

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA
REDUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD DE TIEMPO EN LA ENTREGA DE
MUESTRAS PROTOTIPO**

TRABAJO TERMINAL DE GRADO

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN INGENIERÍA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

PRESENTA:

KAREN JANET GARCÍA OROZCO

DIRECTOR DE TRABAJO TERMINAL: DR. JENARO NOSEDAL SÁNCHEZ

TUTORA: M. EN I. ANA MARÍA DE LEÓN ALMARAZ

TUTOR: DR. JAVIER GARCÍA GUTIÉRREZ

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, DICIEMBRE 2021

CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
Descripción del problema.....	13
Objetivo General.....	14
Objetivos Particulares.....	14
Hipótesis.....	15
Justificación.....	15
Bosquejo de la metodología.....	17
CAPÍTULO I: PROBLEMA CASO DE ESTUDIO.....	19
1.1. Antecedentes.....	19
1.2. Descripción del proceso objeto de estudio.....	20
1.3. Duración de las actividades.....	22
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	23
2.1. Simulación.....	23
2.2. Modelos de simulación en la gestión de la Cadena de Suministro.....	24
2.3. Simulación en la manufactura.....	25
2.4. Simulación de Eventos discretos.....	28
2.5. Redes de Petri Coloreadas.....	29
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y APLICACIÓN.....	30
3.1. Análisis y mapeo del proceso.....	31
3.2. Comparativa de los valores de inactividad entre secuencias.....	36
3.3. Modelado del sistema.....	37
3.4 Descripción detallada del modelo.....	39

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	42
4.1. Resultados de los modelos	42
4.1.1. Curvas de distribución.....	42
4.1.2. Simulación de los tiempos promesa	44
4.2. Verificación y Validación del modelo	50
4.3. Implementación de la mejora en el proceso.....	51
4.4. Resultados de la implementación del Indicador de desempeño	53
Conclusiones.....	57
Recomendaciones	58
Trabajo futuro	59
Referencias	60
ANEXO A: Información del proceso de elaboración de prototipos.....	64
ANEXO B: Modelos de simulación implementados en Cpn Tools	69
ANEXO C: Manual de usuario del modelo implementado en JaamSim	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de contexto de las áreas involucradas en el proceso de elaboración de muestras prototipo.	20
Figura 2: Configuración del flujo del proceso estándar	21
Figura 3: Metodología para un proyecto de simulación	31
Figura 4: Diagrama de Gantt de una orden procesada de acuerdo la secuencia 1.....	32
Figura 5: Diagrama de Gantt de una orden procesada de acuerdo la secuencia 1.....	32
Figura 6: Diagrama de Gantt de una orden procesada de acuerdo la secuencia 1.....	33
Figura 7: Distribuciones empíricas para los periodos de inactividad identificados en cada secuencia.....	36
Figura 8: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 1	38
Figura 9: Curva de distribución acumulada de la duración del proceso para cada una de las 500 órdenes simulados bajo las 4 secuencias más frecuentes.	43
Figura 10: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 75% para la secuencia 1.....	45
Figura 11: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 75% para la secuencia 2.....	46
Figura 12: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 76 % para la secuencia 3.....	47
Figura 13: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 73% para la secuencia 4.....	48
Figura 14: Curva de distribución acumulada del Lead time para las 2000 órdenes simuladas	49
Figura 15: Diagrama de Gantt del proceso de una orden procesada de acuerdo a la secuencia 3.....	52
Figura 16: Histograma del lead time del proceso de elaboración de prototipos (muestra 2).....	53
Figura 17: Histograma de la magnitud de los retrasos en la fecha promesa de entrega (muestra 2).....	54
Figura 18: Histograma del tiempo de proceso (lead time) para las 2000 órdenes simuladas	55

