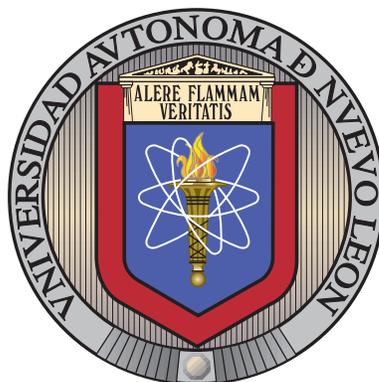


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MEJORA DEL PROCESO DE ABASTECIMIENTO
INTERNO APLICANDO OPTIMIZACIÓN VÍA
SIMULACIÓN

POR

TANAYI MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

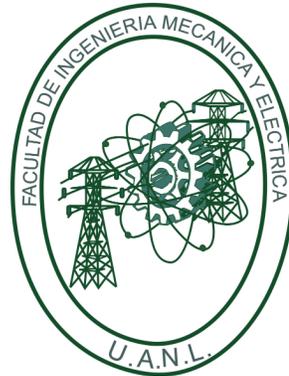
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MEJORA DEL PROCESO DE ABASTECIMIENTO
INTERNO APLICANDO OPTIMIZACIÓN VÍA
SIMULACIÓN

POR

TANAYI MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Mejora del proceso de abastecimiento interno aplicando optimización vía simulación», realizada por el alumno Tanayi Martínez Hernández, con número de matrícula 1937574, sea aceptada para su defensa como requisito para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro

El Comité de Tesis

Dra. Jania A. Saucedo Martínez
Asesor

Dr. Luis A. Infante Rivera
Co-Asesor

Dra. María G. Villarreal Marroquín
Revisor

MLyCS José L. Bermúdez Avendaño
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2020

*A mis padres,
por ser mi guía y mi ejemplo.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XIII
Resumen	XIV
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Objetivo	5
1.3. Hipótesis	5
1.4. Justificación	5
1.5. Metodología	7
1.6. Estructura de la tesis	8
2. Antecedentes	9
2.1. El aprovisionamiento dentro de la cadena de suministro	9
2.2. Líneas de ensamble	11
2.2.1. Paros de línea	13
2.2.2. Posible solución a los paros de línea	14

ÍNDICE GENERAL	VI
2.3. Simulación	17
2.4. Optimización vía simulación	21
3. Metodología	29
3.1. Caso de estudio	29
3.2. Metodología propuesta	31
3.2.1. Etapa 1: Recopilación de datos	32
3.2.2. Etapa 2: Simulación	34
3.2.3. Etapa 3: Algoritmo de optimización	36
3.2.4. Etapa 4: Análisis de resultados	37
4. Experimentación y análisis de resultados	38
4.1. Etapa 1: Recopilación de datos	38
4.2. Etapa 2: Simulación	41
4.3. Etapa 3: Algoritmo de optimización	49
4.4. Etapa 4: Análisis de resultados	54
5. Conclusiones	56
5.1. Conclusiones Generales	56
5.2. Contribuciones	57
5.3. Trabajo a futuro	58
A. Glosario de Términos	59

B. Número de experimentos	60
C. Estimación de límites de tolerancia	61
D. Software de simulación Anylogic	64

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Cadena de valor	2
1.2. Procesos principales de la empresa caso de estudio	4
1.3. Producción mundial de automotores en el año 2016.	6
2.1. El aprovisionamiento en la Cadena de Suministro	10
2.2. Representación de una línea de ensamble	11
2.3. Diagrama Causa-Efecto	14
2.4. Métodos de solución	15
2.5. Diagrama de Optimización aplicada a la Simulación	22
2.6. Clasificación según la interacción entre simulación y optimización: propósito de la simulación y estructura jerárquica	27
2.7. Clasificación según el diseño de búsqueda: método y esquema	27
3.1. Croquis del proceso de ensamble	30
3.2. Etapas de la metodología propuesta	31
4.1. Croquis de la línea 1	39

4.2. Diagrama de flujo de datos	39
4.3. Esquema de simulación de la Línea 1	44
4.4. Información del elemento carritos en el software Anylogic	44
4.5. Información del elemento vehículos en el software Anylogic	45
4.6. Estructura del elemento estación en el software Anylogic	45
4.7. Información del elemento estación en el software Anylogic	46
4.8. Información del elemento sistema en el software Anylogic	46
4.9. Datos de entrada del elemento vehículos para la simulación	47
4.10. Simulación de la Línea 1 en Anylogic	48
4.11. Réplicas de Simulación de la Línea 1	49
4.12. Resultados obtenidos en el escenario 1 con hasta 5 estaciones asignadas a cada carrito	52
4.13. Resultados obtenidos en el escenario 2 con hasta 5 estaciones asignadas a cada carrito	53
B.1. Cálculo del número de experimentos	60
C.1. Cálculo de los límites de tolerancia del sistema actual	62
C.2. Cálculo de los límites de tolerancia del escenario (3-4)	63
D.1. Paleta de componentes	65
D.2. Paleta de procesos	66
D.3. Componente parámetro y sus propiedades	66

D.4. Paleta de agentes	67
D.5. Componente <i>Source</i> y sus propiedades	68
D.6. Componente <i>Sink</i> y sus propiedades	68
D.7. Componente <i>Delay</i> y sus propiedades	68
D.8. Componente <i>Queue</i> y sus propiedades	69

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Comparación de técnicas de simulación	19
2.2. Enfoques de simulación-optimización	25
3.1. Datos de los vehículos necesarios para la simulación del proceso . . .	32
3.2. Datos de los componentes necesarios para la simulación del proceso .	33
3.3. Datos de los carritos necesarios para la simulación del proceso	33
3.4. Datos de las estaciones necesarios para la simulación del proceso . . .	33
4.1. Matriz de componentes por tipo de vehículos	40
4.2. Capacidad máxima de los carritos (cajas)	41
4.3. Descripción de los componentes	42
4.4. Matriz de componentes por estaciones	43
4.5. Factor de nivel de carga por estaciones	50
4.6. Relación de experimentaciones realizadas	51
4.7. Resultados del escenario 1	53
4.8. Resultados del escenario 2	54

4.9. Resultados de la experimentación	55
---	----

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que son lo más importante en mi vida, por guiarme por el camino correcto y darme su amor de manera incondicional.

A mi esposo por ayudarme en el transcurso de la maestría y ofrecerme su apoyo en momentos difíciles.

A toda mi familia por el apoyo y el cariño brindado.

A mi comité de tesis compuesto por la Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez, la Dra. María Guadalupe Villarreal Marroquín y el MLyCS. José Luis Bermúdez Avendaño por su disposición y ayuda para sacar adelante el proyecto. Al Dr. Luis Alfonso Infante Rivera por su apoyo desinteresado aportando sus conocimientos para hacer lo mejor posible este proyecto.

A mis profesores y compañeros por compartir este tiempo conmigo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por darme la oportunidad de venir a este país a realizar mis estudios de posgrado y por su apoyo económico durante estos dos años.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, por las becas otorgadas para poder cumplir con todo el proceso de estudios.

A todos los que de una forma u otra han formado parte de esta tesis, *muchas gracias.*

RESUMEN

Tanayi Martínez Hernández.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: MEJORA DEL PROCESO DE ABASTECIMIENTO INTERNO APLICANDO OPTIMIZACIÓN VÍA SIMULACIÓN.

Número de páginas: 76.

La logística de aprovisionamiento es una actividad clave en la cadena de suministro y puede influir de manera decisiva en el funcionamiento de las empresas dependiendo de cómo se gestione.

Para mejorar el desempeño de estos procesos se pueden aplicar diferentes herramientas tales como la optimización vía simulación. Los modelos de simulación representan una herramienta adecuada para el análisis de diferentes escenarios, representando un ahorro de recursos y la optimización permite seleccionar el escenario que garantiza el mejor desempeño

El caso de estudio desarrollado en la investigación está enfocado a una empresa del sector automotriz, en las líneas finales de armado de automóviles.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: Se establece como objetivo general de la presente investigación: Mejorar el desempeño de un sistema de manufactura flexible del sector automotriz, utilizando una herramienta basada en un modelo de optimización vía simulación.

La metodología de la investigación parte de la revisión de literatura con los temas relacionados a la problemática planteada y se hace una recopilación de las herramientas aplicadas en estudios similares seleccionando la más apropiada. Después se realiza una descripción del caso de estudio y posteriormente se recopilan los datos relacionados con la línea de producción y se procede a realizar un modelo de simulación del sistema actual, seguido de un algoritmo de optimización que busca llegar a la mejor solución posible del problema dado. Por último, se hace una comparación de los resultados obtenidos.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La utilización de la optimización vía simulación contribuye a realizar mejoras dentro de la cadena de suministro, específicamente el caso de estudio se centró en el abastecimiento interno ofreciendo la posibilidad de aumentar el desempeño del proceso si se implementan los resultados. Se entrega a la empresa una herramienta que les permite analizar sus procesos sin afectar el funcionamiento de los mismos. Se propuso una metodología estructurada en cuatro etapas que abarcan desde la recopilación de datos hasta el análisis de resultados.

Se simuló en el software Anylogic el escenario actual de la línea 1 del proceso de ensamble de la empresa para 12 horas de trabajo, ofreciendo como resultados que a 140 vehículos en promedio no se le instalan en la estación correspondiente los componentes que necesitan. Se desarrolla la optimización de diferentes instancias para la misma línea variando los parámetros: cantidad de carritos a utilizar y cantidad de estaciones a visitar por cada uno.

Firma del asesor: Janía Astrid Saucedo
Dra. Janía Astrid Saucedo Martínez

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro es definida por Ballou (2004), como el conjunto de actividades funcionales mediante las cuales la materia prima se convierte en producto terminado y se añade valor para el consumidor. Otros autores como Chopra y Meindl (2008) opinan que no solamente incluye al fabricante y al proveedor sino también a los transportistas, almacenistas, minoristas y clientes.

El ritmo del cambio y la creciente incertidumbre sobre la forma en que los mercados podrían evolucionar y obtener ventajas competitivas ha hecho cada vez más importante para las empresas contar con una adecuada gestión de la cadena de suministro. Garantizando de esta manera asegurar la producción y entrega de mercancías en las cantidades adecuadas y en el momento adecuado, logrando a su vez minimizar los costes y satisfacer a los clientes.

Teniendo en consideración el criterio de autores como Ahmad y Yohanes (2013), la cadena de suministro en sí se puede entender como una red de entidades de negocio que participan en diversas actividades comerciales que producen y entregan, a través de enlaces ascendentes y descendentes, bienes y/o servicios a los clientes.

Mientras que la logística según el Consejo de Gestión Logística (CLM) es aquella parte del proceso de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo y el almacenamiento eficiente y efectivo de los bienes, servicios e información

relacionada desde el punto de origen al de consumo, con el objetivo de satisfacer los requerimientos del cliente.

En la actualidad la globalización de los mercados hace cada vez más complejo el sistema logístico así como su gestión; por lo cual, es necesario desarrollar actividades de mejora continua de los procesos en las empresas productoras o comercializadoras de bienes y servicios que se encuentran participando en un ambiente de negocios internacionales.

Entre las principales actividades que involucra la logística podemos mencionar la distribución, el aprovisionamiento, el almacenamiento o inventario de productos, y el servicio al cliente, entre otras (Servera, 2010). En esta investigación nos enfocaremos en el aprovisionamiento interno, siendo esta la actividad más crítica de nuestro caso de estudio.

En la cadena de valor definida por Michael Porter el aprovisionamiento se encuentra entre las actividades de apoyo, que son las que sustentan a las actividades primarias y se complementan entre sí, proporcionando insumos comprados, tecnología, recursos humanos y varias funciones de toda la empresa (ver Figura 1.1).

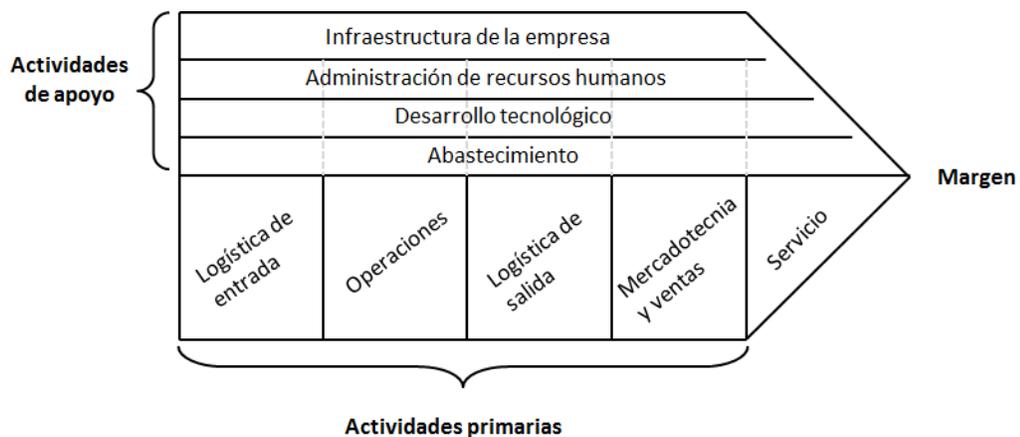


FIGURA 1.1: Cadena de valor

Fuente: Tomado de (Porter,1985)

El objetivo de la logística de aprovisionamiento es garantizar el control de los suministros necesarios para satisfacer las necesidades de los procesos operativos.

Algunos de los factores que tiene en cuenta esta área de la logística son las cantidades a suministrar y la frecuencia de aprovisionamiento, la calidad del servicio, el impacto sobre el inventario de la cadena de suministro, la previsión de la demanda, la selección de proveedores, las fechas de entrega, así como los tipos de unidades de embalaje y carga utilizados por los proveedores, entre otros.

De forma general se puede definir la logística de aprovisionamiento como el conjunto de todas aquellas operaciones que se llevan a cabo en una organización para garantizar los materiales que necesita en la construcción, fabricación y preparación de sus productos y/o servicios.

Las fallas en el aprovisionamiento impactan de manera negativa en las empresas, provocando interrupciones sobre aspectos vitales para su supervivencia, tales como: inventario promedio, tiempo de ciclo y nivel de servicio, que se reflejan en pérdidas financieras (Sánchez, 2005).

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Nuestro estudio es realizado en una empresa del sector automotriz, la cual produce diferentes modelos de automóviles en diferentes versiones y tiene una capacidad de producción anual de alrededor de 400 000 coches. De su producción anual el 80 % se exporta a otros países, quedándose el 20 % de su producción en México.

Entre sus principales procesos están los procesos de estampado, soldadura, pintura y ensamble (ver Figura 1.2). En el proceso de estampado se producen las diferentes partes a partir de láminas de metal que en el proceso de soldadura se unen para conformar los chasis de los automóviles.

Estos dos procesos son totalmente automatizados, por lo que se garantiza en ellos el rendimiento esperado. Una vez conformados los chasis, pasan a la línea de pintura y de ahí al área de ensamble. Este último proceso es semiautomatizado y en él

se le instalan a los chasis más de 30 000 componentes, los cuales varían dependiendo del modelo, versión y país a donde vayan dirigidos.

El ensamble es la etapa más compleja de la línea de producción y al tener tanta influencia del factor humano se han detectado en él mayores oportunidades de mejoras, siendo objeto de estudio de nuestra investigación.



FIGURA 1.2: Procesos principales de la empresa caso de estudio

Fuente: Elaboración propia

En la línea se cuentan con diferentes estaciones de trabajo, las cuales son aprovisionadas del material a ensamblar por medio de carritos, que hacen función de alimentadores en la línea y que distribuyen el material de acuerdo a una planificación realizada con base a una secuencia establecida de ensamble según la demanda. Estos carritos se abastecen de tres almacenes que se encuentran en puntos distantes dentro de la planta, por lo que, tienen establecido que un carrito solo busque producto de un almacén, pero en una misma vuelta pueden abastecer a varias estaciones de trabajo de la línea de producción.

El problema que están presentando es que no siempre se puede cumplir con la secuencia establecida, dado que existe desabasto en la línea de los componentes necesarios para ensamblar un modelo determinado. Cuando esto ocurre se puede reacomodar la secuencia a partir de que se cuenta con un *buffer* a la entrada de la línea que les permite sustituir un modelo por otro del cual si se tenga el material disponible.

El equipo de trabajo trata de hacer ajustes al secuenciamiento para no parar la

línea, pero llega un punto en que el desabasto es tal que el paro de línea es inevitable. Teniendo en cuenta que se producen 64 automóviles en una hora el tiempo constituye un factor importante y aunque el paro sea mínimo, la interrupción en la línea de producción provoca el incumplimiento de los tiempos de entrega establecidos. Por lo que se hace necesario analizar diferentes escenarios en una línea de producción para determinar el mejor de ellos.

1.2 OBJETIVO

Se establece como objetivo general de la presente investigación: Mejorar el desempeño de un sistema de manufactura flexible del sector automotriz, utilizando una herramienta basada en un modelo de optimización vía simulación.

1.3 HIPÓTESIS

Si se utiliza una herramienta basada en un modelo de optimización vía simulación, entonces es posible mejorar el desempeño de un sistema de manufactura flexible del sector automotriz.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La manufactura mexicana tiene una sólida reputación a nivel mundial, especialmente en los nichos automotriz, electrónico-tecnológico, químico y aeroespacial. Según, datos de la Secretaría de Economía, la actividad manufacturera del país exporta diariamente más de 1 000 millones de dólares. Los indicadores económicos del país también reflejan su importancia aportando el 17% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y el 90% del valor de las exportaciones totales, según estudios

realizados (Sánchez, 2014).

