de optimización del Simrunner resultando como mejor solución el experimento 6. En la tabla 4.19 se muestran las sugerencias que hace Simrunner para reducir el inventario de trabajo en proceso y sus costos tanto de WIP como para los tiempos de proceso.

**Tabla 4.19 Variables para el sistema de producción simulado propuestas por Simrunner. Fuente: elaboración propia.**

<b>Tiempos de proceso y tiempos entre llegadas de las entidades al sistema propuesto por simrunner</b>	
<b>Variable</b>	<b>Tiempos exponenciales</b>
Arrivos pieza a - fila a	142
Arrivos pieza b - fila a	24
Arrivos pieza c y d - fila a y b	36
Arrivos pieza e - fila b	71
Tiempos de proceso C	13
Tiempos de proceso A, B y D	25

A continuación, se analiza nuevamente la cuenta de resultados por cadena de valor para cada tipo de pieza con los nuevos tiempos de proceso y llegadas de las entidades al sistema propuesto por simrunner.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

**Tabla 4.20 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza a. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza a con tiempos muertos - variables actuales de trabajo			Tipo de pieza a con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	225571.684	225571.684	225571.684	268950.854	268950.854	268950.854
Costo de materiales	144000	6833.77	150833.77	144000	7517.14	151517.14
Costo de personal	20000	483.6	20483.6	20000	468	20468
Costo de amortización	19000		19000	19000		19000
Costos de WIP	5200		5200	4800		4800
Costo de operación	16224.05		16224.05	16224.05		16224.05
Beneficio / pérdidas del value stream	21147.634	218254.314	13830.264	64926.804	260965.714	56941.664
Gastos generales			5973.62			5973.62
Beneficios planta			7856.644			50968.044

En la tabla 4.21 se puede observar que con las variables propuestas por simrunner en las corridas de experimentación, se generan ganancias en la producción del tipo de pieza b.

**Tabla 4.21 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza b. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza b con tiempos muertos - variables actuales de trabajo			Tipo de pieza b con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	244070.13	244070.13	244070.13	302332.032	302332.032	302332.032
Costo de materiales	144000	6833.77	150833.77	144000	7517.147	151517.147
Costo de personal	24000	483.6	24483.6	24000	468	24468
Costo de amortización	24000		24000	24000		24000
Costos de WIP	31360		31360	30400		30400
Costo de operación	21873.03		21873.03	21873.03		21873.03
Beneficio / pérdidas del value stream	-1162.9	236752.76	-8480.27	58059.002	294346.885	50073.855
Gastos generales			5973.62			5973.62
Beneficios planta			-14453.89			44100.235

**Tabla 4.22 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza c. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza c con tiempos muertos - variables actuales de trabajo		Tipo de pieza c con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner	
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	428839.7495	428839.7495	430422.184	430422.184
Costo de materiales	96000	96000	96000	96000
Costo de personal	16000	16000	16000	16000
Costo de amortización	16000	16000	16000	16000
Costos de WIP	12640	12640	9840	9840
Costo de operación	16403.25	16403.25	16403.25	16403.25
Beneficio / pérdidas del value stream	271796.4995	271796.4995	276178.934	276178.934
Gastos generales		5973.62		5973.62
Beneficios planta		265822.8795		270205.314

En la tabla 4.23 se puede observar que con las variables propuestas por simrunner en las corridas de experimentación, continúan las pérdidas en la producción del tipo de pieza d.

**Tabla 4.23 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza d. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza d con tiempos muertos - variables actuales de trabajo			Tipo de pieza d con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	123875.9445	123875.9445	123875.9445	156991.296	156991.296	156991.296
Costo de materiales	96000	6833.77	102833.77	96000	7517.147	103517.147
Costo de personal	12000	468	12468	12000	460.2	12460.2
Costo de amortización	11000		11000	11000		11000
Costos de WIP	20240		20240	19600		19600
Costo de operación	8163.88		8163.88	8163.88		8163.88
Beneficio / pérdidas del value stream	-23527.9355	116574.1745	-30829.7055	10227.416	149013.949	2250.069
Gastos generales			4000			4000
Beneficios planta			-34829.7055			-1749.931