Figura 19: Histograma de la magnitud de los retrasos en la fecha promesa de entrega (muestra 1).....	56
Figura 20:Diagrama de Gantt de la orden 2 procesada de acuerdo con la secuencia 1	60
Figura 21:Diagrama de Gantt de la orden 3 procesada de acuerdo con la secuencia 1	60
Figura 22:Diagrama de Gantt de la orden 4 procesada de acuerdo con la secuencia 1	60
Figura 23:Diagrama de Gantt de la orden 5 procesada de acuerdo con la secuencia 1	61
Figura 24:Diagrama de Gantt de la orden 10 procesada de acuerdo con la secuencia 1	61
Figura 25:Diagrama de Gantt de la orden 11 procesada de acuerdo con la secuencia 1	61
Figura 26:Diagrama de Gantt de la orden 12 procesada de acuerdo con la secuencia 1	62
Figura 27:Diagrama de Gantt de la orden 13 procesada de acuerdo con la secuencia 1	62
Figura 28:Diagrama de Gantt de la orden 17 procesada de acuerdo con la secuencia 1	62
Figura 29:Diagrama de Gantt de la orden 20 procesada de acuerdo con la secuencia 1	63
Figura 30:Diagrama de Gantt de la orden 22 procesada de acuerdo con la secuencia 1	63
Figura 31:Diagrama de Gantt de la orden 29 procesada de acuerdo con la secuencia 1	63
Figura 32:Diagrama de Gantt de la orden 21 procesada de acuerdo con la secuencia 2.....	64
Figura 33:Diagrama de Gantt de la orden 26 procesada de acuerdo con la secuencia 2.....	64
Figura 34:Diagrama de Gantt de la orden 27 procesada de acuerdo con la secuencia 2.....	64
Figura 35:Diagrama de Gantt de la orden 28 procesada de acuerdo con la secuencia 2.....	65
Figura 36:Diagrama de Gantt de la orden 30 procesada de acuerdo con la secuencia 2.....	65
Figura 37:Diagrama de Gantt de la orden 31 procesada de acuerdo con la secuencia 2.....	65
Figura 38:Diagrama de Gantt de la orden 1 procesada de acuerdo con la secuencia 3.....	66
Figura 39:Diagrama de Gantt de la orden 6 procesada de acuerdo con la secuencia 3.....	66
Figura 40:Diagrama de Gantt de la orden 7 procesada de acuerdo con la secuencia 3.....	66
Figura 41:Diagrama de Gantt de la orden 8 procesada de acuerdo con la secuencia 3.....	67
Figura 42:Diagrama de Gantt de la orden 18 procesada de acuerdo con la secuencia 3.....	67
Figura 43:Diagrama de Gantt de la orden 9 procesada de acuerdo con la secuencia 4.....	68
Figura 44:Diagrama de Gantt de la orden 23 procesada de acuerdo con la secuencia 4.....	68
Figura 45: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 1	69
Figura 46: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 2	70
Figura 47: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 3	71
Figura 48: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 4	72

Figura 49: Interfaz gráfica del usuario	74
Figura 50: Modelo de la secuencia 2 implementado en JaamSim.....	74
Figura 51: Modificaciones en la duración de las actividades.....	76
Figura 52: Ventana para realizar los cambios en la duración de las actividades.....	77
Figura 53: Ventana para realizar cambios en el número de órdenes a simular	77
Figura 54: Ventana para realizar cambios en la distribución de los tiempos de inactividad	78
Figura 55: Ventana para guardar los cambios en el modelo.....	79
Figura 56: Botón para ejecutar el modelo de simulación	79
Figura 57: visualización de los archivos generados	80
Figura 58: Visualización de los resultados simulados para el lead time	81
Figura 59: Visualización de los resultados simulados para el tiempo promesa	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Duración específica de las actividades del proceso.....	22
Tabla 2: Tabla comparativa entre los artículos revisados y el presente trabajo	27
Tabla 3: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 1	33
Tabla 4: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 2....	34
Tabla 5: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 3....	35
Tabla 6: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 4....	35
Tabla 7: Colores en el modelo.....	39
Tabla 8: Nodos lugar en el modelo.....	39
Tabla 9: Nodos transición en el modelo	41
Tabla 10: Escenarios de nivel de servicio y extensión del tiempo de entrega en semanas. .	44
Tabla 11: Nivel de servicio simulado para la secuencia 1.....	45
Tabla 12: Nivel de servicio simulado para la secuencia 2.....	46
Tabla 13: Nivel de servicio simulado para la secuencia 3.....	47
Tabla 14: Nivel de servicio simulado para la secuencia 4.....	48
Tabla 15: Nivel de servicio agregado	49
Tabla 16: Valor de la prueba T (Validación del modelo).....	50
Tabla 17: Nivel de servicio agregado (muestra 2).....	54
Tabla 18: Nivel de servicio agregado	55
Tabla 19: Información de los proyectos	64
Tabla 20: Descripción de las entidades del modelo (Manual de JaamSim versión 2020-12)	75

RESUMEN

Hoy en día las empresas se enfrentan a un panorama altamente competitivo y globalizado, donde se vuelve indispensable para las empresas la búsqueda constante de alternativas y herramientas que le permitan mejorar la planificación estratégica, brindar el mejor servicio al cliente e incrementar la generación de valor a través de sus estrategias competitivas y de mejora de sus procesos.