En el año 2016, entre los máximos productores mundiales de automotores, México se ubicó en el séptimo lugar con aproximadamente 3.6 millones de vehículos (ver Figura 1.3), representando un aumento de 2.3 veces respecto al año 1999 donde ocupaba el undécimo lugar (Ruiz, 2016).

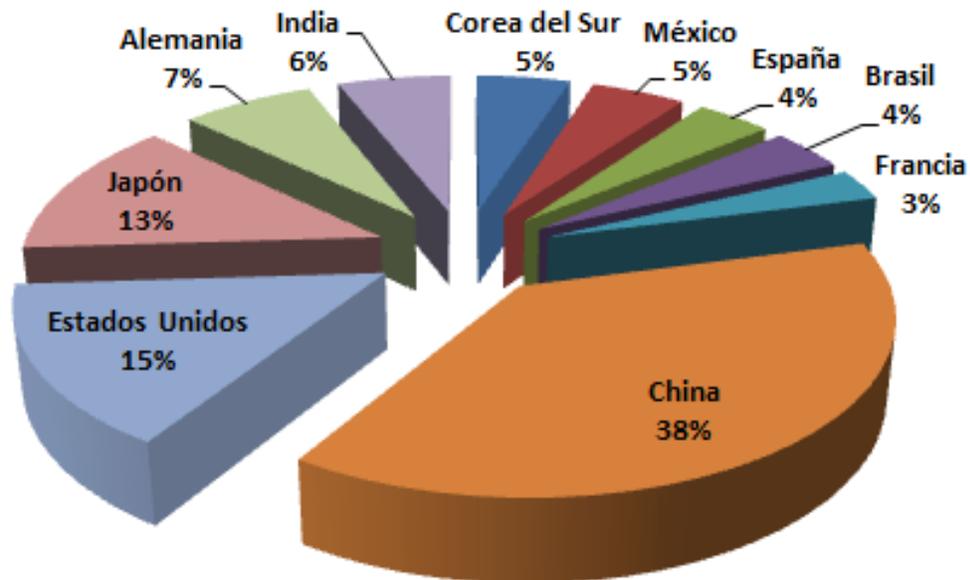


FIGURA 1.3: Producción mundial de automotores en el año 2016.

Fuente: Tomado de (INEGI, 2018)

La industria automotriz es considerada un sector estratégico para la actividad económica por el dinamismo que imprime tanto a la manufactura como a muchas otras actividades productivas de las zonas donde se ubica (Carbajal *et al.*, 2016).

En el mes de agosto de 2019 se exportaron 281 811 vehículos ligeros, mostrando una disminución de 12.7% con respecto a los vehículos exportados en agosto de 2018. Con ello suman 2 299 528 unidades enviadas al extranjero durante el periodo enero-agosto de 2019, para un incremento de 1.5% en comparación con las 2 264 697 unidades exportadas en el mismo periodo de 2018 (AMIA, 2019).

Siendo el sector automotriz uno de los mayores receptores de inversión extranje-

ra directa (IED), de 1999 al segundo trimestre de 2016 captó USD 45 687.5 millones, lo que representa 10.2 % del total de la IED en México durante dicho periodo y 21 % del total de la recibida por el sector manufacturero (Secretaría de Economía, 2016).

Por otro lado, debido a las condiciones del mercado actual donde ocurren diversas eventualidades, como una caída o un incremento en el consumo, la flexibilidad permite fabricar la mercancía indicada, en el momento exacto, en la cantidad ideal y que se entregue en el lugar donde realmente se necesita.

Por ejemplo, se ha demostrado que sistemas totalmente automatizados o procesos completamente manuales no llegan a ser el sistema óptimo en el ensamble de automóviles, en términos de los efectos combinados de costo, calidad y flexibilidad. Por lo tanto, para implementar cualquier tipo de sistema automático en un proceso productivo se requieren procedimientos lógicos y un adecuado diseño de las líneas de ensamble para garantizar la eficiencia en los procesos de fabricación (Gorlach y Wessel, 2008).

Debido a lo anterior se decide aplicar una herramienta para mejorar el abastecimiento interno en una empresa del sector automotriz, siendo esta rama de las más importantes en el país. La mala gestión del aprovisionamiento provoca desabasto generando interrupciones en toda la cadena de suministro, por lo que, es necesario analizar este proceso desarrollando herramientas que garanticen su buen funcionamiento y control.

1.5 METODOLOGÍA

La metodología de la investigación parte de la revisión de literatura con los temas relacionados a la problemática planteada y se hace una recopilación de las herramientas aplicadas en estudios similares seleccionando la más apropiada. Después se realiza una descripción del caso de estudio el cual se lleva a cabo en una empresa del sector automotriz, específicamente en el proceso de ensamble. En ella

se producen distintos modelos de automóviles en diferentes versiones y tiene una capacidad de producción anual de alrededor de 400 000 coches.

Posteriormente se recopilan en la empresa los datos relacionados con la línea de producción y se procede a realizar un modelo de simulación del sistema actual, seguido de un algoritmo de optimización que busca llegar a la mejor solución posible del problema dado. Por último, se hace una comparación de los resultados obtenidos.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está estructurada en 5 capítulos. En el capítulo 1, se presenta la introducción, definiendo el problema a resolver y su relevancia en la empresa caso de estudio. En el segundo capítulo, se desarrollan los antecedentes del problema realizando una recopilación de la literatura sobre los temas abordados en problemáticas similares. En el capítulo 3, se describe el caso de estudio en cuestión y se define la herramienta a utilizar con sus respectivos pasos a seguir. En el capítulo 4, se aplica la simulación y el algoritmo de optimización como parte de la experimentación y se analizan los resultados obtenidos. Finalizando la investigación con el capítulo 5, donde se exponen las conclusiones y las contribuciones del estudio.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

En un mercado cada vez más competitivo, las empresas están obligadas a tener mayor variedad y calidad en sus productos a precios bajos, esto deriva en la importancia de tener tiempos de producción más cortos y tener sistemas de producción flexibles (Moreno y Mora, 2012). La logística de aprovisionamiento es una actividad clave en la cadena de suministro y puede influir de manera decisiva en el funcionamiento de una empresa dependiendo de cómo se gestione. En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica que incluye algunas de las causas más frecuentes que afectan el aprovisionamiento interno, así como, las herramientas que se emplean para su solución.

2.1 EL APROVISIONAMIENTO DENTRO DE LA CADENA DE SUMINISTRO

En la actualidad la globalización de los mercados hace cada vez más complejo el sistema logístico así como su gestión; por lo cual, es necesario desarrollar actividades de mejora continua de los procesos en las empresas.

Entre las principales actividades que involucra la logística podemos mencionar la distribución, el aprovisionamiento, el almacenamiento o inventario de productos,

y el servicio al cliente, entre otras. En esta investigación nos enfocaremos en la parte de aprovisionamiento que es la alcanzada por el caso de estudio.

La logística de aprovisionamiento es una actividad clave en la cadena de suministro y puede influir de manera decisiva en el funcionamiento de una empresa dependiendo de cómo se gestione (ver Figura 2.1).



FIGURA 2.1: El aprovisionamiento en la Cadena de Suministro

Fuente: Elaboración Propia

El objetivo de la logística de aprovisionamiento es garantizar el control de los suministros necesarios para satisfacer las necesidades de los procesos operativos. Algunos de los factores que tiene en cuenta esta área de la logística son las cantidades a suministrar y la frecuencia, la calidad del servicio, el impacto sobre el inventario de la cadena de suministro, la previsión de la demanda, la selección de proveedores, las fechas de entrega, así como los tipos de unidades de embalaje y carga utilizados por los proveedores, entre otros.

De forma general se puede definir la logística de aprovisionamiento como el conjunto de todas aquellas operaciones que se llevan a cabo en una organización para garantizar los materiales que necesita en la construcción, fabricación y preparación de sus productos y/o servicios.

La logística de aprovisionamiento se realiza de diferentes formas dependiendo de cada proceso y es más compleja en el caso de producciones masivas que realizan actividades secuenciadas en puestos de trabajo diferentes, conocidas como líneas de ensamble.

2.2 LÍNEAS DE ENSAMBLE

Las líneas de ensamble son sistemas especiales de producción que consisten en máquinas conectadas en serie (ver Figura 2.2). Se utilizan principalmente en la industria de productos estandarizados de alto volumen, aunque han ido ganando importancia también en la gama de productos personalizados. Debido a los altos requisitos de capital al instalar o rediseñar una línea, su planificación y configuración es de vital importancia porque se requiere que cada parte se procese en cada máquina durante una cantidad fija de tiempo llamada tiempo de proceso (Amiri y Mohtashami, 2012).



FIGURA 2.2: Representación de una línea de ensamble

Fuente: (Fattahi *et al.*, 2012)

La investigación tradicional de equilibrado de líneas de ensamble se centra en el modelado y la solución de problemas simples como la producción en masa de un producto homogéneo, línea marcada con tiempo de ciclo fijo y diseño de línea en serie; siendo estas suposiciones muy limitadas y no representar la realidad industrial en muchas ocasiones (Fattahi *et al.*, 2012).

Diseñar una línea de ensamble implica resolver problemas como determinar el tiempo de ciclo de cada proceso, el número de estaciones y su secuencia; así como el

orden de entrada de los productos en la línea (Fattahi *et al.*, 2012).

La fabricación automotriz actual tiene que hacer frente a una gran cantidad de piezas opcionales para adaptar el automóvil a los deseos individuales de los clientes (Dormer y Gunther, 2013).

Los principales ensambladores de automóviles como Ford, General Motors y Chrysler han comenzado a revisar algunas de sus plantas de ensamblaje para producir varios modelos en la misma línea de producción. Dentro de este contexto industrial pequeñas variaciones en la demanda del tipo de productos podrían conducir a un equilibrio inestable de la línea de montaje.

Es por ello que la hibridación de las técnicas de simulación con los algoritmos de optimización proporciona a los tomadores de decisiones automotrices una herramienta flexible que tiene un impacto positivo en la gestión de la planta (Chica *et al.*, 2018).

En la industria automotriz es cada vez más frecuente el número de fabricantes que está adoptando la estrategia de ensamblaje de modelos mixtos en múltiples líneas de ensamble. En este sistema de alimentación las estaciones generalmente se rellenan mediante una reposición sistemática de piezas impulsada por los sistemas Kanban.

Según Faccio *et al.* (2013) para adoptar esta estrategia el suministro debe ser confiable porque la escasez de componentes conduce a paradas de línea e inactividad de las estaciones de trabajo. Por otro lado, el exceso de inventario cerca de las líneas aumenta los costos de inventario y obstruyen el proceso de ensamblaje debido a la falta de espacio dentro de la planta.

Las líneas de ensamblaje de motores automotrices semiautomatizada cambian la estrategia tradicional de usar trabajadores fijos en cada sección de ensamblaje manual por una nueva estrategia de usar trabajadores que caminan. Wang *et al.* (2013) consideran que con este enfoque, tanto el trabajador como el motor viajan

simultáneamente por la línea. Los estudios han mostrado una mejora en el rendimiento general de los sistemas en términos de flexibilidad, eficiencia, capacidad de respuesta y reconfigurabilidad utilizando trabajadores dinámicos, flexibles y hábiles para caminar.

Este tipo de sistema es típicamente una combinación de máquinas automáticas de ensamblaje (robots) intercaladas con secciones de ensamblaje manual, donde cada trabajador en cada estación realiza un trabajo repetitivo simple o múltiple durante un período de tiempo de ciclo casi constante. En este sentido es una ventaja respecto a los sistemas manuales porque en estos últimos equilibrar la línea de ensamblaje es más difícil porque las personas no trabajan al mismo ritmo todo el tiempo. Esta diferencia en los ciclos de trabajo crea una variabilidad que a medida que aumenta afecta la tasa de producción general y el inventario en proceso se acumula (Wang *et al.*, 2013).

Los problemas de balanceo de líneas de ensamblaje de personal múltiple (MALBP) son un ejemplo de modelo distinto y permiten asignar más de un operador a cada estación de trabajo según las características del producto. Estos tipos de equilibrio suelen ocurrir en industrias de gran tamaño y alto volumen de productos, como la industria automotriz (Durango *et al.*, 2015).

El objetivo principal al resolver estos problemas es optimizar la tasa de producción, el rendimiento o el beneficio de la línea. Sin embargo, el flujo puede verse interrumpido por fallas en las máquinas y en el aprovisionamiento de materiales, lo que es conocido como paros de línea.

2.2.1 PAROS DE LÍNEA

Los paros de línea ocurren cuando existen problemas o errores en un sistema de producción. Esta situación provoca una disminución en la productividad e incumplimientos en las entregas que se reflejan en pérdidas económicas.

Se realiza una búsqueda bibliográfica en la base de datos de la Universidad Autónoma de Nuevo León, acotando las fechas de publicación desde el año 2000. Se utilizan palabras claves como: paros de línea, líneas de ensamble, producción contiuua, entre otras.

A partir del análisis bibliográfico realizado se desprende el siguiente diagrama de Ishikawa, (ver Figura 2.3), también conocido como diagrama Causa-Efecto para agrupar las causas que pueden estar afectando la línea de producción. La búsqueda se basa en estudios publicados en revistas científicas y tiene en cuenta los criterios más relevantes de Rother y Shook (2000), Pérez y Parra (2010) y Barcia (2007), entre otros. Para la confección del diagrama, las causas están agrupadas en seis aspectos fundamentales (maquinaria, materiales, métodos, mano de obra, medición, medio ambiente).

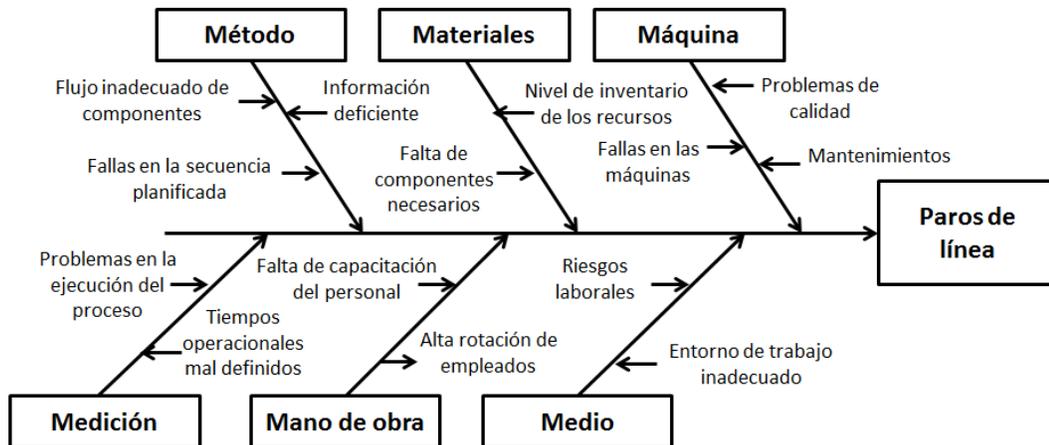


FIGURA 2.3: Diagrama Causa-Efecto

Fuente: Elaboración Propia

Algunos investigadores han intentado modelar problemas más realistas y generalizados del balanceo de la línea de ensamble. La literatura contiene características adicionales tales como funciones de costo; producción de modelos mixtos, paralelismo y selección de equipos entre muchos otros.

2.2.2 POSIBLE SOLUCIÓN A LOS PAROS DE LÍNEA

Para eliminar los paros de línea se emplean varios métodos de solución que pueden ser cualitativos o herramientas más complejas, basadas en fundamento de investigación de operaciones, (ver Figura 2.4).

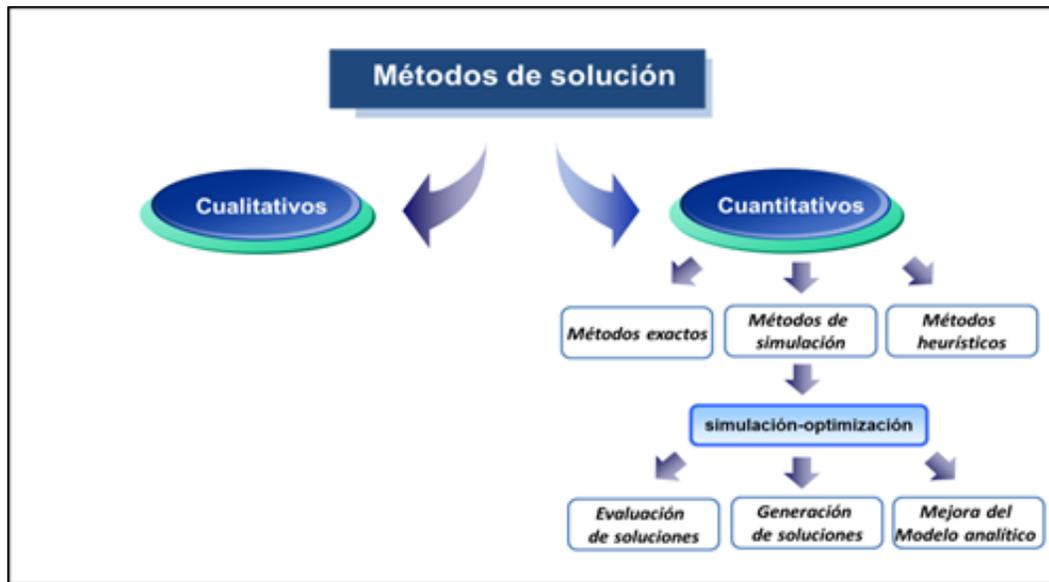


FIGURA 2.4: Métodos de solución

Fuente: Elaboración Propia

Los métodos cualitativos pueden determinarse de forma manual, teniendo como limitante el número de opciones que puede considerar un ser humano y la evaluación formal que realiza de las alternativas, además, debido al número de variables que se pueden manejar se alargan los tiempos de respuesta para obtener una posible solución. Estos métodos resultan de gran utilidad en la etapa inicial de la investigación y permiten determinar si es necesario o no la aplicación de un método cuantitativo para la resolución del problema (Coronado, 2006).