**Tabla 4.24 Cuenta de resultados por cadena de valor para tipo de pieza e. Fuente: elaboración propia.**

	Tipo de pieza e con tiempos muertos - variables actuales de trabajo			Tipo de pieza e con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner		
	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)	Manufactura flujo de valor 1 (\$)	Mantenimiento flujo de valor 2 (\$)	Total planta (\$)
Ventas	278570.928	278570.928	278570.928	375105.408	375105.408	375105.408
Costo de materiales	96000	6833.77	102833.77	96000	7517.140	103517.14
Costo de personal	12000	468	12468	12000	460.2	12460.2
Costo de amortización	11000		11000	11000		11000
Costos de WIP	6400		6400	4960		4960
Costo de operación	10754.27		10754.27	10754.27		10754.27
Beneficio / pérdidas del value stream	142416.658	271269.158	135114.888	240391.138	367128.068	232413.798
Gastos generales			5973.62			5973.62
Beneficios planta			129141.268			226440.178

Para los tipos de pieza a,b,c y e también se observa un incremento de mas del 100% en los beneficios de la empresa.

Se simula nuevamente el costo promedio por unidad para cada tipo de pieza ahora considerando las variables propuestas por simrunner dando como resultado lo siguiente:

- Costo promedio por unidad para pieza tipo a =  $\frac{281378.3}{31} = 9076.71$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo b =  $\frac{313225.9}{155} = 1631.38$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo c =  $\frac{212986.8}{272} = 783.03$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo d =  $\frac{172372.3}{128} = 1346.65$
- Costo promedio por unidad para pieza tipo e =  $\frac{183377.6}{136} = 1348.36$

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Debido a que los tiempos de operación se reducen sus costos también lo hacen generando menos inventario de trabajo en proceso e incrementando el total de piezas producidas y con un cumplimiento del 40% en la demanda de cada tipo de pieza. Cabe mencionar que antes de ejecutar las corridas de experimentación en simrunner se tenía el 0% de cumplimiento en la demanda.

En las tablas 4.25 a la 4.29 se observa la reducción en el costo promedio para los tipos de piezas a, b, c, d y e respectivamente.

**Tabla 4.25 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia.**

<b>Tipo de pieza a</b>		
<b>Sistema actual - con tiempos muertos</b>	<b>Sistema futuro - con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner</b>	
<b>Costo promedio por unidad (\$)</b>	<b>Costo promedio por unidad (\$)</b>	<b>% Reducción</b>
10822.24	9076.71	-16%

**Tabla 4.26 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia.**

<b>Tipo de pieza b</b>		
<b>Sistema actual - con tiempos muertos</b>	<b>Sistema futuro - con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner</b>	
<b>Costo promedio por unidad (\$)</b>	<b>Costo promedio por unidad (\$)</b>	<b>% Reducción</b>
2020.81	1631.38	-19%

**Tabla 4.27 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia**

<b>Tipo de pieza c</b>		
<b>Sistema actual - con tiempos muertos</b>	<b>Sistema futuro - con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner</b>	
<b>Costo promedio por unidad (\$)</b>	<b>Costo promedio por unidad (\$)</b>	<b>% Reducción</b>
785.92	783.03	0%

**Tabla 4.28 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia.**

Tipo de pieza d		
Sistema actual - con tiempos muertos	Sistema futuro - con tiempos muertos - variables propuestas por simrunner	
Costo promedio por unidad (\$)	Costo promedio por unidad (\$)	% Reducción
1706.65	1346.65	-21%

**Tabla 4.29 Reducción de costo promedio actual contra futuro. Fuente: elaboración propia**

Tipo de pieza e		
Sistema actual - con tiempos muertos	Sistema futuro - con tiempos muertos - variables propuestas	
Costo promedio por unidad (\$)	Costo promedio por unidad (\$)	% Reducción
1815.61	1348.38	-26%

#### 4.1.2 Conclusiones

La interacción de las herramientas Lean, simulación y optimización aplicadas en este análisis de costos permitieron describir de manera detallada y práctica el comportamiento del inventario de trabajo en proceso y el tiempo de espera para el sistema de producción simulado en Promodel mencionado en la descripción del problema. Los costos involucrados en el flujo de valor, se obtuvieron simplificando el método de costos para que fuera comprendido por los responsables del equipo Lean y dichos costos se fueron monitoreando a lo largo del tiempo sin perder de vista el objetivo planteado.