En el presente trabajo terminal de grado, se aborda el análisis y mapeo del proceso de elaboración de muestras prototipo de una empresa de productos automotrices, en la que se presenta la problemática de retrasos recurrentes en la entrega. Con la finalidad de evaluar el proceso, se construye un modelo de simulación de eventos discretos a través del uso de redes de Petri Coloreadas (RPCs), para el desarrollo e implementación de los modelos de simulación se utilizó la herramienta CPN Tools. La aplicación de estas herramientas permite visualizar el proceso desde una perspectiva más amplia e identificar los tiempos de inactividad que inducen alta variabilidad al proceso. A través de la simulación implementada, se estiman los tiempos de ejecución del proceso y el nivel de servicio resultante para cada secuencia de operaciones en lo particular y también a nivel agregado (para todas las secuencias simuladas), dichos resultados permiten evaluar y cuantificar el nivel de servicio actual del proceso en general. Además, se plantea un escenario de mejora mediante la implementación de un indicador de desempeño (KPI) para monitoreo y control en las actividades críticas que inducen alta variabilidad al proceso, lo que permite un incremento de 7 puntos porcentuales en el nivel de servicio y una reducción del 68% en la magnitud de los tiempos de entrega.

INTRODUCCIÓN

La Cadena de Suministro (CS) se constituye por una red de empresas u organizaciones que trabajan de forma cooperativa para satisfacer las necesidades del cliente (Zhang et al., 2020), la gestión de la CS, es una actividad que debe tener como objetivo generar valor al cliente y rendimiento para los miembros de la misma, mediante la gestión eficiente de los flujos de información, materiales y financieros (Chen y Paulraj, 2004).

Hoy en día las empresas se enfrentan a un panorama altamente competitivo y globalizado, donde es necesario incrementar el servicio al cliente y generar una cadena de valor que permita a la CS ser más rentable, eficiente y competitiva. Debido que ya no es suficiente competir únicamente con un buen producto, se vuelve indispensable generar valor para el cliente a lo largo de la CS, por ello la gestión y las decisiones de diseño, planeación y operación, desempeñan una función sumamente importante en el éxito de las empresas (Ivanov et al., 2017).

En este contexto, surge la necesidad por parte de las empresas de buscar y adoptar herramientas para mejorar la planificación estratégica y brindar el mejor servicio al cliente e incrementar la generación de valor a través de sus estrategias competitivas y de mejora de sus procesos. A nivel de planificación y control estratégico de una empresa, los modelos de simulación se constituyen como una herramienta eficaz y eficiente mediante la cual se puede evaluar, medir y cuantificar los procesos que se realizan, así mismo permite proyectar o replantear cambios en el sistema sin incurrir en los riesgos asociados a la experimentación. Es decir, permite a las organizaciones evaluar sus procesos desde una perspectiva sistemática procurando una mejor comprensión de la causa y efecto entre ellos, además de permitir una mejor predicción de ciertas situaciones (Fullana y Urquía, 2009).

El presente trabajo terminal de grado se desarrolla en una empresa del sector automotriz establecida en la ciudad de Toluca, Estado de México, su actividad fundamental es la manufactura y ensamble de autopartes de equipo original y de repuesto, dentro de las actividades principales que realiza la empresa se encuentra la construcción y envío de prototipos automotrices.

El área en la que se realizó el trabajo presenta la problemática de recurrentes retrasos en la entrega de los pedidos de prototipos de componentes automotrices, situación por la que surge la necesidad de analizar los subprocesos y actividades que se llevan a cabo dentro del proceso de elaboración de dichos productos, para identificar las causas de merma en el proceso que impiden la ejecución en tiempo de los pedidos y para diseñar y evaluar potenciales estrategias de mejora.

El presente trabajo terminal de grado se estructura en cuatro capítulos organizados de la siguiente manera:

El capítulo I describe los antecedentes relevantes del caso de estudio y la situación actual en la que se desarrolla el proceso de elaboración de prototipos, destacando las actividades que se ejecutan, departamentos involucrados y la duración de cada una de las actividades realizadas.

El capítulo II comprende la revisión de la literatura, con el propósito de proporcionar un panorama general, se realiza la revisión de información bibliográfica relevante acerca de la aplicación de los modelos de simulación como herramienta para el análisis y modelado de sistemas complejos y sobre todo aplicados en el sector de la producción o manufactura.

El capítulo III describe el proceso referente a la metodología propuesta para la solución del caso de estudio, que se basa en una serie de pasos intrínsecos a cualquier proyecto de simulación, en el que se destaca el análisis y mapeo del proceso, actividades que implican la recopilación de información relevante para la conceptualización de los modelos.