Saunders and Townsend (2016) desarrollan una investigación basada en herramientas cualitativas, utilizando diferentes entrevistas y toman decisiones a partir del nivel de detalle y transparencia de estas, la revisión de documentos y la opinión de los expertos ayudan a validar la información.

Otro método muy utilizado en estos casos es prueba y error, que consiste en realizar mejoras según se vayan detectando los problemas hasta obtener la mejor solución, provocando que los recursos no siempre sean utilizados de manera correcta. Barcia (2007) aplica el mapeo de la cadena de valor a una línea de ensamble para mejorar la productividad del proceso.

Además de las herramientas cualitativas existen estrategias cuantitativas que demuestran matemáticamente los resultados esperados. Entre las herramientas cuantitativas más utilizadas para este tipo de casos, especialmente los que están vinculados a un proceso de producción de manufactura flexible asociados a una línea de ensamble podemos encontrar la simulación, algoritmos de optimización y herramientas híbridas.

Los algoritmos de optimización permiten a partir de modelos matemáticos y estadísticos poder tomar las mejores decisiones en la operación de un proceso. En su mayoría trata con sistemas complejos conocidos como *NP-hard* donde se tiene por objetivo mejorar el comportamiento real de dicho sistema. La investigación de operaciones permite realizar este análisis y determinar el valor de una variable conocida, a partir de la maximización de los beneficios o de la minimización de costos.

La optimización caracteriza la manera en que nos enfrentamos a situaciones cotidianas conflictivas en las cuales deseamos la opción más apropiada o benéfica, usualmente bajo un escenario en el que los medios para alcanzarlos son limitados (Barrios *et al.*, 2005).

Las técnicas de optimización matemática admiten distintas clasificaciones dependiendo de las características del problema dado. Estas características se refieren, entre otras, a los valores que pueden tomar las variables y a los tipos de funciones que aparecen en el modelo. Una manera general de clasificar un modelo de optimización es problema de optimización lineal o no lineal, donde en los primeros tanto la función objetivo como las restricciones son funciones lineales, mientras que en los segundos al menos una de estas funciones es no lineal (Villarreal, 2007).

Por otro lado, se puede apreciar en ejemplos analizados en la literatura la necesidad de recurrir a métodos heurísticos debido a la complejidad que presentan los sistemas de líneas de ensamble en la industria.

Bartholdi (1993) abordó una configuración de línea de montaje que consta de dos líneas en paralelo. En lugar de estaciones individuales, los pares de estaciones opuestas a ambos lados de la línea trabajan en paralelo en la misma pieza de trabajo, es decir, trabajan simultáneamente en los lados opuestos del mismo producto. Para su solución, desarrolla un método heurístico, basado en algoritmos genéticos que enfatiza la velocidad sobre la precisión para el refinamiento interactivo y rápido de las soluciones, argumentando en su investigación que este enfoque resulta más útil para equilibrar las líneas de montaje reales que las técnicas típicas de búsqueda de la optimización.

Por su parte, Cevikcan *et al.* (2009) ideó un modelo de programación matemática para crear estaciones físicas de múltiples funciones de ensamblaje en líneas de ensamble de modelos mixtos. Debido a que su modelo era *NP-hard* desarrollaron un algoritmo heurístico para resolverlo que incluye tanto la secuencia de modelos como los sistemas de transferencia de trabajadores (Farnaz, 2017).

Otra herramienta utilizada para modelar problemas que tienen una gran cantidad de variables y son difíciles de modelar de manera exacta es la simulación. Siendo esta herramienta muy útil para evaluar la función objetivo del modelo de optimización y de manera conjunta mejorar el proceso, esto se conoce como optimización de simulaciones.

2.3 SIMULACIÓN

La simulación puede entenderse como el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema determinado (García *et al.*, 2013) y puede usarse para describir o predecir cómo operará

un sistema con ciertos criterios dados de los datos de entrada controlables y valores generados al azar de dichos valores (Anderson y Sweeney, 2011).

La simulación permite realizar una modelación de la realidad, basándose en el comportamiento real del sistema que se desea plantear. Su principal ventaja como instrumento de modelación, es que permite representar relaciones complejas entre entidades en las que los modelos analíticos, no son adecuados o suficientes para reflejar todas las interacciones. Además, permite probar múltiples hipótesis simultáneamente y realizar predicciones bajo una multiplicidad de condiciones.

Apichat (2010), Bernal y Bernal (2015) y Puche *et al.* (2016) plantean que el uso de modelos de simulación para la gestión de mejoras permite considerar el impacto de las decisiones en un sistema determinado evitando el riesgo de implementar realmente una decisión sin entender las posibles consecuencias de su impacto.

Los modelos de simulación pueden adaptarse tanto a variables deterministas como estocásticas según Ebrahimy *et al.* (2011), siendo algunos de los métodos más utilizados: la simulación basada en eventos discretos, la simulación basada en sistemas dinámicos y la simulación basada en agentes (ver Tabla 2.1).

La simulación se puede usar en el estudio y la experimentación de interacciones internas de un sistema complejo o de un subsistema dentro de este para simular cambios informativos, organizativos y ambientales, y se puede observar el efecto de estas alteraciones en el comportamiento del modelo. Además permite realizar mejoras en el sistema bajo investigación, cambiar las entradas de la simulación y observar los resultados, pudiéndose determinar información valiosa sobre qué variables son las más importantes y cómo interactúan las variables.

Simular diferentes capacidades para una máquina puede ayudar a determinar los requisitos en ella; los modelos de simulación diseñados para capacitación hacen posible el aprendizaje sin el costo y la interrupción de la instrucción en el trabajo y la animación muestra un sistema en operación simulada para que el plan se pueda visualizar (Banks *et al.*, 2005).

TABLA 2.1: Comparación de técnicas de simulación

Fuente: Basada en (Lou *et al.*, 2010)

	Simulación basada en agentes	Simulación de eventos discretos	Simulación por dinámica de sistemas
Definición	<p>Un método informático que permite construir modelos constituidos por agentes que interaccionan entre sí dentro de un entorno para llevar a cabo experimentos virtuales.</p> <p>En los modelos cada agente tiene que elegir una regla de comportamiento entre el conjunto de reglas dado, tales reglas están constituidas por un componente de condición y por un componente de acción.</p>	<p>En un sistema discreto cambian instantáneamente de valor las variables en ciertos instantes de tiempo. En un sistema de una cierta complejidad puede ocurrir que existan simultáneamente variables de estado continuas y discretas. En este caso, dependiendo de la predominancia de una y otras y del objetivo del estudio que se pretende realizar, se considerará el sistema como perteneciente a uno de los dos tipos.</p>	<p>Los sistemas dinámicos son sistemas cuyos parámetros internos (variables de estado) siguen una serie de reglas temporales.</p> <p>Se llaman sistemas porque están descritos por un conjunto de ecuaciones y reciben el nombre de dinámicos porque sus parámetros varían con respecto a alguna variable que generalmente es el tiempo.</p>
Ventajas	<p>Permite una gran facilidad para recrear en la simulación la interacción entre sus variables con respecto a factores como cantidad de material, tiempo, distancias por recorrer, etc.</p>	<p>Dentro de la línea de producción hay muchas variables que cambian con respecto al tiempo este sistema nos podría ser útil solo sí, analizáramos variables con respecto al tiempo.</p>	<p>De una forma similar a los sistemas discretos con este tipo de simulación analizaríamos muy bien las variables con respecto a un cambio de tiempo.</p>
Desventajas para este caso de estudio	<p>La única desventaja que se presenta es la complejidad que requiere el entrelazar todos los agentes para recrear el sistema de producción deseado, sería un método muy útil para este tipo de casos de estudio.</p>	<p>Dentro de los sistemas de producción existen variables dinámicas y variables continuas, este tipo de simulación nos ayudaría en caso de que todas las variables cambiaran con respecto al tiempo, pero existen muchas más variables con las cuales no se debería hacer una combinación entre sistemas dinámicos y continuos para poder simular correctamente.</p>	<p>Como se explica anteriormente con los sistemas discretos, hay variables que son dinámicas y variables que no lo son, por lo tanto el usar este tipo de método nos dificultaría mucho el análisis de las variables que no se comportan de esa forma, por lo cual no es el método óptimo para este caso de estudio.</p>

De manera general tomando en cuenta los criterios de varios autores se pueden mencionar las siguientes ventajas de la simulación:

- Se pueden explorar nuevas políticas, procedimientos operativos, reglas de decisión, flujos de información, procedimientos organizacionales, etc. sin interrumpir las operaciones en curso del sistema real.
- Nuevos diseños de hardware, diseños físicos, sistemas de transporte, etc. pueden probarse sin comprometer recursos para su adquisición.
- Las hipótesis sobre cómo o por qué ocurren ciertos fenómenos pueden probarse para determinar su viabilidad.
- El tiempo se puede comprimir o expandir para permitir una aceleración o ralentización de los fenómenos que se investigan.
- Se puede obtener información acerca de la importancia de las variables para el rendimiento del sistema.
- Se puede realizar un análisis de cuello de botella para descubrir dónde el trabajo en proceso, la información, los materiales, etc. se retrasan excesivamente.

Los modelos de simulación pueden incorporar los niveles cambiantes de parámetros dinámicos tales como variación de la demanda, la variación de la producción, tasas de llegada, y los intervalos de servicio; estos pueden ser utilizados para identificar los cuellos de botella del proceso y para evaluar alternativas adecuadas. Nembhard (2014) utiliza la simulación para estudiar un lugar de trabajo dinámico, debido a su extrema complejidad es casi imposible utilizar modelos analíticos para su representación.

La simulación basada en agentes se desarrolla como un método para el análisis de los sistemas complejos. Se ha utilizado para estudiar los temas de amplio alcance, como sistemas urbanos, económicos, empresariales, de producción, sociales, de transporte y otros (Chris, 2018).

Como factor importante es la flexibilidad de los modelos de simulación cuando se compara, por ejemplo, con las restricciones estructurales impuestas por la formulación de la programación matemática de un problema (Hassan, 2004). Incluso cuando un modelo analítico se puede aplicar a un problema, la simulación se utiliza con frecuencia para estudiar las implicaciones prácticas de las hipótesis que sustentan el modelo analítico.

La simulación se puede usar en el estudio y la experimentación de interacciones internas de un sistema complejo o de un subsistema dentro de este; cuando se necesitan realizar mejoras en el sistema bajo investigación, cambiar las entradas de simulación y observar los productos resultantes puede producir información valiosa sobre qué variables son las más importantes y cómo interactúan las variables (Banks *et al.*, 2005).

Los continuos cambios y avances en la logística y los sistemas productivos hacen necesario la realización de mejoras y la toma de decisiones. La simulación es una buena herramienta de apoyo para este tipo de acciones, sobre todo cuando es difícil representar mediante un modelo matemático. Con el objetivo de optimizar los procesos, posterior a ser modelados mediante una simulación se aplican técnicas de optimización.

2.4 OPTIMIZACIÓN VÍA SIMULACIÓN

La optimización vía simulación consiste en el proceso de ligar un método de optimización con un modelo de simulación para determinar los valores de las variables de decisión de manera tal que se maximice el desempeño del sistema simulado (Villarreal, 2007).

El objetivo de los métodos de optimización vía simulación es proveer una estructura para determinar valores de variables controlables con el fin de optimizar una función de las salidas de un modelo de simulación (Swisher *et al.*, 2000) (ver

Figura 2.5).

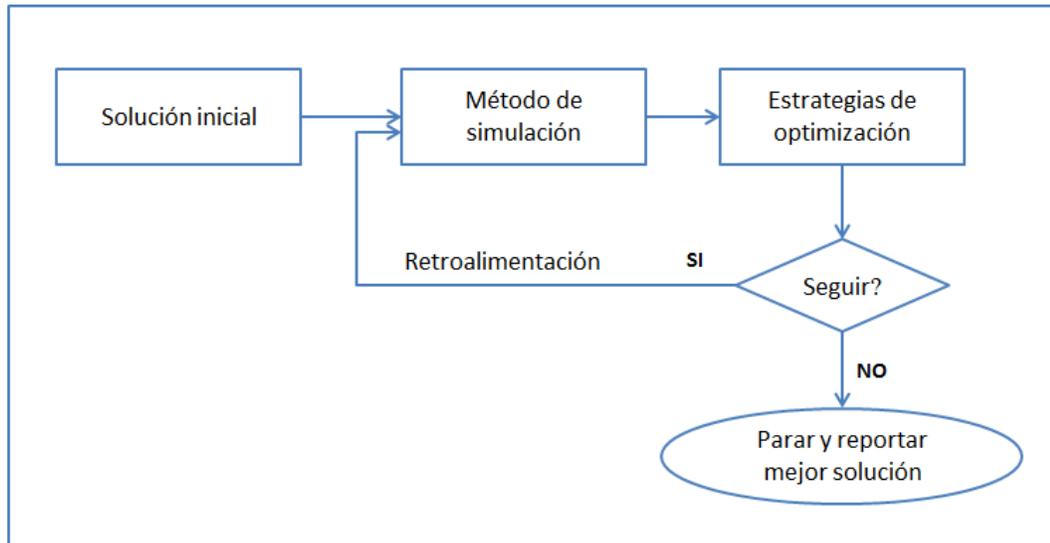


FIGURA 2.5: Diagrama de Optimización aplicada a la Simulación

Fuente: (Villarreal, 2007)

La simulación y la optimización se consideran tradicionalmente enfoques separados en el campo de la investigación de operaciones. Sin embargo, avances significativos en el poder computacional promovieron la aparición de métodos que combinaban ambas herramientas (Fu, 1994).

El crecimiento explosivo en potencia informática ha hecho factible utilizar simulaciones para optimizar el diseño y las operaciones de los sistemas estocásticos complejos que son analíticamente intratables. La computación generalizada y la interconectividad de sistemas han dado paso a una nueva era de industrialización permitiendo el uso de herramientas para la toma de decisiones con un efecto positivo en diferentes escenarios. La optimización de la simulación proporciona el cerebro inteligente requerido para mejorar drásticamente la eficiencia de los sistemas industriales (Xu *et al.*, 2016).

Algunos autores han utilizado estos métodos como es el caso de Gutiérrez y Silva (2016), que analizan las estrategias para mejorar y equilibrar los tiempos de servicio a través del número de servidores considerando 10 clientes en la fila de espera

presentaron una distribución normal.

Por otro lado Gómez y Quinta (2015), establecen una propuesta de mejoramiento al proceso de planeación de tiempos y costos con la integración de una herramienta de simulación de eventos discretos y programación de balanceo de líneas.

Cavoski y Markovic (2017) desarrollan y aplican modelos y simulaciones basadas en agentes en el análisis de clientes y su comportamiento en los sitios web de comercio electrónico. La metodología utilizada mejora significativamente la velocidad y la calidad de toma de decisiones en comercio electrónico siendo capaz de rastrear las interacciones de temas claves como: posibles consumidores, vendedores con diferentes estrategias comerciales y proveedores.

Otro ejemplo de la aplicación de la optimización vía simulación es el estudio de un caso del mundo real de una importante cadena de suministro de productos alimenticios desarrollado por Guller y Noche (2015) para permitir la toma de decisiones en la gestión del inventario. La gestión del inventario en cadenas de suministro complejas suele ser difícil y puede tener un impacto significativo en el nivel de servicio al cliente y los costos de todo el sistema.

El principal desafío de la gestión de inventario es que en casi todos los casos implican objetivos múltiples y conflictivos que deben optimizarse simultáneamente. En su investigación Guller y Noche (2015) presentan un enfoque de optimización basado en simulación para determinar los parámetros óptimos de control del inventario para encontrar un conjunto de soluciones casi óptimas y determinar la mejor compensación entre los objetivos.

La recolección de residuos es una de las actividades logísticas más críticas en las ciudades modernas con un impacto considerable en la calidad de vida del entorno urbano. En las grandes ciudades y las áreas urbanas agrupadas, los depósitos múltiples de los que se originan las rutas de recolección son comunes, aunque en pocas ocasiones se considera la cooperación entre vehículos de diferentes depósitos.

Es por ello que Gruler *et al.* (2017) analizan una versión más amplia de los residuos analizando un problema de recolección con múltiples depósitos y demandas estocásticas. Los autores proponen un algoritmo híbrido que combina metaheurística con simulación para estudiar los efectos de la cooperación entre diferentes depósitos y cuantificar los ahorros potenciales que esta cooperación podría proporcionar a los gobiernos municipales y a las empresas de recolección de residuos.