La simulación del modelo permitió construir un sistema para llevar a cabo los propósitos de evaluación y optimización que facilitó conocer el estado actual y futuro de los costos relacionados con el flujo de valor para ambos procesos y poder tomar decisiones a corto plazo.

El análisis de costos de flujo de valor muestra que la mejor opción de trabajo para el sistema simulado es reducir las variables del tiempo de proceso y tiempo entre llegadas en cada una

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

de las estaciones obteniendo beneficios monetarios en la producción de piezas tipo a,b,c y e. Es importante mencionar que los algoritmos evolutivos que se aplicaron para encontrar la solución mínima en Simrunner, es una buena estimación, pero no la óptima.

Al calcular nuevamente los costos promedio para cada tipo de pieza se observa una reducción en este comprobando así una mejora en el proceso a excepción del tipo de pieza d, pues, aunque hay una reducción en el costo promedio, no existen beneficios monetarios por lo que se toma la decisión de no seguir produciendo esta pieza. También se incrementa la demanda un 40% pues solo el tipo de pieza c y e cumplen con la demanda propuesta.

Como trabajo futuro se propone la aplicación de esta metodología a una empresa del mundo real, del ramo metal mecánica ubicada en la región laja – bajo.



## Referencias

- Ainhoa, G. (2017). Improving the material flow of a manufacturing company via lean, simulation and optimization. *Industrial engineering and engineering management*, 1245-1250.
- Ainhoa, G., Urenda, M., & H.C, A. (2015). Lean simulation and optimization: a win-win combination. *Proceeding of the 2015 winter simulation conference*, 8(4), 2227-2238.
- Arora, V. (2016). A case study of selected enterprises in India. Udaipur: Mohanlal Sukhadia University.
- Badii, M., & Castillo, J. (2007). Diseños experimentales e investigación científica. *Innovaciones de negocios*, 4(2), 283-330.
- Baker, K. (2011). *Optimization modeling with spreadsheets*. Hoboken: Wiley.
- Barish, N. (1978). *Economic analysis for engineering and managerial decision making*. Florida: Mc Graw-Hill.
- Bartmann, D., & Beckmann, M. (1992). *Inventory control models and methods*. Berlin: Board.
- Bazaraa, M., & Jarvis, J. (1977). *Linear programming and network flows*. New York: John Wilwy & Sons.
- Bernedixen, J., Pehrsson, L., & Antonsson, T. (2015). Simulation based multi-objetive bottleneck improvement: towards an automated toolset for industry. *IEEE Xplore*.
- Billene, R. (1995). *Análisis de costos un enfoque conceptual para el análisis y control de costos*. Argentina: Jurídicas cuyo.
- Blanco, L. E., Romero, E., & Páez, J. A. (2006). CONWIP un sistema de control de producción. *Education research and practice*, 21-23.
- Bronson, R. (1998). *Investigación de operaciones*. México: Mc Graw Hill.
- Cabrera, M. (2009). Trabajo de grado Manual de prácticas de simulación de sistemas discretos con Promodel. Bogota.
- Cárdenas y Napoles, R. A. (2016). *Costos II la gestión gerencial*. México: Instituto mexicano de contadores públicos.
- Casanovas, J., Figueras, J., & Guasch, A. (2002). *Modelado y simulación*. Upc.
- Case, K., & Fair, R. (1997). *Principios de microeconomía*. México: Pearson.