El capítulo IV muestra el análisis e interpretación de los resultados del modelo, así como la verificación y validación de éstos, adicionalmente se presentan los resultados del impacto de la implementación de un indicador de desempeño como monitor de control en las fases identificadas como críticas en el proceso.

Finalmente, en el último apartado se incluyen las conclusiones generales y recomendaciones del trabajo.

Descripción del problema

Actualmente una empresa dedicada a la manufactura de componentes automotrices enfrenta un problema de retrasos recurrentes en las entregas de órdenes de producción, dicha problemática se presenta en el proceso de manufactura de prototipos, en la que se ha detectado demoras significativas en algunas fases del proceso, así como inconsistencias en la secuencia y estructura del proceso, situaciones que actualmente representan la principal fuente de variación y retrasos en la conclusión de cada orden. Las inconsistencias de dicho proceso impactan de manera relevante a la empresa, ya que en el proceso de manufactura de prototipos intervienen diversos departamentos encargados de realizar actividades fundamentales para la conclusión de cada orden, al existir interrupciones o demoras en ciertas fases del proceso, se ven afectadas otras áreas además del área de producción, en donde se han detectado los impactos del problema, principalmente en los tiempos de ejecución de las órdenes y por ende los tiempos de uso de la línea de producción, requerida para la manufactura de otros productos, situación que ha sido identificada por la empresa y dado su impacto requiere una intervención para su análisis y solución.

Tal como se indica previamente, derivado de las inconsistencias en el desempeño del proceso de manufactura de las órdenes de prototipos, se generan diversas consecuencias para la operación eficiente de la empresa, entre otras, se producen problemas para la adecuada planeación y coordinación de los planes de producción. La producción de los prototipos se realiza en la misma instalación en la que se manufacturan los productos de línea, por lo que las inconsistencias en la ejecución del proceso de producción de los prototipos interfieren y limitan la planeación eficiente y además incrementa los tiempos muertos por cambios no planeados o no contemplados en la línea de producción.

Objetivo General

Realizar el análisis y evaluación del proceso bajo estudio, a través de la implementación de un modelo de simulación con el objetivo de identificar los factores críticos que merman el desempeño y capacidad de respuesta del proceso, así como proponer mecanismos de acción que permitan mitigar las fuentes de variabilidad y elevar el nivel de servicio.

Objetivos Particulares

1. Mapear las actividades y áreas que comprenden la ejecución del proceso de interés, así como sus interrelaciones.
2. Identificar los subprocesos y actividades críticas donde existe mayor y menor variabilidad de tiempo en el procesamiento de las órdenes.
3. Implementar un modelo de simulación en el que se permita caracterizar el proceso.
4. Determinar la capacidad de respuesta real del proceso completo.
5. Determinar el impacto que tienen los periodos de inactividad entre actividades en el nivel de servicio del proceso.
6. Definir y revisar indicadores clave de desempeño que puedan ayudar a la empresa a mejorar y controlar el proceso actual o bien un proceso modificado.
7. Evaluar el impacto de las mejoras implementadas en el nivel de servicio del proceso.

Hipótesis

H1: El desarrollo y análisis de modelos de simulación proporcionan una técnica eficaz para la estimación más precisa del lead time para el proceso de elaboración de prototipos de sistemas de gasolina y para la evaluación del nivel de servicio esperado por la empresa bajo la operación actual.

H2: El desarrollo y análisis de modelos de simulación permite la evaluación del efecto de acciones potenciales de mejora en el proceso de elaboración de prototipos de sistemas de gasolina.

Justificación

En la actualidad las industrias, organizaciones y procesos productivos han crecido en complejidad debido a las múltiples interrelaciones que mantienen con los demás miembros de la CS, situación por la que resulta difícil medir y controlar algunos procesos (Arango et al., 2008). La falta de herramientas analíticas que ayuden a la toma de decisiones es uno de los problemas a los que se enfrentan los directivos de las empresas, que ven la necesidad de implementar mejoras en sus procesos, a fin de ser más competitivos y eficientes. Para la identificación y selección de la técnica para el análisis y propuesta de solución al problema objeto de estudio, se revisó la literatura relacionada con el mejoramiento de procesos productivos, dentro de esta literatura la aplicación de técnicas bajo el enfoque “lean” o esbelto abarcan una porción considerable, de igual forma la aplicación de programación matemática, no obstante, de acuerdo a lo expuesto por (Standridge y Marvel, 2006), dichas técnicas presentan distintas limitaciones o deficiencias, sobre todo para reproducir las condiciones relevantes de sistemas industriales, entre las más importantes se pueden mencionar: la variabilidad explícita e implícita en los procesos, la interacción evidente y no evidente entre procesos y componentes. Situaciones que desde el punto de vista conceptual y operativo son totalmente compatibles con el enfoque de análisis de procesos basado en simulación de eventos discretos.