Los métodos exactos son apropiados cuando el problema es relativamente fácil (por ejemplo, simple combinatoria, lineal, cuadrática). Los grandes problemas complejos requieren naturalmente el uso de heurística (Gray *et al.*, 2010).

La utilización de la simulación es una ventaja por su capacidad para manejar estos procesos complejos, ya sean deterministas o estocásticos, sin sofisticación matemática. Sin embargo, la combinación de simulación y optimización generalmente da como resultado métodos muy exigentes en términos de esfuerzo computacional, por lo tanto, el diseño de una buena interacción es crucial. Debido a que las posibilidades de combinarlas son muy amplias, es muy importante tener una buena visión general de los diferentes enfoques (Albey y Bilge, 2011).

Las investigaciones realizadas en el campo de la optimización vía simulación están muy fragmentadas, por ello Figueira y Almada-Lobo (2014) realizan una revisión bibliográfica de los métodos conocidos (ver Tabla 2.2) y proponen una taxonomía integral. El estudio se divide de acuerdo a la investigación de Simulación-Optimización (S-O) en tres enfoques.

El primer enfoque está más orientado a simulación, ya que se simula para evaluar soluciones y tener una mejor visión de las mismas; mientras que los otros dos enfoques combinan la simulación con modelos analíticos, clasificándose como modelos híbridos de simulación analítica / modelado. Estos son en su mayoría dirigidos a optimización.

Al abordar un problema mediante la simulación vía optimización es importante seleccionar el enfoque correcto para su solución. Kleijnen *et al.* (2010) recomiendan

TABLA 2.2: Enfoques de simulación-optimización

Fuente: Basado en (Figueira y Almada-Lobo, 2014)

Enfoques	Descripción	Métodos de solución
Evaluación de soluciones (SE)	Parte de un modelo de simulación para representar el sistema y encontrar una solución buena (u óptima).	Métodos de Selección Estadística (SSM), Metaheurística (MH), Metaheurística basada en la memoria (MMH), Búsqueda aleatoria (RS), Aproximación Estocástica (SA), Muestra de optimización de ruta (SPO), Métodos basados en metamodelos y Métodos de superficie de gradiente (GSM), entre otros
Generación de soluciones (SG)	Parte de la formulación de modelos analíticos y simular sus soluciones para calcular todas las variables de interés	Finalización de la solución por simulación (SCS) y Simulación basada en la optimización iterativa (IOS).
Mejora del modelo analítico (AME)	Es un método híbrido, cuyo propósito es mejorar el modelo analítico utilizando los resultados de la simulación.	Equivalente Determinista de Programación Estocástica (SPDE), Optimización Recursiva – Enfoque de Simulación (ROSA), Enfoque basado en la estimación de funciones (FEA) y Simulación basada en la optimización con refinamiento iterativo (OSIR).

que si existe y se conoce una relación lineal entre la mayoría de las variables de entrada y salida se utilice el AME puede ser muy eficiente y efectivo. En el caso de no conocerse ninguna relación y la simulación sea costosa por la necesidad de realizar muchas repeticiones el SMC es el enfoque que puede ser adecuado.

Por el contrario si la simulación es relativamente modesta, la Función de evaluación puede ajustarse bien. La utilización de los enfoques de Generación de solución es más fácil de identificar porque son adecuados cuando el modelo analítico no depende de ninguna retroalimentación de simulación.

Para la descripción de la taxonomía, se propone clasificar los métodos de simulación y optimización en cuatro dimensiones:

1. Propósito de la simulación.
2. Estructura jerárquica.
3. Método de búsqueda.
4. Esquema de búsqueda.

Las dos primeras están relacionadas con la interacción entre la simulación y la optimización, mientras que las otras dos se refieren al diseño de algoritmos de búsqueda. En su investigación Figueira y Almada-Lobo (2014) describen las categorías de cada dimensión y las relacionan obteniéndose dos matrices, las cuales se utilizan para clasificar los métodos mencionados anteriormente (ver figuras 2.6 y 2.7).

La taxonomía descrita por Figueira y Almada-Lobo (2014) se utilizó para categorizar métodos propuestos en la literatura, con el propósito de que se pueda usar para clasificar cualquier marco S-O que aparezca, ya sea como una adaptación de los métodos existentes o un nuevo enfoque.

		1. Propósito de la simulación.				
		Evaluación de la solución (SE)		Mejora del modelo analítico (AME)	Generación de solución (SG)	
		Función de evaluación (EF)	Construcción de un modelo sustituto (SMC)			
2. Estructura jerárquica.	Optimización con iteraciones basadas en simulación (OSI)	Optimización Simulación	SSM,MH,RS, SA,SPO,GSM	MMH	No aplica	
	Simulación alternativa – Optimización (ASO)	Simulación Optimización	RST, RSRO	LMM,GSM, SMF,ADP		SPDE, ROSA
	Simulación secuencial: optimización (SSO)	Simulación Optimización	No aplica	GMM	FEA	SCS
	Simulación con iteraciones basada optimización (SOI)	Simulación Optimización			OSIR	IOS

FIGURA 2.6: Clasificación según la interacción entre simulación y optimización: propósito de la simulación y estructura jerárquica

Fuente: (Figueira y Almada-Lobo, 2014)

		3. Método de búsqueda.			
		Exacto (E)	Heurística de espacio continuo (CH)		Heurística de espacio discreta (DH)
			Heurística basada en derivados (DBH)	Otros heurísticos continuos (OCH)	
4. Esquema de búsqueda.	Una realización para cada solución (1R1S)	IOS, OSIR	SA,GMS, LMM,GMM	SMF	RS,ADP
	Diferentes realizaciones para cada solución (DR1S)	SSM,SCS, ROSA	LMM, GMM	MH,MMH, SMF	MH,MMH, RS
	Realizaciones comunes para cada solución (CR1S)	SSM, SPDE, FEA	SPO		
	Una realización para soluciones múltiples (1RMS)	RSRO, ROSA		RST	RST

FIGURA 2.7: Clasificación según el diseño de búsqueda: método y esquema

Fuente: (Figueira y Almada-Lobo, 2014)

Existen software de simulación que ya tienen integrados módulos de optimización como es el caso del software Anylogic, el cual cuenta con un módulo de optimización basado en OptQuest, herramienta líder para la optimización de simulaciones desarrollada por los sistemas *OptTek*.

OptQuest es un complemento que incorpora metaheurísticas para guiar su algoritmo de búsqueda hacia mejores soluciones. El motor *OptQuest* combina la búsqueda tabú, la búsqueda dispersa, la programación de enteros y las redes neuronales en un único algoritmo que proporciona la máxima eficiencia en la identificación de nuevos escenarios; siendo flexible, inteligente y fácil de usar.

Como ejemplo práctico de la implementación de la simulación en el software AnyLogic se tiene el modelo de simulación desarrollado por Conrads *et al.* (2017) que utilizan el enfoque de métodos múltiples, que incluye modelado basado en agentes, así como simulación dinámica de eventos y sistemas discretos. El modelo se puede usar para evaluar diferentes estrategias de mantenimiento para un proyecto de túnel siendo una estrategia mejorada para reducir el tiempo de parada.

En la investigación actual se utiliza el software AnyLogic para encontrar la mejor configuración del sistema. Se sigue el enfoque de evaluación de soluciones basado en un modelo de simulación para representar el proceso de ensamble actual y posteriormente aplicar el módulo de optimización del software. Para desarrollar este enfoque se propone una metodología que se describe en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se describen en términos generales el caso de estudio y la metodología a seguir. Para ello, se construye un modelo de simulación que represente el proceso bajo estudio con el fin de evaluar su nivel de productividad y determinar si es posible disminuir la cantidad de carritos que aprovisionan a la línea, entre otros.

Debido a la complejidad de los procesos de manufactura flexible, los modelos de simulación representan una herramienta adecuada para el análisis de diferentes escenarios, representando un ahorro de recursos y de tiempo. La optimización vía simulación nos permite seleccionar el escenario que maximice la productividad de nuestro sistema.

3.1 CASO DE ESTUDIO

Uno de los principales problemas que se presentan en los procesos de manufactura flexible son en las líneas de ensamble en cuanto a la planificación y el ruteo de la distribución de los componentes.

En este trabajo se presenta un estudio realizado en una empresa del sector automotriz, la cual produce distintos modelos de automóviles en diferentes versiones y tiene una capacidad de producción anual de alrededor de 400 000 coches. De su

producción el 80 % se exporta a otros países, quedándose el 20 % en México. En el proceso de ensamble, objeto de estudio de nuestra investigación, se le instalan a los chasis más de 30 000 componentes, los cuales varían dependiendo del modelo, versión y país a donde vayan a ser exportados.

En la línea se cuenta con diferentes estaciones de trabajo (ver Figura 3.1), las cuales son aprovisionadas del material a ensamblar por medio de carritos, que hacen función de alimentadores a la línea y que distribuyen el material de acuerdo a una planificación realizada, con base a una secuencia establecida según la demanda. Estos carritos se abastecen de un almacén central que se encuentra dentro de la planta, teniendo establecido que un carrito puede abastecer a varias estaciones de trabajo en un mismo recorrido.

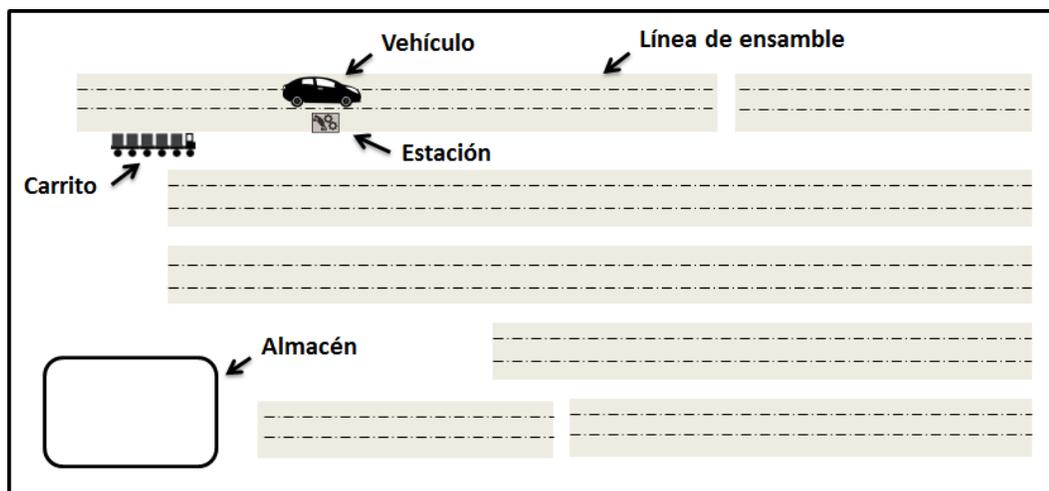


FIGURA 3.1: Croquis del proceso de ensamble

Fuente: Elaboración Propia

El proceso consta de siete líneas de ensamble, centrándose esta investigación en la línea 1. El tiempo promedio que tarda un vehículo en cada estación es de 60 segundos, siendo esta la frecuencia de producción; existe un total de 3 carritos distribuidores en esta línea, el tiempo que tarda cada uno dentro del almacén es de 1 800 segundos como promedio. El tiempo de traslado de un carrito entre cada estación de la línea 1 es de 58 segundos en promedio, y el tiempo de descarga es de 164 segundos aproximadamente. Estos datos conforman algunas de las variables de

entrada tomadas en la investigación.

3.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología desarrollada consta de cuatro etapas fundamentales (ver Figura 3.2), en la primera etapa se realiza la recopilación de datos, posteriormente se aplica un modelo de simulación del sistema para representar diferentes escenarios posibles, seguido de un algoritmo de optimización que busca llegar a la mejor solución posible del problema dado, y por último el análisis de resultados.

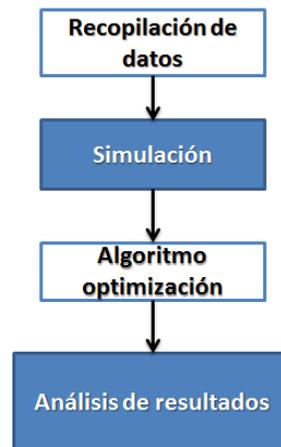


FIGURA 3.2: Etapas de la metodología propuesta

Fuente: Elaboración Propia

La combinación de métodos de optimización con simulación basada en agentes es una tendencia observada en las investigaciones de cadena de suministro. La eficiencia del modelado y la simulación se fundamentan en la precisión del método utilizado (Oliveira *et al.*, 2016).

3.2.1 ETAPA 1: RECOPIACIÓN DE DATOS

La recolección de datos se refiere a la actividad que consiste en la recopilación de información dentro de un cierto contexto, para lo cual se usa una gran diversidad de técnicas y herramientas, siendo utilizadas en este caso: la revisión de documentos, entrevistas con el personal involucrado y la observación directa en el proceso.

La revisión de documentos se realiza a través de los registros de operaciones y producción, las bases de datos de la demanda de los modelos de los autos, las órdenes de trabajo y los procedimientos internos de la empresa, entre otros documentos revisados. Los datos necesarios para el desarrollo de la simulación se toman de la semana número 23 del año 2019, siendo esta una semana de trabajo habitual.

Las entrevistas fueron realizadas de forma no estructurada a ejecutivos y técnicos de la organización, así como al personal de la empresa proveedora de los materiales a la línea de ensamble. La observación se realiza en diferentes turnos de trabajo para determinar el funcionamiento de las actividades. Esta información permite conocer de forma más detallada cómo funciona el proceso, identificando que los paros de línea se producen por falta de material en las estaciones que se reaprovisionan *just in time*.

La información que se requiere de los vehículos, los componentes, los carritos y las estaciones para realizar la simulación se muestra en las tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 respectivamente. Los términos que se emplean se describen de forma más detallada en el Apéndice A.

TABLA 3.1: Datos de los vehículos necesarios para la simulación del proceso

Fuente: Elaboración propia

Vehículo
Tipos de vehículos que se producen
Tipos de componentes que requiere cada vehículo en la línea 1
Cantidad de componentes para cada vehículo
Tiempo que tarda un vehículo en pasar de una estación a otra

TABLA 3.2: Datos de los componentes necesarios para la simulación del proceso

Fuente: Elaboración propia

Partes o componentes
Cantidad de componentes por caja
Cajas que pueden almacenarse en la estación
Tipos de componentes que se ensamblan en cada estación

TABLA 3.3: Datos de los carritos necesarios para la simulación del proceso

Fuente: Elaboración propia

Carrito
Capacidad de los carritos
Tiempo de retorno de los carritos al almacén
Tiempo que tarda un carrito en llegar a la línea
Tiempo que tarda un carrito entre estaciones
Tiempo que tarda en descargar cada caja
Tiempo promedio que tarda en cargar una orden
Órdenes atendidas en promedio por turno de trabajo
Frecuencia de actualización de las órdenes

TABLA 3.4: Datos de las estaciones necesarios para la simulación del proceso

Fuente: Elaboración propia

Estaciones
Estaciones que surte cada carrito
Tipos de componentes que se instalan en cada estación
Tiempo de ensamble de los componentes en la estación
Cantidad de estaciones que conforman la línea 1

Para desarrollar la metodología en nuestro caso de estudio es necesario representar el funcionamiento del proceso actual. A partir de la información brindada por la empresa se establecen los siguientes supuestos:

- Se ensamblan 5 tipos diferentes de autos.
- Para cada vehículo se requieren 32 componentes diferentes en la línea 1, ensamblados en 9 estaciones de aprovisionamiento *just in time*.
- La cantidad de piezas por caja varía de acuerdo al producto entre 4 y 200 piezas.
- Los carritos pueden cargar en un *dollies* hasta 20 cajas de diferentes componentes, y pueden llevar hasta 4 *dollies*.
- Las órdenes de entrega son actualizadas cada 1 200 segundos aproximadamente.

Una vez se tiene toda la información relevante necesaria para desarrollar la experimentación se procede a la siguiente etapa de simulación.

3.2.2 ETAPA 2: SIMULACIÓN

La simulación se puede usar en el estudio y la experimentación de interacciones internas de un sistema complejo o de un subsistema dentro de este; para simular los cambios que se dan, ya sean informativos, organizativos o ambientales. Se realiza en esta etapa la simulación del sistema actual, con el objetivo de representar el proceso de la línea 1, validar los resultados alcanzados y realizar un análisis de los resultados.

Para generar estas soluciones se utiliza el software de simulación Anylogic, el cual se selecciona debido a su vinculación con la investigación. Andres *et al.*, (2016) menciona algunas de sus características y ventajas; las cuales se muestran a continuación:

- Soporta las metodologías de simulación más comunes: Dinámica de Sistemas (DS), Sistemas de eventos discretos (SED), y el Modelado basado en agentes (*multy agent systems*, MAS).
- La forma en que el software está diseñado permite construir modelos de forma modular, jerárquica e incremental generando modelos complejos y grandes.
- Ofrece un conjunto de objetos que permiten incorporar elementos de simulación pre construidos de forma rápida.
- Se soporta sobre un entorno Java que puede utilizarse de forma predeterminada o de forma personalizada incluyendo bibliotecas o fuentes de datos externas.
- El amplio conjunto de funciones de distribución estadísticas predefinidas permite simular sistemas caracterizados por incertidumbre.
- Tiene incluidos paquetes de optimización para aplicarlos a una amplia variedad de enfoques de simulación.
- Dispone de funciones de animación predefinidas que permiten generar modelos con un entorno de simulación interactivo y muy visual.