- Chase, R., & Aquilano, N. (1992). Dirección y administración de la producción y de las operaciones. España: Wesley iberoamericana.
- Cordobes, M. (2014). Lean Accounting: una visión general. Revista de contabilidad y dirección, 19, 101-113.
- Coss Bu, R. (2003). Simulación un enfoque práctico. México: Limusa.
- Cuatrecasas, L. A., & Santos, F. J. (2016). Monitoring processes through inventory and manufacturing lead time. Industrial management & data system, 1086-1112.
- Cuevas, D. (2008). Contabilidad y finanzas para no contadores. México: Limusa.
- de la Herrerán Gascón, M. (1998). Computación evolutiva. Boletín CF+S(21), 1-15.
- Detty, R., & yinglin, J. (2000). Quantifying benefits of conversion to lean manufacturing with discrete event simulation: A case study. International journal of production research, 38, 429-445.
- Díaz, N. (2016). Sistemas de costes ABC y Lean Accounting. Análisis, comparativa y aplicación práctica. Tesis Licenciatura en Administración y Dirección de empresas, 11-107.
- Douglas, M. (2001). Design and analysis of experiments. New York: Jhon wiley & sons.
- Efrain, J., Moras, G., Fernández, J., & Álvarez, C. (2012). Aplicación de simulación para el incremento de la productividad de una empresa generadora de panela en la ciudad de Tuxtepec, Oaxaca. Ingeniería industrial, 13-20.
- Eilon, S. (1999). Production planing and control. U.S.A: Universal publish.
- Erkam, I. (2016). Mathematics and excel based statistical lean accounting implementation on a construction industry firm. Beykent Universitesi, 19-38.
- Espinoza, J. C., Madrid, J. C., & Gamboa, A. (2015). Lean manufacturng: development and cases. Magazin empresarial, 33-44.
- Faja, H., & Ramos , E. (2006). Cómo profundizar en el análisis de sus costos para tomar mejores decisiones empresariales. México: Granica.
- Feldman, R., & Valdez-Flores, C. (2010). Applied probability and stochastic process. New York: Springer.
- García, E., García, H., & Cárdenas, L. (2006). Simulación y análisis de sistemas con promodel. México: Pearson.

- Gross, D., Shortle, J., Thompson, J., & Harris, C. (2008). *Fundamentals of queueing theory*. Hoboken: Wiley.
- Gurnani, C. (2007). Economic analysis of inventory systems. *International journal of production research*, 21(2), 261-277.
- Gutiérrez, H. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- Harrell, C., Ghosh, B., & Bowden, R. (2003). *Simulation using promodel*. Singapore: Mc graw hill.
- Harris , F. (1990). How many parts to make at once. *Operations research society of america*, 10(2), 947-950.
- Hernández, S., Flores, I., Hernández, D., & Jiménez, J. A. (2017). Numerical analysis of minimum cost network flow with queuing stations: the M/M/1 case. *Nova Scientia*, 9 (1)(18), 257-289.
- Hesham, Y., Atef, A.-E., & Nasr-Eldeen, H. (2015). Measuring the potential operational and financial improvements of implementing lean manufacturing: using lean accounting tools- a case study . *Management control system and innovation strategy*, 1-37.
- Hillier, F., & Liberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. México: Mc Graw Hill.
- Hillier, F., & Lieberman, G. (2001). *Introduction to operation research*. New York: Mc Graw Hill.
- Hingston, P. (2002). *Marketing efectivo*. México: Pretence Hall México.
- Jiménez, J., & Medina, J. (2014). Waiting waste reduction in assembly lines using heuristics and simulation scenarios. *Ingeniería e industria DYNA*, 89, 1-11.
- Kalpakkjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson.
- Kozarkiewicz, A., & Lada, M. (2015). Value stream accounting in project management. *Project management developmen - practice and perspectives*, 4(2), 214-222.
- López, P. (2008). The applicability of value stream costing (VSC) in early stage of maturity path toward lean manufacturing. Comparison with activity based costing (ABC). A case study. *POM Tokyo*, 1-14.
- Manco, J. C. (2014). *Elementos básicos del control, la auditoria y la revisoría fiscal*. Autores editores.