Las herramientas de simulación orientadas a eventos discretos son una plataforma que permite evaluar sistemas complejos. Desde esta perspectiva resulta importante analizar el escenario actual del proceso de elaboración de prototipos en el que existe una alta variabilidad en las actividades que se desarrollan dentro del proceso, factor que influye en el incumplimiento a tiempo de los requerimientos del cliente y afecta el nivel de servicio proporcionado.

Con base en lo anterior, la justificación para el desarrollo del presente trabajo terminal de grado, se sustenta en la necesidad por parte de la empresa de analizar el proceso e identificar las actividades y factores que ocasionan retrasos en la entrega de los nuevos prototipos a los clientes.

El campo de aplicación de la simulación de eventos discretos ofrece ventajas significativas, por lo cual resulta benéfico realizar el análisis del proceso actual de la empresa bajo estudio puesto que;

1. Permite a la empresa visualizar el proceso de forma sistémica e identificar áreas críticas donde se ve mermado el desempeño del proceso.
2. Permite realizar la experimentación de posibles mejoras en el modelo para evaluar su impacto en el proceso sin incurrir en los riesgos asociados.
3. Los modelos de simulación son relativamente fáciles de implementar, validar y analizar.
4. La simulación es un método que permite a las organizaciones predecir, analizar, comparar y optimizar los resultados de un proceso sin incurrir en el costo y los riesgos que conlleva su implementación.
5. Permiten a las empresas estudiar desde una perspectiva sistemática la ejecución de sus procesos e interrelaciones.
6. Los modelos de simulación permiten cuantificar el impacto de cambios o mejoras implementadas antes de su ejecución sin incurrir en los riesgos de la experimentación.

Bosquejo de la metodología

Para atender los objetivos del presente trabajo terminal de grado a continuación se presenta la metodología empleada, donde se consideran las siguientes actividades:

1. Recopilación de la información proporcionada por la empresa:

En esta sección se plantea el esquema general del sector al que pertenece la empresa, su principal actividad económica, se facilita el primer contacto con el departamento donde se pretende realizar el trabajo y se recopila información del proceso.

2. Análisis y mapeo del proceso de elaboración de muestras prototipo:

Se identifican las actividades y áreas a cargo del proceso, así mismo se precisa la duración promedio estándar de cada actividad y se elaboran gráficas de Gantt para cada orden de la muestra disponible de datos.

3. Identificación de actividades críticas:

A partir del mapeo del proceso a través de los diagramas de Gantt es posible identificar las áreas y actividades críticas que aportan mayor variabilidad al proceso, debido a los largos periodos de inactividad entre el termino e inicio de actividades subsecuentes.

4. Revisión de la literatura:

Se realiza la búsqueda de artículos de investigación y bibliografía acerca de modelos de simulación como herramienta para el análisis y modelado de sistemas complejos.

5. Modelado del problema

Se construye un modelo de simulación de eventos de discretos (DES) que permita la caracterización del proceso bajo estudio.

6. Análisis de la situación actual del proceso

A partir de las salidas del modelo se elabora el análisis de la capacidad de respuesta (Nivel de servicio) actual del proceso, mediante la construcción de curvas de distribución acumulada.

7. Verificación y validación del modelo

Se lleva a cabo la revisión del modelo con las personas a cargo del proceso.

8. Implementación de potenciales mejoras

Se analizan los factores o circunstancias que afectan el proceso y se proponen mecanismos de mejora.

9. Comparación de resultados:

Se evalúa el impacto de las mejoras implementadas en la capacidad de respuesta del proceso (Nivel de servicio).

CAPÍTULO I: PROBLEMA CASO DE ESTUDIO

A continuación, se describe la situación actual en la que se desarrollan los procesos y actividades que se ejecutan para la elaboración de las muestras de prototipos automotrices.

1.1. Antecedentes

En la ciudad de Toluca se encuentra una de las plantas dedicada al sector automotriz especializada en la manufactura de componentes automotrices, tales como; bombas de gasolina, marchas, alternadores, motores ABS, entre muchos otros.

Dentro de la empresa bajo estudio se realiza otra actividad fundamental que se refiere al diseño y manufactura de prototipos automotrices, la empresa cuenta con un departamento especializado encargado de la construcción de los prototipos de acuerdo con las especificaciones y parámetros de los clientes (armadoras), los cuales pueden ser clientes internos, es decir, otras plantas de la misma empresa o bien clientes externos, nacionales o internacionales.