El software Anylogic posee herramientas que unidas a la interfaz gráfica y los objetos de biblioteca de Anylogic permiten modelar diversas áreas como: cadenas de suministro y logística, *marketing* y competitividad, producción, almacenamiento, proyectos, procesos de negocio, servicios sanitarios, flujos de personas, transporte y gestión de activos, sistemas de servicios, etc.

Para realizar la simulación en Anylogic se toman como entradas los datos actuales del sistema de nuestro caso de estudio, los cuales se nombraron en el apartado anterior y una vez simulados los diferentes escenarios se aplica el algoritmo de optimización.

3.2.3 ETAPA 3: ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Un modelo de optimización es una representación cuantitativa de un sistema real, el cual se describe de manera teórica. Está formado por una serie de supuestos, la función objetivo y un conjunto de restricciones. Los modelos de optimización ofrecen mejores resultados dependiendo de la precisión con que se construya la representación numérica.

Además, los modelos de optimización se caracterizan de acuerdo a los valores que pueden tomar las variables y a los tipos de funciones que aparecen en el modelo.

Según Figueira y Almada-Lobo (2014), la herramienta de optimización a desarrollar puede variar dependiendo del método de solución que se utilice, algunas de las más comunes que se ajustan a nuestro problema son algoritmos genéticos, *Tabu Search* y metaheurísticas.

Los algoritmos de optimización iteran en busca de nuevas soluciones hasta que no encuentran una solución mejor a la mejor encontrada, considerándose este como el criterio de parada a seguir en esta investigación (Villarreal *et al*, 2013). Se desarrolla un algoritmo de optimización para determinar cual de los escenarios validados ofrece una mejor solución del problema descrito.

En esta investigación se emplea como herramienta de optimización el optimizador del software Anylogic, el cual permite a los analistas buscar soluciones para problemas empresariales y de ingeniería complejo. Este módulo utiliza *OptQuest*, basándose en un conjunto verdaderamente único de algoritmos potentes y técnicas de análisis sofisticadas que incluyen optimización de metaheurística, algoritmos evolutivos, análisis estadístico, búsqueda tabú y búsqueda dispersa.

Investigar cada escenario posible puede llevar mucho tiempo y, en muchos casos, es imposible. El motor *OptQuest* reemplaza la inexactitud de prueba y error con un potente motor de búsqueda que señala la mejor decisión (Wan y Li, 2008).

Desafortunadamente, se desconoce la heurística exacta que utiliza *OptQuest*, por razones comerciales trata el modelo de optimización como una caja negra; es decir, solo observa la entrada / salida (E / S) del mismo (Kleijnen y Wan, 2007). Si bien Anylogic lo emplea como caja negra, *OptQuest* maneja en su página cómo es su funcionamiento (OptTek Systems, 2019).

El objetivo de la optimización es minimizar el número de carritos garantizando que todas las estaciones de trabajo cuenten con los componentes necesarios para ensamblar los vehículos. Los parámetros que se varían en el caso de estudio son: la cantidad de carritos y la cantidad de estaciones asignadas a cada carrito, mostrándose la experimentación en el siguiente capítulo. Una vez desarrollados los diferentes escenarios se procede al análisis de los resultados.

3.2.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos permitirán ajustar al modelo y poder determinar el escenario que garantice la mejor solución a este proceso. Para la implementación de la herramienta propuesta debe contarse con el apoyo de la empresa para realizar los cambios que indique el modelo.

Esta constituye una herramienta importante para tomar decisiones de diseño y operación, permitiendo mejorar el rendimiento de los procesos y sistemas de producción. El uso coordinado de métodos de optimización y modelos de simulación posibilita alcanzar mejores resultados.

Las etapas de la metodología propuesta se desarrollan en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se desarrolla la metodología propuesta y se realiza la experimentación en el software Anylogic. Se describen a continuación los datos de entrada al modelo y los elementos que forman la simulación, efectuándose para un período de tiempo de 12 horas.

Se toma este período de tiempo porque la empresa maneja tres turnos de trabajos de 8 horas cada uno pero habitualmente la empresa prefiere trabajar 2 turnos alargando uno de ellos a turno y medio. Cuando se trabajan 12 horas es cuando mayores dificultades tienen para el aprovisionamiento de la línea.

Además, en este capítulo se realiza la optimización de los diferentes escenarios a partir de la variación de parámetros y por último se analizan los resultados obtenidos.

4.1 ETAPA 1: RECOPIACIÓN DE DATOS

Los datos se obtienen según las técnicas y herramientas mencionadas en el capítulo anterior. Para llevar a cabo la simulación se alimenta el software con datos reales de la línea 1, objeto de estudio para esta investigación (ver Figura 4.1).

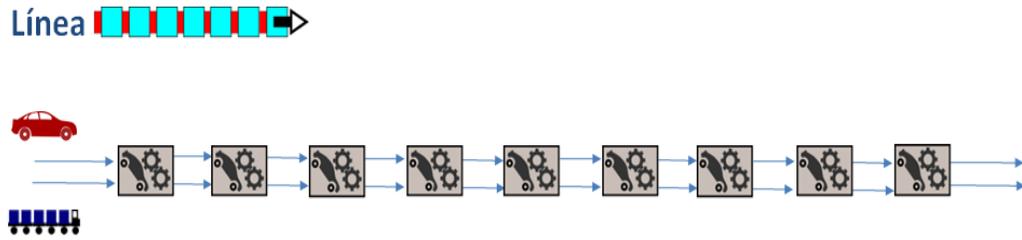


FIGURA 4.1: Croquis de la línea 1

Fuente: Elaboración propia

Para estructurar la información se realiza un diagrama de flujo de datos que permite visualizar la información recopilada y determinar la relación existente entre los datos (ver Figura 4.2).

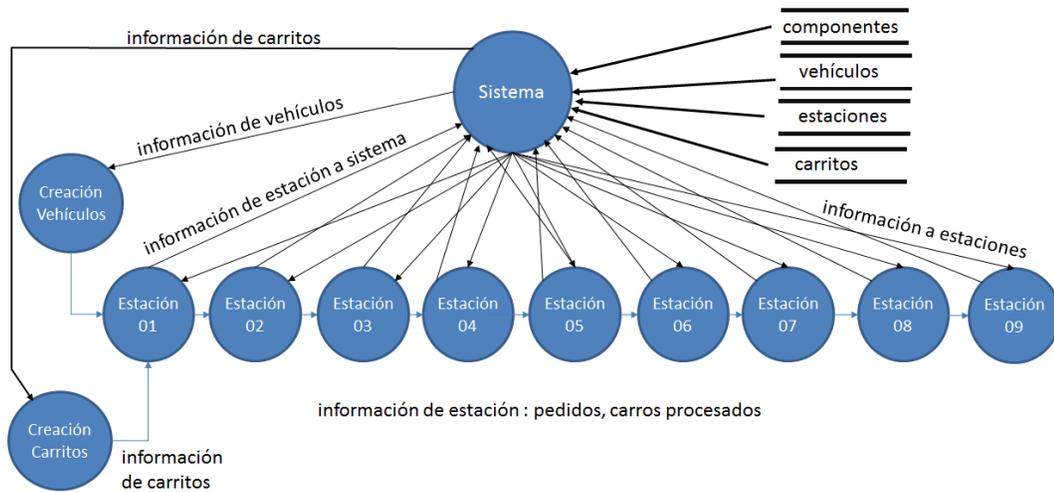


FIGURA 4.2: Diagrama de flujo de datos

Fuente: Elaboración propia

En el caso del elemento vehículos se utiliza una matriz que relaciona los 5 tipos de vehículos que se ensamblan con los tipos de componentes que requieren cada uno en la línea 1 objeto de estudio (ver Tabla 4.1). Por ejemplo el tipo de componente 1 es instalado a los vehículos 2, 3, 4 y 5, no siendo necesitado por el tipo de vehículo 1.

En el caso del elemento carritos se tiene un total de 3 que son los que proveen esta línea y se toma en cuenta su capacidad máxima (ver Tabla 4.2).

TABLA 4.1: Matriz de componentes por tipo de vehículos

Fuente: Elaboración propia

Tipo de componente	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
1	0	1	1	1	1
2	0	1	1	1	1
3	0	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1
5	0	1	1	1	1
6	1	0	1	1	1
7	1	0	1	1	1
8	1	0	1	1	1
9	1	0	1	1	1
10	1	0	1	1	1
11	1	1	0	1	1
12	1	1	0	1	1
13	1	1	0	1	1
14	1	1	0	1	1
15	1	1	0	1	1
16	1	1	1	0	1
17	1	1	1	0	1
18	1	1	1	0	1
19	1	1	1	0	1
20	1	1	1	0	1
21	1	1	1	1	0
22	1	1	1	1	0
23	1	1	1	1	0
24	1	1	1	1	0
25	1	1	1	1	0
26	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1

Para los componentes se necesita un número de identificación para cada uno de ellos, así como la cantidad que se manejan por caja (ver Tabla 4.3).

En las estaciones se forma una matriz con las 9 estaciones y los 32 componentes, tomando el valor de 1 si instala el componente en la estación y 0 en caso contrario

TABLA 4.2: Capacidad máxima de los carritos (cajas)

Fuente: Elaboración propia

Carrito	Capacidad máxima	Línea 1
1	80	1
2	80	1
3	80	1

(ver Tabla 4.4).

Una vez se tienen todos los datos se introducen en el software para realizar la simulación.

4.2 ETAPA 2: SIMULACIÓN

Para el desarrollo de la simulación se emplea el software Anylogic, su funcionamiento se describe en (OptTek Systems, 2019). En el software se estructuran los distintos elementos y se crean arreglos, funciones, parámetros, variables y listas que forman las entradas del modelo de simulación.

Estos elementos permiten representar el proceso real de la línea 1 en el software, como se aprecia en la Figura 4.3.

La simulación se compone de diferentes módulos los cuales se describen en el desarrollo de esta sección.

En el caso de los carritos se crean los arreglos para definir la cantidad de componentes (q), la carga actual (Q_a), la capacidad máxima (Q), además de variables que relacionan los componentes que va a trasladar cada carrito. También se crean funciones como *inicia* que permite recepcionar la información de los pedidos y asignar las cajas a los carritos para que completen su inventario en la estación solicitada (ver Figura 4.4).

TABLA 4.3: Descripción de los componentes

Fuente: Elaboración propia

Tipo de Componente	Identificador del componente	Cantidad de piezas por caja
1	258	24
2	259	24
3	353	30
4	243	30
5	83	6
6	89	50
7	271	6
8	158	6
9	159	6
10	348	50
11	156	50
12	23	50
13	109	40
14	37	40
15	54	40
16	171	50
17	55	40
18	88	32
19	87	32
20	84	50
21	287	4
22	346	50
23	232	50
24	98	50
25	64	24
26	63	24
27	206	50
28	155	50
29	133	50
30	347	50
31	190	24
32	24	50

Los vehículos se conforman de los parámetros creados para identificar cada vehículo según el tipo (ID), la cantidad de piezas que requiere cada tipo por estación (piezas), el identificador de las piezas (npsz). Entre las variables creadas se encuentran el porcentaje de cumplimiento (pcump) que responde al avance de ensamble

TABLA 4.4: Matriz de componentes por estaciones

Fuente: Elaboración propia

Componentes / Estaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	1	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0
14	0	0	0	1	0	0	0	0	0
15	0	0	0	1	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	1	0	0	0
21	0	0	0	0	0	1	0	0	0
22	0	0	0	0	0	1	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	0	0	0	0	0	0	1	0	0
25	0	0	0	0	0	0	1	0	0
26	0	0	0	0	0	0	1	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	0	0	0	0	1	0
29	0	0	0	0	0	0	0	1	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	1
31	0	0	0	0	0	0	0	0	1
32	0	0	0	0	0	0	0	0	1

de cada vehículo y la cantidad de piezas que tiene instalado el vehículo (npsz-act). Las funciones más relevantes que se detallan en este elemento es *falla* que denota cuando a un vehículo no se le instala un componente en la estación correspondiente (ver Figura 4.5).

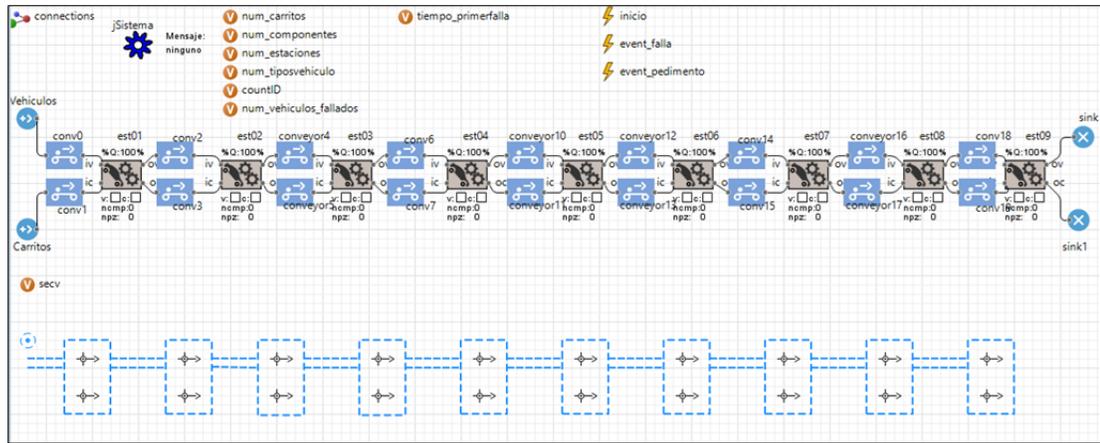


FIGURA 4.3: Esquema de simulación de la Línea 1

Fuente: Elaboración propia, salida de Anylogic

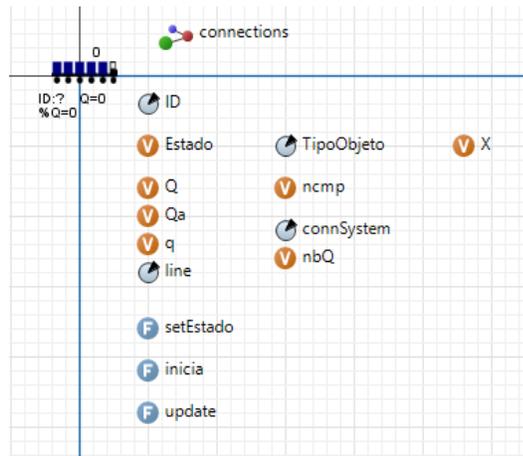


FIGURA 4.4: Información del elemento **carritos** en el software Anylogic

Fuente: Elaboración propia

El elemento estación posee dos entradas y dos salidas una para los vehículos y otra para los carritos, solo puede atender un vehículo y un carrito a la vez. Para su creación se combinan un *queue* y un *delay* para cada entrada (ver Figura 4.6).

Además se crean arreglos (matrices, ver tablas 4.1 y 4.4) para la localización de los carritos (Loccarr), la localización de los vehículos (Locveh) y funciones como *cajas* que posibilita determinar el inventario de cajas que puede existir en cada estación. Además se realiza un diagrama de estado (ver Figura 4.7), que visualiza cuando cada vehículo pasa por una estación.

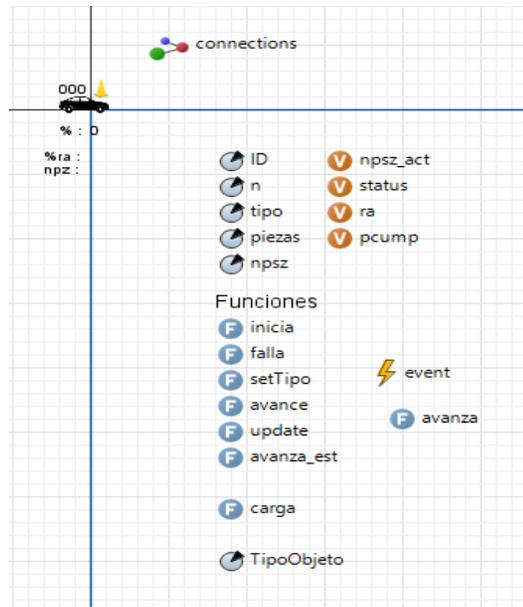


FIGURA 4.5: Información del elemento **vehículos** en el software Anylogic

Fuente: Elaboración propia

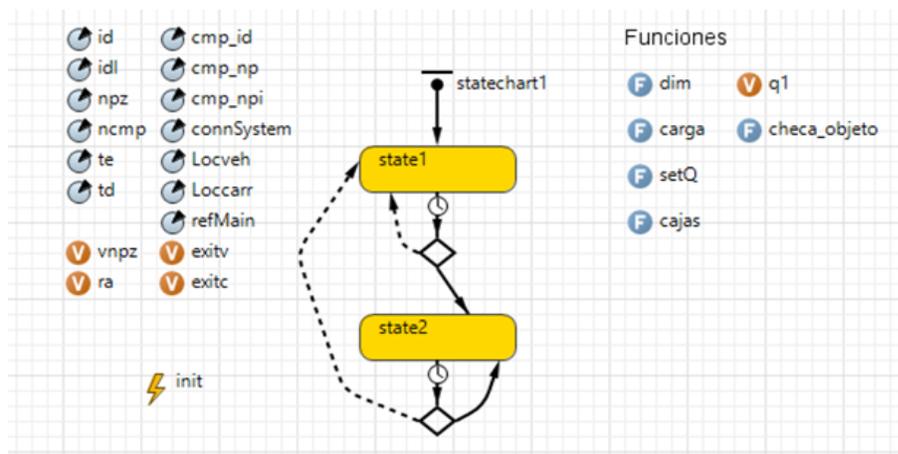


FIGURA 4.6: Estructura del elemento **estación** en el software Anylogic

Fuente: Elaboración propia

El elemento sistema funciona como un elemento de control para coordinar las estaciones, los pedidos, los carritos y los vehículos. Para ello, se declara información de cada uno de estos elementos, así como funciones principales, arreglos y funciones auxiliares que permiten la realización de la simulación (ver Figura 4.8).