- Martínez, E., & Camilo, E. (2009). Análisis de redes de colas modeladas con tiempos entre llegadas exponenciales e hiper erlang para la asignación eficiente de los recursos. Trabajo de grado de ingeniería industrial.
- Maskell, B., Baggaley, B., & Grasso, L. (2011). Practical lean accounting. New York: Taylor & Francis.
- Maskell, B., Baggaley, B., & Grasso, L. (2011). Practical lean accounting: a proven system for measuring and managing the lean enterprise. New York: Taylor & Francis.
- Mejía, Y. (2018). Efecto de la variabilidad del tiempo de espera y la demanda en cadena de suministro. Tesis de Maestría en ingeniería industrial.
- Oladipupo, O., Q Van, Y., & Erlend, A. (2013). Work in process control for a high product mix manufacturing system. *Procedia CIRP*, 277-282.
- Otal, S. H., Serrano, G., & Serrano, R. (2015). Simulación financiera con delta Simul-e. Madrid: Diaz de santos.
- Park, C. (2009). Fundamentos de ingeniería económica. México: Pearson.
- Pehrsson, A., & Bernedixen, J. (2016). Automatic identification of constraints and improvement actions in production systems using multi-objective optimization and post-optimality analysis. *Manufacturing systems*, 24-37.
- Pérez, M., & Bastos, A. I. (2006). Introducción a la gestión de stocks. El proceso de control, valoración y gestión de stocks. España: Ideaspropias.
- Promodel. (2011, Septiembre 30). Promodel 2011 user guide. Retrieved from Promodel 2011 user guide: <http://www.promodel.com/onlinehelp/promodel/80/Front%20-%20About%20the%20User%20Guide.htm>
- Rama, M. (2007). Operation research. New York: New age international.
- Rao, S. (2006). The relationship of work in process inventories, manufacturing lead time and waiting line analysis. *International journal of production economics*, 221-227.
- Render, B., Stair, R. J., & Hanna, M. (2009). Quantitative analysis for management. Upper saddle river: Prentice hall.
- Rico, M. d., & Sacristán, M. (2017). Fundamentos empresariales. España: ESIC.
- Riggs, J. (2012). Sistemas de Producción Planeación, Análisis y Control. México: Limusa.
- Robinson, S. (2004). Simulation: the practice of model development and use. India: John Wiley.

- Ruiz de Arbulo, P., & Díaz de Basurto, P. (2008). Alineando los costes con la producción lean: Lean Accounting. XII Congreso de ingeniería de organización, 2, 1152-1161.
- Simrunner. (2002, Agosto 15). Process model. Retrieved from Process model: <https://www.processmodel.com/learning-center/users-guide/chapter-9/>
- Standrige, C., & Marvel, J. (2006). Why lean simulation. Proceeding of the 2006 winter simulation conference.
- Stephen, L., & Buss, A. (1995). Economic analysis of production bottlenecks . Calhoun. Mathematical problems in engineering, 1(1), 341-363.
- Stickney, C., Weil, R., & Schipper, K. (2010). Financial Accounting An introduction to concepts, methods, and uses. Canada: South-western.
- Taha, H. (2007). Operations research an introduction. New Jersey: Pearson.
- Ulla, S., & Thajudeen, S. (2016). Bottleneck improvement using simulation based optimization. Halmstand University. Gothenburg: Volvo group trucks operations.
- Ullah, M., & Sakar, B. (2017). Human errors incorporstion in work in process group manufacturing. Scienta iranica, 2050 - 2061.
- Van, J. (2002). Fundamentos de administración financiera. México: Pearson.
- Vázquez, P., & Mora, J. (2012). Elementos que afectan el nivel de inventario en proceso (WIP) y los costos de una línea de producción. Conciencia tecnológica, 36-41.
- Vrat, P. (2014). Materials managment an integrated systems approach. India: Springer.
- Wu, B. (1990). WIP cost-related effectiveness measure for the application of an IBE to simulation analysis. Department of manufacturing & engineering systems, 3(3), 141-149.