El proceso de elaboración de muestras prototipo está constituido por un conjunto de actividades realizadas por diversas áreas y departamentos de la empresa que desempeñan actividades claves para la conclusión de cada proyecto, debido a que se refiere a productos nuevos o bien productos existentes que requieren modificaciones sujetas a ciertas especificaciones y parámetros de los clientes, los procedimientos que se realizan son diferentes a los de la producción en serie, la aceptación de estos prototipos es de gran importancia para la empresa ya que se pueden constituir como componentes para producción masiva posterior.

El proceso de manufactura de prototipos comienza una vez que se genera un pedido por parte del cliente, cada área o departamento involucrado, necesita desarrollar sus actividades para que el proceso continúe de acuerdo a la planeación de la planta.

En la figura 1 que se muestra a continuación, se observan los departamentos que intervienen en el proceso y su actividad correspondiente.



ACTIVIDAD	
1	Requerimiento del cliente
2	Cotización del prototipo
3	Especificaciones técnicas
4	Validación de requerimientos
5	Abastecimiento de materia prima
6	Manufactura de prototipos
7	Validación de las muestras
8	Envío al Cliente

Figura 1: Diagrama de contexto de las áreas involucradas en el proceso de elaboración de muestras prototipo.

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa

1.2. Descripción del proceso objeto de estudio

Actualmente la empresa cuenta con una configuración inicial del proceso en la que se establece la estructura y la duración promedio estándar para cada actividad. El proceso de elaboración de prototipos inicia cuando el cliente (armadoras) envía al proveedor su requerimiento, en donde se señalan las especificaciones y componentes del sistema que

requiere. Posteriormente, el departamento de Ventas recibe la solicitud del cliente en la que se trabaja de manera conjunta con el departamento de Ingeniería y Compras, los cuales son los encargados de realizar las especificaciones técnicas y la cotización de los componentes y del prototipo final, respectivamente. Finalmente, cuando son aceptados los términos tanto de los clientes y la empresa manufacturera, se emite la orden formal de compra, de tal manera que es necesario el ingreso de la misma en el sistema de gestión de datos de la empresa, después de haber sido ingresada la orden de compra, se procede al abastecimiento de materia prima, la programación y las adecuaciones en las líneas de producción para la manufactura y ensamble del producto, una vez que se cuenta con el prototipo, se procede a realizar la inspección y validación del producto para ser enviado al cliente. Lo anterior se ilustra en el siguiente flujograma (figura 2).

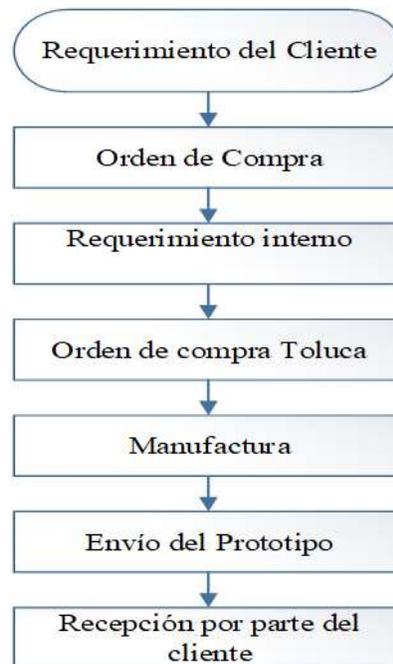


Figura 2: Configuración del flujo del proceso estándar
Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa

1.3. Duración de las actividades

De acuerdo con la información brindada por la empresa y alineada a las inquietudes del responsable del proceso, el escenario que se evalúa mediante la implementación de modelos de simulación corresponde al tiempo máximo de duración para la realización de las actividades individuales que constituyen el proceso, valores que se muestran en la Tabla 1. Sin embargo, la estructura de los modelos implementados es fácilmente configurable para evaluar otros escenarios (incluido hacer uso de distribuciones empíricas o ajustadas para esos valores).

Adicionalmente, cabe resaltar que este trabajo se realiza bajo el supuesto de que no existe un problema significativo (periodos de inactividad o retrasos) con las actividades relacionadas al abastecimiento de materias primas, es por ello, que no se considera como una actividad crítica a ser evaluada en el proceso de elaboración de prototipos.

Tabla 1: Duración específica de las actividades del proceso

Actividades	Duración
A: Requerimiento del cliente	1 día
B: Orden de compra del cliente	7 días
C: Requerimiento interno	1 día
D: Orden de compra interna	7 días
E: Fabricación de muestras	14 días
F: Empaque y etiquetado	3 días
G: Tiempo de tránsito	7 días

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por la empresa

CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA

La revisión de la literatura tiene como finalidad identificar metodologías y modelos que se han desarrollado para resolver problemas similares al caso de estudio, para ello se realiza la investigación partiendo de un enfoque general al particular. La revisión se enfoca en la aplicación de modelos de simulación como herramienta para el análisis y evaluación de procesos y como apoyo a la toma de decisiones.