El arribo de los vehículos a la línea se define de acuerdo a la demanda de un día

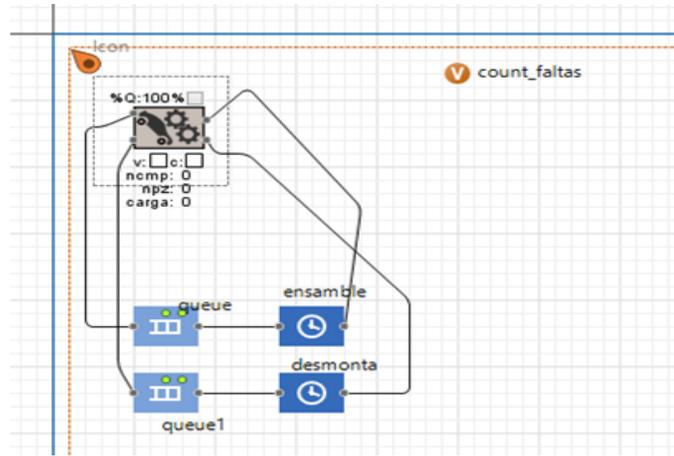


FIGURA 4.7: Información del elemento **estación** en el software Anylogic

Fuente: Elaboración propia

Mensaje: ninguno

Información general	Información vehiculos/tipo	Información estaciones	Información componentes	Información carritos
<ul style="list-style-type: none"> ntveh ncmp nest ncito nvehfail vehmax 	<ul style="list-style-type: none"> v_tipo v_status 	<ul style="list-style-type: none"> e_id e_line e_cmp e_max 	<ul style="list-style-type: none"> c_idi c_pzb c_ped c_pedest 	<ul style="list-style-type: none"> cito_Q cito_linea1 cito_linea2 cito_est nbQ
<p>Funciones principales</p> <ul style="list-style-type: none"> load_infcomponents load_infvehiculos load_infestaciones load_infcarritos load_inf setStatus iniciar_pedimentos recabar_pedidos event_inicio 	<p>Funciones de construccion (arreglos)</p> <ul style="list-style-type: none"> dimcito dimest dimveh dimcmp 	<p>Funciones auxiliares</p> <ul style="list-style-type: none"> count_filelines count_filecolumns load_prueba set_msg1 		

FIGURA 4.8: Información del elemento **sistema** en el software Anylogic

Fuente: Elaboración propia

de trabajo de la empresa, a partir de la cual se calcula una probabilidad de entrada por cada tipo de vehículo. En la Figura 4.9 se puede apreciar que se declara un total máximo de arribos de 720 vehículos, debido a que el tiempo entre llegadas a la línea

es de 60 segundos y se realiza la simulación para 12 horas de trabajo. En el caso de los carritos su llegada se contabiliza mediante el módulo *schedule* donde se registran los tiempos de arribo de los carritos.

Parameter	Value
Name	sVehiculos
Show name	<input checked="" type="checkbox"/>
Ignore	<input type="checkbox"/>
Single agent	<input checked="" type="radio"/>
Population of agents	<input type="radio"/>
modo llegada:	<input type="radio"/> secuencial <input type="radio"/> aleatorio <input checked="" type="radio"/> dist. usuario
jSistema:	jSistema
refMain:	this
tiempo entre llegadas:	60
Maximo de arribos:	720
p1:	0.1
p2:	0.2
p3:	0.1
p4:	0.3
p5:	0.3

FIGURA 4.9: Datos de entrada del elemento **vehículos** para la simulación

Fuente: Elaboración propia

Con todos los elementos creados y sus relaciones definidas se ejecuta el modelo de simulación bajo el escenario descrito (ver Figura 4.10).

La simulación del escenario actual de la línea 1 para tres carritos que abastecen cada uno a tres estaciones evidencia como resultado un promedio de 140 vehículos incompletos de un total de 720. Esto implica que a estos vehículos, por lo menos un componente no se le instala en la estación correspondiente por falta de material provocando retrasos en la línea incumpliendo los tiempos establecidos de ensamble.

Los vehículos que quedan incompletos necesitan un retrabajo en la línea final donde se les instalan las piezas faltantes y su ensamble es completado.

Los resultados de la simulación se mostraron a los expertos del proceso los cuales consideran que son coherentes. No se realiza una comparación con los datos históricos de la empresa debido a que el número de vehículos incompletos los con-

tabilizan de manera general al concluir el ensamble en todas las líneas de trabajo. En el caso de la investigación se realiza la simulación solamente de la línea 1 como se menciona anteriormente y la empresa no maneja esta información de forma específica.

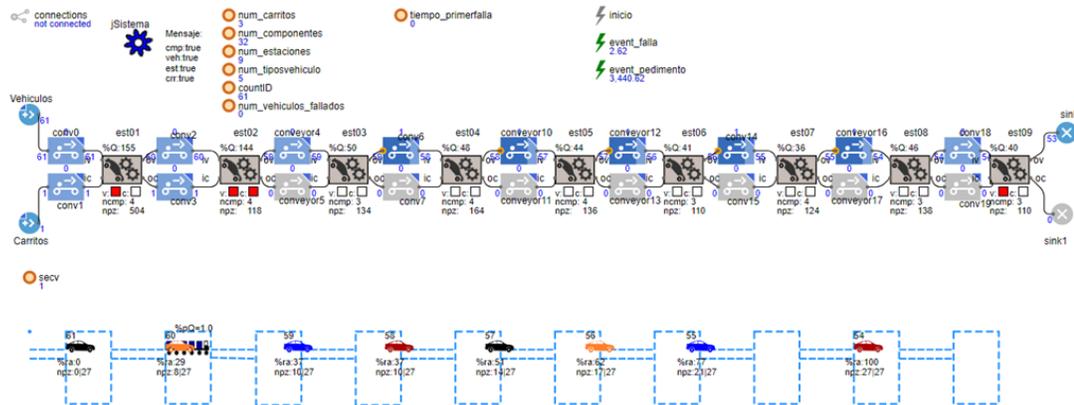


FIGURA 4.10: Simulación de la Línea 1 en Anylogic

Fuente: Elaboración propia, salida de Anylogic

Para estimar la variabilidad del modelo actual es necesario determinar cuántas replicas (n) de la simulación se requieren para garantizar confiabilidad en los resultados. Se utiliza un error ($e=3$) que indica la tolerancia en la estimación (media) de la respuesta, siendo el grado de precisión o variabilidad de la simulación que se admite. Este error es seleccionado a partir de un análisis que demuestra que con un error más pequeño el número de muestras necesarias es mayor. Se realiza un pequeño diseño de experimentos con 10 experimentaciones, para determinar el número de réplicas que se requieren (ver Figura B.1).

Los cálculos con $e=5$ y $e=7$ ofrecen como resultados $n=31.20$ y $n=15.92$, respectivamente. Mientras que con $e=3$ se tiene una $n=86.68$, la cual es llevada a 100 réplicas para tener una mayor confiabilidad en los resultados.

Una vez calculado el número de experimentos necesarios, se requieren al menos 87 réplicas, realizándose un total de 100 en el software Anylogic y se calcula la desviación estándar siendo de 12.56 (ver Figura 4.11). Este resultado se considera

como punto de partida para la posterior optimización.

ModelFabv2any7 : ParametersVariation1

Parameters	
Y1	1
Y2	1
Y0	1
E0	448
E1	56
E2	7

- Mediaact
123
- Media
139.53
- Desviacion
12.581
- Objetivos
[100]
- iter
100

FIGURA 4.11: Réplicas de Simulación de la Línea 1

Fuente: Elaboración propia, salida de Anylogic

4.3 ETAPA 3: ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

El algoritmo de optimización se desarrolla en el software Anylogic tomando como base la simulación descrita en la sección anterior. La versión del Anylogic que se utiliza es la estudiantil y tiene limitaciones en cuanto a la cantidad de variables y al número de iteraciones, admitiendo un total de 7 variables y 500 iteraciones.

Es necesario un ajuste de la cantidad de componentes que deben tener las estaciones para garantizar que se le instale los componentes a los vehículos en la estación que corresponde. Este ajuste se realiza a través de una variación de parámetros que funciona como un heurístico de variación de parámetros aleatorios utilizando el Anylogic.

Consiste en una exploración aleatoria de un rango de componentes factibles calcula la cantidad inicial de cajas de componentes que se deben tener para garantizar

que no queden vehículos incompletos. Este ajuste se realiza debido a que no se cuenta con los datos de la cantidad de cajas por tipo de componente que quedan en las estaciones en cada turno de trabajo (ver Tabla 4.5).

TABLA 4.5: Factor de nivel de carga por estaciones

Fuente: Elaboración propia

Estaciones	Factor de Nivel de Carga (FNC)
1	1,64
2	1,46
3	1,23
4	1,24
5	1,62
6	1,41
7	1,44
8	1,89
9	1,81

La optimización se realiza con el objetivo de garantizar la disponibilidad de los componentes en las estaciones para el ensamble de los vehículos utilizando la menor cantidad de carritos posibles.

Se crea una variable binaria para cada carrito (Y_0 , Y_1 y Y_2), que toma el valor de 1 si se utiliza el carrito y 0 en caso contrario.

Debido a las limitantes antes mencionadas se forman 3 variables enteras (E_0 , E_1 y E_2) de rango de 0 a 511 las cuales pueden transformarse en cadenas binarias de tamaño 9. Por ejemplo, si se tiene que $E_0=433$ la cadena binaria que lo representa sería (110110001), lo cual se interpreta en que el carrito 1 aprovisiona las estaciones 1, 2, 4, 5 y 9 de la línea 1.

Estas variables permiten determinar si un carrito visita una estación o no. Se toma como máximo valor el entero 511 siendo su descomposición binaria (111111111), lo cual se traduce a que un carrito visita las 9 estaciones de la línea 1.

Por las restricciones del programa se realizan 500 iteraciones con 3 réplicas cada una en los escenarios analizados. En la investigación inicialmente se ejecuta

la optimización partiendo de 100 réplicas y no se logra alcanzar un resultado. Se disminuye el número de réplicas y el software comienza a ofrecer soluciones para un número de réplicas menor o igual que 3. Las réplicas en simulación permiten definir una mejor estimación de la respuesta.

Una vez se tienen todos los elementos de la optimización se realizan diferentes experimentaciones tomando como partida el escenario actual de trabajo. Se realizan dos escenarios para el análisis, en el primero se utilizan tres carritos debido a que son los que tiene la empresa disponible en esta línea y se van aumentando la cantidad de estaciones que aprovisionan cada uno.

En un segundo escenario se disminuye a 2 el número de carritos a utilizar para buscar resultados que puedan representar un ahorro de recursos para la empresa. Para ello, se varían las estaciones a visitar hasta lograr que no queden vehículos pendientes de instalación de componentes. Las combinaciones realizadas se muestran a continuación (ver Tabla 4.6).

TABLA 4.6: Relación de experimentaciones realizadas

Fuente: Elaboración propia

Escenario	Cantidad de carritos	Cantidad de estaciones asignadas
1	3	<3
		3
		4
		5
		6
		7
		8
		9
		2
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

En la la Figura 4.12 se muestran los resultados obtenidos en la instancia (3-5) correspondiente a 3 carritos visitando hasta 5 estaciones cada uno. La columna de *Current* indica la iteración actual y el objetivo que alcanza, mientras que la columna de *Best* guarda la mejor iteración hasta el momento. Así mismo se muestra el valor de cada variable y su descomposición binaria. Como se puede apreciar quedan en promedio 0 vehículos incompletos en esta instancia, siendo el tiempo de corrida de 3 624.18 segundos.

ModelFabv2 : Optimization

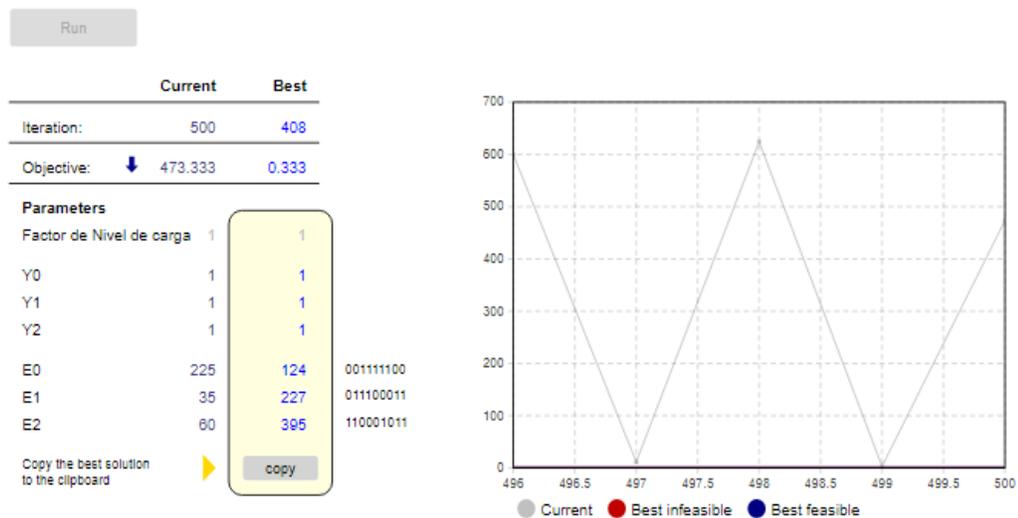


FIGURA 4.12: Resultados obtenidos en el escenario 1 con hasta 5 estaciones asignadas a cada carrito

Fuente: Elaboración propia

Las estaciones a abastecer por el carrito 1 (E0) son la 3, 4, 5, 6 y 7, el carrito 2 (E1) reaprovisiona a la 2, 3, 5, 8 y 9, mientras que al 3 (E2) se le asignan 1, 2, 6, 8 y 9.

La mejor solución encontrada para el resto de las instancias analizadas del escenario 1, así como el tiempo que tarda en encontrar estas soluciones se muestra en la tabla 4.7.

Posteriormente se realiza la experimentación del escenario 2. En este caso se

TABLA 4.7: Resultados del escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Escenario	Cantidad de carritos	Cantidad de estaciones asignadas	Mejor solución encontrada	Tiempo de corrida (seg.)
1	3	<3	N/A	-
		3	131,33	3679,68
		4	14,67	3696,02
		5	0,33	3624,18
		6	0	265,12
		7	0	57,91
		8	0	48,7
		9	0	26,31

muestra en la figura 4.13 los resultados obtenidos de la instancia (2-5) que corresponde a 2 carritos y a cada uno se le puedan asignar hasta 5 estaciones. El tiempo que tarda el software en ofrecer la mejor solución es de 3 975.92 y aproximadamente 5 vehículos quedan incompletos.

ModelFabv2 : Optimization

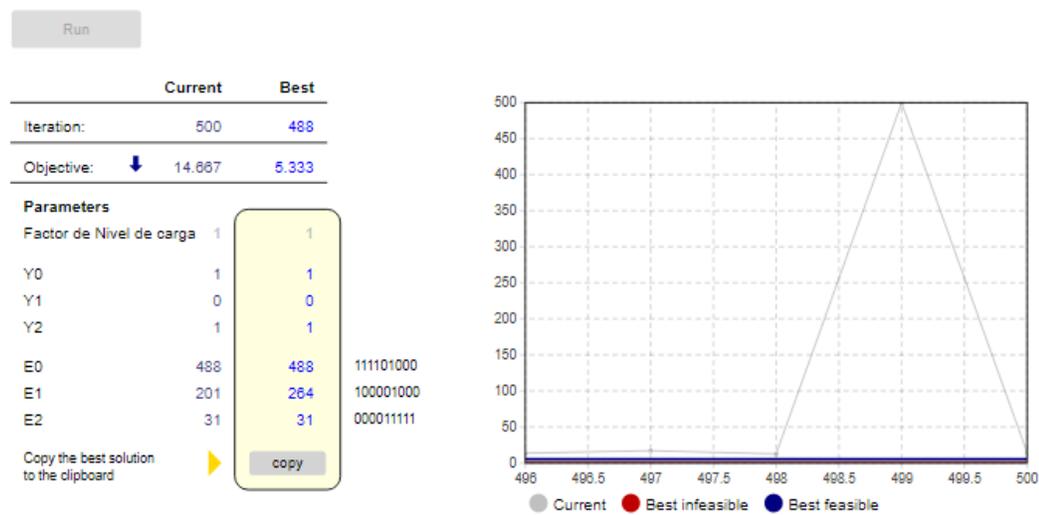


FIGURA 4.13: Resultados obtenidos en el escenario 2 con hasta 5 estaciones asignadas a cada carrito

Fuente: Elaboración propia

Las estaciones que aprovisiona el carrito 1 (E0) son la 1, 2, 3, 4, y 6, mientras que al carrito 2 (E2) se le asignan 5, 6, 7, 8 y 9. En la tabla 4.8 se muestran las

soluciones obtenidas para el resto de las instancias de este escenario.