La aplicación de diversos enfoques de simulación, para abordar decisiones estratégicas y operacionales y de control en sistemas industriales y de manufactura, es cada vez más predominante porque permite incorporar la variabilidad, el comportamiento dinámico y emergente de los sistemas (Kellner et al., 1999), ejemplos de estas decisiones o problemas abordados incluyen entre otros: Selección de maquinaria, Balanceo de líneas de producción, Diseño de planta, Dimensionamiento de inventarios y zonas de almacén en líneas de producción, entre muchos otros, como se detallará a continuación.

2.1. Simulación

A lo largo de los años la simulación se ha empleado en varios sectores tales como: manufactura, salud, defensa, educación, servicios públicos, entre otros. La simulación está reconocida como la segunda técnica más utilizada en la gestión de operaciones. La relevancia de implementar técnicas de simulación es un factor importante a considerar en aplicaciones del mundo real, actualmente existe una creciente necesidad de abordar las complejidades e interrelaciones de las empresas (Jahangirian et al., 2010).

La simulación es un método cuantitativo, que se usa con relativa frecuencia en la analítica de negocios, puesto que permite obtener información estimada para la evaluación y comparación de distintos escenarios de operación, además, es una herramienta eficaz para identificar las causas y cuantificar los efectos en el rendimiento de un proceso en lo individual o incluso a nivel de una cadena de suministro. Existen diversas herramientas computacionales para la implementación de modelos de simulación. Las herramientas van desde el uso de hoja de cálculo hasta plataformas para la simulación de sistemas dinámicos, simulación de eventos

discretos y juegos de negocios. Por otra parte, el tipo de simulación que se debe aplicar depende del tipo de pregunta que debe responder al modelo (Kleijnen, 2003).

Los analistas de negocios, pueden recurrir al uso de simulación para cuantificar los beneficios resultantes de la gestión de la CS que permita apoyar la toma de decisiones en dos niveles: el estratégico y el operativo (Kleijnen, 2003).

2.2. Modelos de simulación en la gestión de la Cadena de Suministro

La CS puede definirse como un proceso integrado constituido por múltiples actores y variados flujos de información, materiales y recursos, cada eslabón cuenta con estrategias y técnicas propias de gestión de materiales, recursos, clientes y proveedores, por lo que el enfoque basado en el modelado y simulación para estudiar la CS debe ser flexible, adaptable y eficiente en el tiempo, lo que permite a los tomadores de decisiones analizar y evaluar diferentes escenarios cambiando únicamente algún parámetro de los valores de entrada (Longo y Mirabelli, 2008).

Dentro de la literatura se reportan varios artículos que han utilizado el enfoque de modelado y simulación para el estudio, análisis y evaluación de la gestión de la CS.

En el trabajo de Persson y Olhager (2002) se analiza un caso real de la industria de telecomunicaciones, en la que se busca analizar y evaluar las relaciones entre la calidad, los plazos de entrega y el costo en sus CS, para ello utilizaron el software de simulación Taylor II para simulaciones de eventos discretos. Por otra parte, en el trabajo de Zhang y Zhang, (2007) se emplea el enfoque de simulación para evaluar el beneficio de intercambiar información de la demanda en un modelo de tres niveles de la CS.

En general una CS, desde el punto de vista sistémico, tiene una fuerte aleatoriedad, por lo que afecta directamente la confiabilidad del sistema, por otro lado, el analizar y mejorar su fiabilidad se ha vuelto cada vez más urgente, y ha recibido cada vez más atención, es por ello, que se tiene que analizar la relación de transición entre los diversos entes de la CS y estudiar el rendimiento del sistema bajo diferentes interferencias (Zhang et al., 2020).

Las compañías de fabricación tienen como objetivo adoptar una planificación integrada de la CS para mejorar su rendimiento operativo, con el propósito de lograr una asignación óptima de recursos de producción, inventario y transporte interdependientes, se deben considerar varios problemas de planificación y control, que plantean retos teóricos y computacionales. En esta dirección, los desafíos de las cadenas de suministro dinámicas pueden abordarse utilizando un enfoque híbrido de simulación - optimización mediante el uso de diversas tecnologías disponibles (Pires et al., 2018).