TABLA 4.8: Resultados del escenario 2

Fuente: Elaboración propia

Escenario	Cantidad de carritos	Cantidad de estaciones asignadas	Mejor solución encontrada	Tiempo de corrida (seg.)
2	2	<3	N/A	-
		3	604,33	3537,36
		4	589,33	3655,97
		5	5,33	3975,92
		6	0	2048,72
		7	0	1016,72
		8	0	847,35
		9	0	26,83

4.4 ETAPA 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

El escenario actual que tiene la empresa provoca que en promedio 140 vehículos queden incompletos lo que representa el 19.4% del total. Se estima el intervalo de confianza para 100 experimentos con media 139.53 y desviación estándar 12.56 y se calcula la cantidad máxima de vehículos incompletos, garantizándose con un 97.5% de confianza que como máximo se tendrán 170 vehículos incompletos (ver el caso 1 del Apéndice C).

En la optimización con el objetivo de obtener resultados más precisos y un intervalo de confianza esperado se decide replicar 100 veces las soluciones de la optimización. Se tienen algunas instancias difíciles (2-3 y 2-4) en las cuales se obtienen soluciones infactibles que se realizaron para cubrir el diseño de experimentos pero no se analizan como instancias potenciales.

El análisis estadístico de las soluciones potenciales se realiza sobre la mejor solución encontrada por el optimizador en cada una de las instancias para determinar la confiabilidad de la respuesta dada por el optimizador, calculándose la media y la desviación estándar (ver tabla 4.9).

Una vez se tienen la media y la desviación se calculan los límites máximos de tolerancia para cada instancia, un ejemplo de ello es en el caso de la instancia 3-4 (3 carritos que visiten al menos 4 estaciones) donde podemos afirmar con un 97.5% de confianza que la cantidad máxima de vehículos que quedarán incompletos en la línea 1 es de 32 vehículos (ver tabla 4.9). La descripción del cálculo de los límites de tolerancia se puede apreciar en el caso 2 del Apéndice C.

Al aplicar el algoritmo de optimización del software Anylogic aumentando las estaciones a aprovisionar se logra reducir a 0 los vehículos incompletos si se le asignan a los carritos hasta 5 estaciones. Si se disminuye a 2 carritos y se mantienen las mismas 5 estaciones que en el escenario anterior se comprueba que no se reduce totalmente la cantidad de vehículos incompletos. La disminución de carritos ofrece a la empresa un ahorro en los costos operativos y mejora la productividad.

TABLA 4.9: Resultados de la experimentación

Fuente: Elaboración propia

Escenarios	Cantidad de carritos	Cantidad de estaciones asignadas	Media	Desviación estándar	Límite máximo (X máx.)
1	3	<3	N/A	-	-
		3	136,75	5,65	150,06
		4	17,84	5,89	46,01
		5	0,92	1,92	7,17
		6	0,74	1,51	7,74
		>6	-	-	-
2	2	<5	N/A	-	-
		5	13,31	5,76	36,35
		6	1,06	1,95	8,5
		>6	-	-	-

Los resultados obtenidos evidencian que mientras mayor es el número de carritos utilizados el número de vehículos incompletos es menor. En ambos casos para 2 y 3 carritos al asignar un mayor número de estaciones a abastecer por cada carrito disminuye la cantidad de vehículos incompletos en la línea 1, lo cual se traduce para la empresa en una menor cantidad de retrabajos en la línea final.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones derivadas de la investigación, las contribuciones de la misma; así como el trabajo futuro a desarrollar.

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

La logística de aprovisionamiento es muy importante para garantizar los suministros necesarios para satisfacer las necesidades de los procesos operativos, es por ello que las empresas deben gestionarla de una manera eficiente.

En las empresas que cuentan con procesos continuos de producción formados por líneas de ensamble es muy importante evitar las interrupciones que derivan en pérdidas económicas e incumplimiento de las órdenes del cliente. En la investigación se agrupan las principales causas de los paros de línea, determinando como causa fundamental en el caso de estudio analizado la falta de componentes necesarios al momento del ensamble en los puestos de trabajos.

En la investigación se realizó una revisión de los diferentes métodos y herramientas utilizadas para ejemplos similares al caso de estudio, determinando la optimización vía simulación como la herramienta más adecuada para su aplicación.

Se propuso una metodología estructurada en cuatro etapas que abarcan desde la recopilación de datos hasta el análisis de resultados.

Se simuló en el software Anylogic el escenario actual de la línea 1 del proceso de ensamble de la empresa para 12 horas de trabajo, ofreciendo como resultados que a 140 vehículos en promedio no se le instalan en la estación correspondiente los componentes que necesitan.

Se desarrolla la optimización de diferentes instancias para la misma línea variando los parámetros: cantidad de carritos a utilizar y cantidad de estaciones a visitar por cada uno.

Para garantizar que con 3 carritos no quede ningún vehículo incompleto estos deben aprovisionar al menos 5 estaciones de trabajo.

Al reducir el número de carritos a 2, buscando disminuir los costos operativos de la empresa se tiene que es necesario que cada carrito visite al menos 6 estaciones para que no queden vehículos incompletos.

A medida que se disminuya la cantidad de carritos a utilizar se necesita aumentar la cantidad de estaciones a visitar por cada uno de ellos, para garantizar que a todos los vehículos se le instalen los componentes en la estación que le corresponde.

5.2 CONTRIBUCIONES

La utilización de la optimización vía simulación contribuye a realizar mejoras dentro de la cadena de suministro, específicamente el caso de estudio se centró en el abastecimiento interno ofreciendo la posibilidad de aumentar el desempeño del proceso si se implementan los resultados.

Se entrega a la empresa una herramienta que les permite analizar sus procesos sin afectar el funcionamiento de los mismos.

Con el desarrollo de este proyecto se logró un vínculo de colaboración entre la universidad y la empresa objeto de estudio, el cual constituye la base de futuros proyectos.

La herramienta puede ser replicada a otros procesos con características similares, realizando los ajustes correspondientes.

5.3 TRABAJO A FUTURO

La implementación de los resultados obtenidos con esta investigación depende de los directivos de la empresa donde se desarrolló el caso de estudio.

Se puede ampliar la investigación a otras líneas de ensamble de este proceso, debido a que el proceso de ensamble consta de 7 líneas, las cuales se componen de estaciones de trabajo que son reaprovisionadas de acuerdo a los componentes que se instalan en *just in secuencia*, *just in time* y elaboración de *one kit*. En la tesis sólo se trabajó en la línea 1 y en las 9 estaciones de reaprovisionamiento *just in time*, siendo estas estaciones las que se abastecen por medio de carritos o *feeders*.

APÉNDICE A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Caja: Depósito donde se ubican los componentes necesarios para el ensamble, varían de 4 a 200 componentes por caja dependiendo del tipo de componente.

Carrito: Es el medio de transporte para llevar los componentes a las estaciones, llevan cajas de componentes y están asignados a una línea de producción.

Componentes: Son los objetos o piezas de las que se componen los vehículos, se manejan como unidades sueltas y agrupadas en cajas.

Tiempo entre estaciones: Se refiere al tiempo que se tardan los carritos y/o vehículos en llegar de una estación a otra.

Tipo de componentes: Se refiere a la identificación de los componentes.

Vehículos: Son los objetos que serán fabricados en las línea de procesos, son de varios tipos, y tienen distintas necesidades.

APÉNDICE B

NÚMERO DE EXPERIMENTOS

Para definir el tamaño de la muestra se puede utilizar la fórmula (1), la cual estima un tamaño de muestra dado un intervalo de confianza ($z_{\alpha/2}$), un error máximo (e) y una desviación estándar conocida (σ), si no se conoce esta desviación se puede hacer una estimación de esta (s) con una muestra pequeña ($n \leq 30$) y usando la fórmula (2).

$$(1) \quad n = \left(\frac{z_{\alpha/2} * \sigma}{e} \right)^2$$

Media	140,4
Desviación estándar	14,25

$$(2) \quad n \approx \left(\frac{z_{\alpha/2} * s}{e} \right)^2 \quad \longrightarrow \quad n \approx \left(\frac{1.96 * 14,25}{3} \right)^2$$

$$\underline{n \geq 86.68}$$

FIGURA B.1: Cálculo del número de experimentos

Fuente: (Walpole y Myers, 1993)

APÉNDICE C

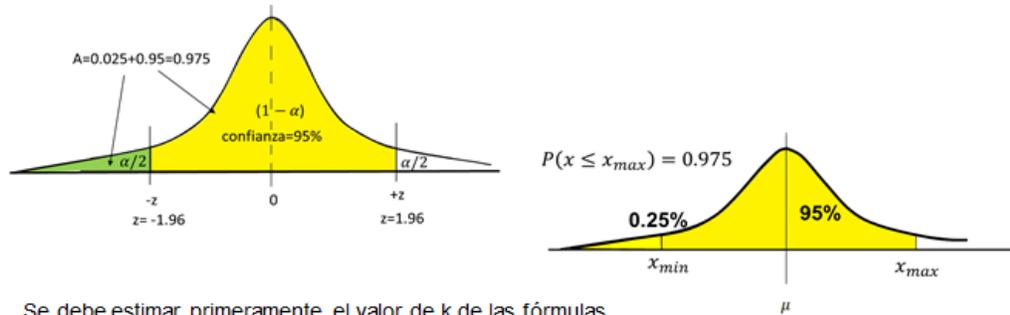
ESTIMACIÓN DE LÍMITES DE TOLERANCIA

Caso 1: Cálculo de los límites de tolerancia del sistema actual.

Se realiza el diseño de experimentos con $n=100$ y se estima una media experimental de 139.53 con una desviación estándar de 12.56, se desea establecer los límites de tolerancia al 95 % y con un nivel de 99 % de confianza. Con el valor de k pueden ya utilizarse las fórmulas (3) y (4) para definir el intervalo (ver Figura C.1).

Caso 2: Cálculo de los límites de tolerancia del escenario (3-4).

Se realiza en Anylogic el diseño de experimentos para la instancia (3-4) con $n=100$ y se obtiene una media de 17.84 con una desviación estándar de 5.89, se desea establecer los límites de tolerancia al 95 % y con un nivel de 99 % de confianza. Se calcula el intervalo y el límite máximo de tolerancia (ver Figura C.2).



Se debe estimar primeramente el valor de k de las fórmulas

k para n=100 , tolerancia de 95% y confianza de 99%

Tolerancia de 95% : $(1 - \alpha) = 0.95$ $\alpha = 0.05$

Confianza de 99% : $(1 - \gamma) = 0.99$ $\gamma = 0.01$

En tabla factores de tolerancia de la distribución normal **k = 2.355**

$$(3) \quad x_{min} = \bar{x} - ks \quad x_{min} = 139.53 - (2.355)12.56 = 109.95$$

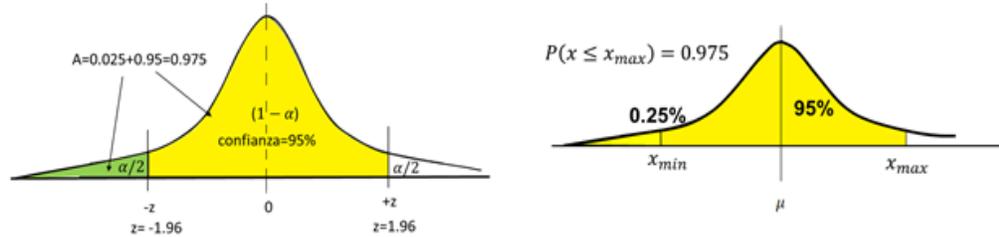
$$(4) \quad x_{max} = \bar{x} + ks \quad x_{max} = 139.53 + (2.355)12.56 = 169.19$$

Nuestro intervalo queda entonces definido en términos de probabilidad

$$P(109.95 \leq x \leq 169.19) = 0.95$$

FIGURA C.1: Cálculo de los límites de tolerancia del sistema actual

Fuente: Elaboración propia basado en (Walpole y Myers, 1993)



Se debe estimar primeramente el valor de k de las fórmula

k para $n=100$, tolerancia de 95% y confianza de 99%

Tolerancia de 95% : $(1 - \alpha) = 0.95$ $\alpha = 0.05$ En tabla factores de tolerancia
 Confianza de 99% : $(1 - \gamma) = 0.99$ $\gamma = 0.01$ de la distribución normal $k = 2.355$

$$x_{max} = \bar{x} + ks$$

$$x_{max} = 17.84 + 2.355 * 5.89$$

$$x_{max} = 31.70$$

Definido en términos de probabilidad como:

$$(3) \quad x_{min} = \bar{x} - ks \quad x_{min} = 17.84 - (2.355)5.89 = 3.97$$

$$(4) \quad x_{máx} = \bar{x} + ks \quad x_{máx} = 17.84 + (2.355)5.89 = 31.70$$

$$\underline{P(3.97 \leq x \leq 31.70) = 0.95}$$

FIGURA C.2: Cálculo de los límites de tolerancia del escenario (3-4)

Fuente: Elaboración propia basado en (Walpole y Myers, 1993)

APÉNDICE D

SOFTWARE DE SIMULACIÓN ANYLOGIC

Anylogic es un software de simulación de tipo discreto y continuo, basado fuertemente en el modelado con agentes, es una herramienta visual para modelar sistemas de forma gráfica a través de bloques o componentes visuales.

Además, permite la personalización de componentes a partir de modificar sus propiedades o eventos a los que responden, la construcción de nuevos componentes basados en otros, o la construcción a partir de unir componentes para formar uno nuevo, también agregar nuevas funcionalidades a través del lenguaje JAVA.

Tipos de sistemas

Los tipos de sistemas que pueden desarrollarse en Anylogic son tanto modelos de sistemas continuos como discretos, puede modelarse el crecimiento de forma continua de una población de diferentes tipos de individuos en un ecosistema, o de forma discreta como el crecimiento de consumidores de un producto cuando este entra al mercado y su decrecimiento cuando el interés decae.

Otro tipo de sistemas que pueden simularse en Anylogic son líneas de proceso, líneas en donde se fabrica un producto, o se da servicio a personas, lo que se llama líneas de espera, que son sistemas de naturaleza discreta, pueden tener elementos aleatorios en su ejecución y que existe una gran dificultad en desarrollar modelos

matemáticos cuando se trata de ejemplos prácticos.

Paletas de componentes

Anylogic no tendría su capacidad de modelado sencillo sin sus distintas paletas de componentes cada una dedicada a un tipo específico de modelación, en estas paletas existen componentes que se pueden relacionar con la entidad de un sistema y su relación con otras, componentes que pueden monitorear la actividad del sistema o de sus variable y que sirven para cambiar el comportamiento de las mismas durante la ejecución (ver Figura D.1).

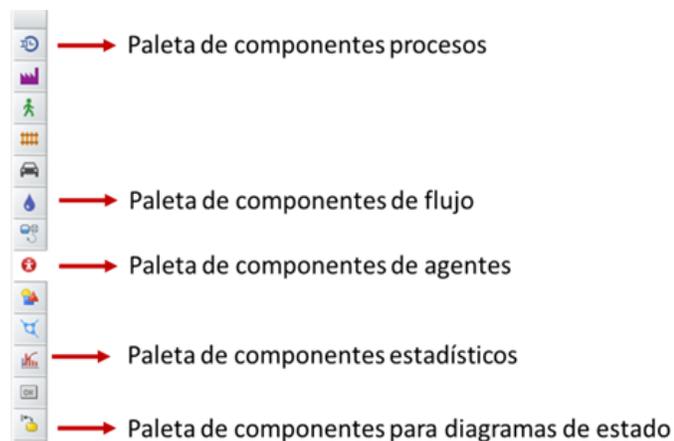


FIGURA D.1: Paleta de componentes

La paleta de procesos (ver Figura D.2) es de las importantes cuando se trata de modelar líneas de proceso sus cuatro componentes básicos son:

- *Source*: Fuente de objetos a procesar, define cómo llegan y cuándo llegan
- *Queue*: Cuarto de espera
- *Delay*: Se define como retardo, puede entenderse como el servidor o el tiempo que un servidor toma para llevar a cabo un proceso
- *Sink*: Destino final de los objetos

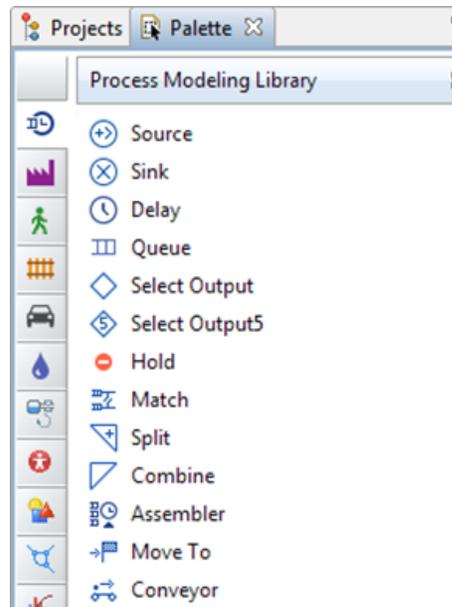


FIGURA D.2: Paleta de procesos

Conveyor: Componente no básico útil para mover un objeto de una posición a otra en el sistema, se identifica como una banda transportadora (ver Figura D.3).

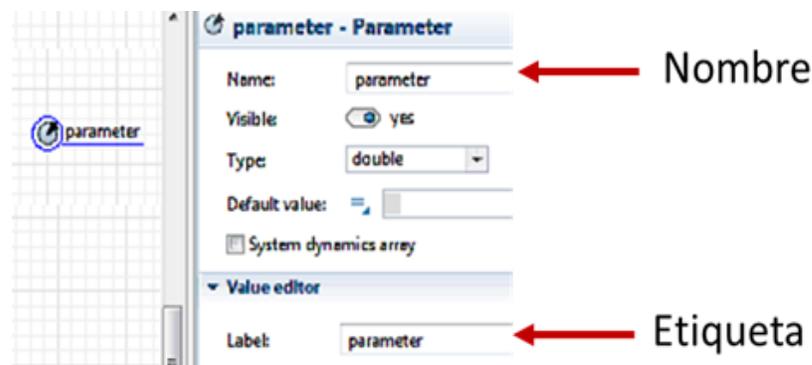


FIGURA D.3: Componente parámetro y sus propiedades

La **paleta de agentes** tiene relación con la modelación orientada a agentes, en ella se pueden encontrar componentes útiles para agregar variables y parámetros a un sistema. Las variables son necesarias para su correcto funcionamiento y los parámetros permiten modificar el comportamiento del sistema cuando se está simulando, además posee componentes útiles para definir eventos en el sistema (ver Figura D.4).

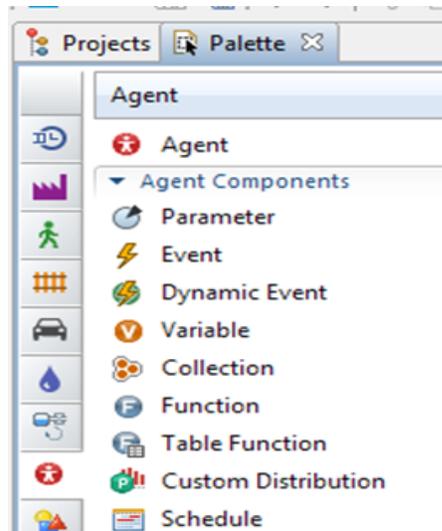


FIGURA D.4: Paleta de agentes

Componentes

Cada componente tiene sus propiedades y eventos a los que responde, que se deben corresponder con las características del sistema que se está simulando. Estas características se definen de igual manera para todos los componentes, pero todos si tienen alguna propiedad que se puede modificar como por ejemplo el nombre del componente o el simulador no lo etiquetaría durante la simulación.

Source: Componente fuente, en él es importante definir la razón rate o el tiempo en que llegan los artículos al sistema, y cómo se distribuyen estas llegadas en el tiempo (distribución de probabilidad), (ver Figura D.5).

Este componente puede responder a eventos de forma personalizada como a eventos de salida del artículo o de llegada.

Sink: Componente destino o sumidero, no posee propiedades específicas, pero es un componente que puede responder a eventos finales como la salida de objetos en el momento en salen del sistema (ver Figura D.6).

Delay: Es la propiedad más importante de este componente es el tiempo y cómo se define, no es muy diferente del source salvo que este no genera artículos,

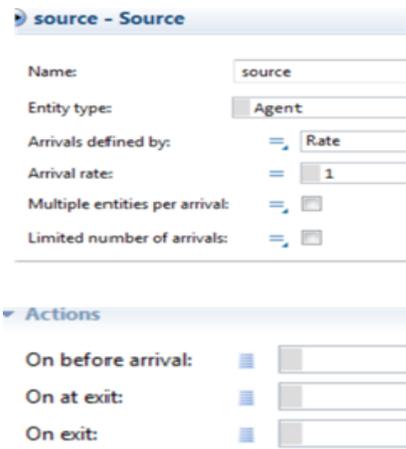


FIGURA D.5: Componente *Source* y sus propiedades

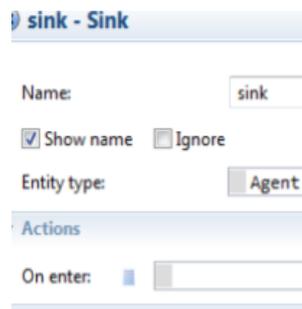


FIGURA D.6: Componente *Sink* y sus propiedades

sólo los detiene un tiempo, es también capaz de responder a eventos como la llegada de artículos o su salida (ver Figura D.7).

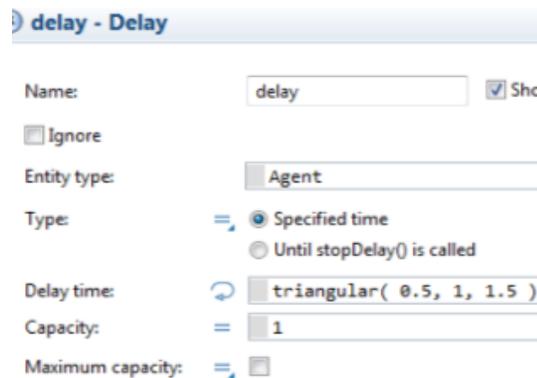


FIGURA D.7: Componente *Delay* y sus propiedades

Queue: Componente que sirve para mantener los artículos en espera mientras

los servidores están ocupados, una de sus propiedades modificables es el tamaño o capacidad del cuarto de espera. Es también capaz de responder a eventos como la llegada de artículos o su salida (ver Figura D.8).

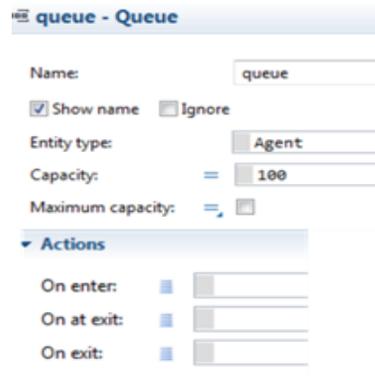


FIGURA D.8: Componente *Queue* y sus propiedades

Ventajas

Anylogic no es el único software de simulación de eventos discretos, pero si uno de los más completos, algunas de las características de Anylogic no están presentes en otros simuladores, algunas de estas son:

- Permite al igual que otros simuladores una modelación visual, mediante una gran cantidad de componentes visuales clasificados por su uso que se pueden identificar con partes de sistemas reales o con sus procesos.
- Permite una alta personalización de los componentes incluidos para que se comporten lo más parecido al componente real, por ejemplo puede personalizarse la respuesta a eventos característicos que ocurren en el componente por ejemplo la salida On exit o entrada On enter a un proceso.
- Se pueden crear componentes nuevos desde cero o mediante la unión de unos componentes con otros.
- La simulación se hace mediante agentes, un paradigma de modelación que permite modelar interacciones entre las entidades de un sistema o aquello que pueda afectarle.

- Permite la utilización de diagramas de flujo y diagramas de estado, lo que puede facilitar la modelación de ciertos procesos y sus “repentinos cambios” debido a un evento en el sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- AHMAD, S. M. y K. P. H. YOHANES (2013), «Steel supply chain management by simulation modelling», *Benchmarking: An International Journal*, **20**, págs. 45–61.
- ALBEY, E. y U. BILGE (2011), «A hierarchical approach to FMS planning and control with simulation based capacity anticipation», *International Journal of Production Research*, **11**(49), págs. 3319–3342.
- AMIA (2019), «Boletín de prensa de Asociación Mexicana de la Industria Automotriz», .
- AMIRI, M. y A. MOHTASHAMI (2012), «Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm», *Int J Adv Manuf Technol*, (62), págs. 371–383.
- ANDERSON, D. y T. SWEENEY, D. AND WILLIAMS (2011), *Métodos cuantitativos para los negocios*, Thompson editoresa.
- BALLOU, R. H. (2004), *Logística, administración de la cadena de suministro*, quinta edición.
- BANKS, J., J. CARSON, B. NELSON y D. NICOL (2005), *Discrete- Event System simulation*, cuarta edición.
- BARCIA, K. (2007), «Metodología para Mejorar un Proceso de Ensamble Aplicando el Mapeo de la Cadena de Valor (VSM)», *Revista Tecnológica ESPOL*, **20**(1), págs. 31–38.

- BERNAL, J. V. y P. M. B. BERNAL (2015), «La simulación como herramienta para la mejora en el uso de recursos empresariales. Caso pruebas destructivas de calidad», *Ciencia y Tecnología*, **15**, págs. 41–54.
- CARBAJAL, Y., L. J. ALMONTE y P. MEJÍA REYES (2016), «La manufactura y la industria automotriz en cuatro regiones de México. Un análisis de su dinámica de crecimiento, 1980-2014», *Economía, teoría y práctica*, (45).
- CAVOSKI, S. y A. MARKOVIC (2017), «Agent based modelling and simulation in the analysis of customer behaviour on B2C e commerce sites», *Journal of Simulation*, **4**(11), págs. 335–345.
- CHICA, M., J. BAUTISTA y J. DE ARMAS (2018), «Benefits of robust multiobjective optimization for flexible automotive assembly line balancing», *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
- CHOPRA, S. y P. MEINDL (2008), *Administración de la cadena de suministro estrategia, planeación y operación*, tercera edición.
- CHRIS, O. A. G. (2018), «Modelling people is behaviour using discrete-event simulation: a review», *International Journal of Operations and Production Management*.
- CONRADS, M., A. SCHEFFER, H. MATTERN y M. KÖNIG, M. AND THEWES (2017), «Assessing maintenance strategies for cutting tool replacements in mechanized tunneling using process simulation», *Journal of Simulation*, **1**(11).
- DORMER, J. y R. GUNTHER, H. AND GUJJULA (2013), «Master production scheduling and sequencing at mixed-model assembly lines in the automotive industry», *Flexible Services and Manufacturing Journal*, **1**(27), págs. 1–29.
- DURANGO, L., J. OREJUELA y L. ORTIZ (2015), «Balance horizontal de líneas de ensamble para modelos mixtos», *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, **14**(26), págs. 121–138.

- EBRAHIMY, Y., S. M. ABOURIZK, S. FERNANDO y Y. MOHAMED (2011), «Simulation modeling and sensitivity analysis of a tunneling construction project is supply chain», *Engineering, Construction and Architectural Management. Supply Chain Management: An International Journal*, **15**, págs. 347–353.
- FACCIO, M., M. GAMBERI, A. PERSONA, A. AND REGATTIERI y F. SGARBOSSA (2013), «Design and simulation of assembly line feeding systems in the automotive sector using supermarket, kanbans and tow trains a general framework», *Journal of Management Control*, **2**(24), págs. 187–208.
- FATTAHI, P., N. TAVAKOLI, M. FATHOLLAH, A. ROSHANI y M. SALEH (2012), «Sequencing mixed-model assembly lines by considering feeding lines», *Int J Adv Manuf Technol*, (61), págs. 677–690.
- FIGUEIRA, G. y B. ALMADA-LOBO (2014), «Hybrid simulation- optimization methods: A taxonomy and discussion», *Simulation Modelling Practice and Theory*, (46), págs. 118–134.
- FU, M. (1994), «Optimization via simulation. A review.», *Annals of Operations Research*, (53), págs. 199–248.
- GARCÍA, E., H. GARCÍA y L. CÁRDENAS (2013), *Simulación y Análisis de Sistemas con Promodel*, segunda edición, Pearson, México.
- GÓMEZ, C. A. y P. N. QUINTA (2015), «Simulación de eventos discretos y líneas de balance, aplicadas al mejoramiento del proceso constructivo de la cimentación de un edificio», *Ingeniería y Ciencia*, págs. 157–175.
- GORLACH, I. y O. WESSEL (2008), «Optimal Level of Automation in the Automotive», *Engineering Letters*.
- GRAY, G., K. FOWLER y J. GRIFFIN (2010), «Hybrid optimization schemes for simulation based problems», *Procedia Computer Science*, **1**(1), págs. 1349–1357.

- GRULER, A., C. FIKAR, A. JUAN y C. HIRSCH, P. AND CONTRERAS (2017), «Supporting multi depot and stochastic waste collection management in clustered urban areas via simulation optimization», *Journal of Simulation*, **1**(11), págs. 11–19.
- GULLER, Y., M. AND UYGUN y B. NOCHE (2015), «Simulation-based optimization for a capacitated multi echelon production inventory system», *Journal of Simulation*, **4**(9), págs. 325–336.
- GUTIÉRREZ, V. J. y R. M. L. SILVA (2016), «Utilización de la simulación para mejorar el desempeño de líneas de espera», *Revista de Ingeniería Industrial Academia*, **10**(1), págs. 50–59.
- HASSAN, A. A. T. (2004), «A simulation model of quick response replenishment of seasonal clothing», *International Journal of Retail and Distribution Management*, **32**, págs. 320–327.
- INEGI (2018), «Boletín de prensa de Asociación Mexicana de la Industria Automotriz. Diciembre 2013», .
- KLEIJNEN, J., W. BEERS y I. NIEUWENHUYSE (2010), «Constrained optimization in expensive simulation, novel approach», *European Journal of Operational Research*, **1**(202), págs. 164–174.
- KLEIJNEN, J. y J. WAN (2007), «Optimization of simulated systems: OptQuest and alternatives», *Simulation Modelling Practice and Theory*, **3**(15), págs. 354–362.
- LOU, Y., X. FU y L. HUANG (2010), «Evaluation on the Commercialization Potential of Emerging Technologies based on Structural Equation Model», *12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*.
- OPTTEK SYSTEMS, I. (2019), «Sistema de Optimización OptQuest», <https://www.opttek.com/solutions/custom/>.

- PÉREZ, J. y C. PARRA (2010), «Improvement of an assembly process front seat to cars using system dynamics simulation», *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, **33**(1).
- PUCHE, R. J. C., G. J. COSTAS y V. P. ARRANZ (2016), «Simulación como herramienta de ayuda para la toma de decisiones empresariales. Un caso práctico», *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, **21**, págs. 188–204.
- ROTHER, M. y J. SHOOK (2000), «Observar para crear valor», *The lean Enterprise Institute*, **2**(1).
- RUIZ, C. (2016), «Desarrollo y estructura de la industria automotriz en México», *Análisis*, (6), pág. 32.
- SÁNCHEZ, C. (2014), «Automatización en la Industria Automotriz. Conceptos y Procesos», *Desarrollo Tecnológico e Innovación Empresarial*, **2**(3).
- SÁNCHEZ, C. A. (2005), «IMPACT OF THE FAILURES AND INTERRUPTION IN PROCESS. AN ANALYSIS OF VARIABILITY IN PRODUCTION PROCESSES», *Dyna*, (145), págs. 67–75.
- SECRETARÍA DE ECONOMÍA, S. (2016), «Estadística oficial de los flujos de IED hacia México, en Competitividad y Normatividad / Inversión Extranjera Directa de la Secretaría de Economía», .
- SERVERA, D. (2010), «Concepto y evolución de la función logística», *INNOVAR. Revista de Ciencias Administrativas y Sociales*, **20**(38), págs. 217–234.
- SWISHER, J., P. HYDEN, S. JACOBSON y L. SCHRUBEN (2000), «A survey of simulation optimization techniques and procedures», *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, págs. 119–128.
- VILLARREAL, M. M. G. (2007), «Modelación y optimización aplicada a la simulación de procesos y sistemas de manufactura», .

-
- WALPOLE, R. y R. MYERS (1993), *Probabilidad y Estadística 4ta Edición*, McGraw Hill.
- WAN, J. y L. LI (2008), «Simulation for Constrained Optimization of Inventory System by Using Arena and OptQuest», International Conference on Computer Science and Software Engineering.
- WANG, Q., M. SOWDEN y A. R. MILEHAM (2013), «Modelling human performance within an automotive engine assembly line», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **1**(68), págs. 141–148.
- XU, E., J. AND HUANG, L. H. HSIEH, L. AND LEE, Q. JIA y C. CHEN (2016), «Simulation optimization in the era of Industrial 4.0 and the Industrial Internet», *Journal of Simulation*, **4**(10), págs. 310–320.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Tanayi Martínez Hernández

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Logística y Cadena de Suministro

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

MEJORA DEL PROCESO DE ABASTECIMIENTO INTERNO APLICANDO
OPTIMIZACIÓN VÍA SIMULACIÓN

Natural de Cienfuegos, Cuba, nacida el 6 de julio de 1991. Hija de Evelio Martínez Casales y Midiala Hernández Santana de origen igualmente cienfueguero. Graduada de Ingeniería Industrial en la Universidad de Cienfuegos en Cuba en el año 2014. Cuento con tres años de experiencia laboral en la empresa de Recursos Hidráulicos de Cienfuegos principalmente en el departamento de inversiones. Desde el año 2018 vine a México para dedicarme a tiempo completo a la Maestría en Logística y Cadena de Suministro en la Universidad Autónoma de Nuevo León.