Actualmente la simulación tiene el reto de aplicarse con Big Data en las CS como un sistema de apoyo a la toma de decisiones. Algunos ejemplos de la exploración de estos paradigmas se pueden encontrar en la literatura académica reciente, como el trabajo de Vieira et al., (2020) en donde mediante diversos experimentos de simulación realizados en *SIMIO*, probaron distintos escenarios incluyendo en el modelo los datos almacenados en distribuciones estadísticas y considerando situaciones de riesgo, después de haber realizado las simulaciones se observó que tardaron un tiempo considerable en ejecutarse, por lo que proponen adoptar otros conceptos y tecnologías que son capaces de almacenar, integrar y procesar la información.

2.3. Simulación en la manufactura

A medida que los requisitos industriales cambian a un ritmo acelerado debido a la rápida evolución tecnológica, la industria manufacturera se enfrenta a los desafíos constantes de fabricar productos innovadores en un tiempo de comercialización reducido (Ong, Yuan y Nee, 2008). La complejidad de dichos sistemas conduce a la dificultad de realizar el análisis mediante métodos matemáticos o para permitir un análisis y evaluación realista de los sistemas, por lo que estos modelos son estudiados a través de las herramientas de simulación (Mourtzis, 2020)

La simulación aplicada a sistemas de manufactura ha demostrado ser una herramienta sumamente valiosa para diseñar y evaluar sistemas complejos, debido al conocimiento significativo que proporciona sobre la comprensión e influencia de cada componente y al bajo riesgo y costo que conlleva (Hosseinpour y Hajihosseini, 2009; Mourtzis, 2020).

Dentro de la revisión de la literatura se encuentran diversos autores que emplean la simulación en los procesos de manufactura, por ejemplo, Atieh y col. (2016) emplearon un enfoque híbrido de simulación y mapeo de flujo de valor en la industria del vidrio para detectar cuellos de botella. Heshmat y col. (2017) implementaron la simulación como herramienta para el análisis, modelado y detección de los cuellos de botella de una línea de producción. Antonelli, Litwin y Stadnicka, (2018) implementaron la simulación dinámica de sistemas y la simulación de eventos discretos para evaluar el rendimiento de un sistema de fabricación. Habibifar y col. (2019) desarrollaron una metodología novedosa basada en la integración de simulación y el análisis envolvente de datos para la optimización del desempeño de una línea de producción de la industria farmacéutica. La tabla 2 proporciona una compilación de la literatura académica relevante, dentro de dicha compilación se incluye el análisis de los elementos relacionados con el presente trabajo terminal de grado.

Tabla 2: Tabla comparativa entre los artículos revisados y el enfoque del presente trabajo

Referencia	Problemática	Objetivo	Alcance	Técnicas o herramientas de simulación utilizadas	Hallazgos	Software empleado
Atieh et al. (2016)	Plazos de fabricación y retrasos constantes en la entrega de los pedidos de los clientes.	Mejora en el proceso de fabricación de vidrio en una pequeña y mediana empresa.	Análisis y evaluación de la situación actual e identificar áreas de mejora.	Mapa de flujo de valor (VSM) y simulación de eventos discretos (DES).	Detección de cuellos de botella.	ARENA
Heshmat y col. (2017)	Líneas de producción poco fiables con amortiguadores finitos.	Evaluar y analizar la situación actual e identificar cuellos de botella para mejorar el proceso.	Análisis y evaluación de la situación actual e identificar áreas de mejora.	Simulación de eventos discretos (DES).	Detección de cuellos de botella.	AnyLogic
Antonelli et al. (2018)	Estudio de caso de una línea de fabricación de películas laminadas impresas.	Evaluar el desempeño general del sistema de fabricación para una familia de productos seleccionados.	Conocer el comportamiento del sistema en estudio y analizar los resultados de los experimentos de simulación llevados a cabo bajo diferentes condiciones.	Simulación de dinámica de sistemas (SDS) y simulación de eventos discretos (DES)	Tiempos de preparación prolongados, variabilidad y un alto nivel de inventario.	Flexsim
Habibifar et al.(2019)	Estudio de caso de una línea de fabricación farmacéutica.	Optimizar el rendimiento y equilibrar la línea de producción.	Optimizar el rendimiento de la línea de producción.	Simulación y el análisis envolvente de datos (DEA)	Detección de cuellos de botella.	Visual Slam
Presente trabajo	Retrasos en la entrega de los pedidos de los clientes.	Identificar los factores críticos que merman el desempeño y capacidad del proceso y proponer mecanismos de mejora.	Análisis y evaluación la situación actual e identificar y proponer mecanismos de mejora.	Simulación de eventos discretos (DES).	Variabilidad en la ejecución de actividades, cuellos de botella.	Cpn Tools/Jaam Sim

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de literatura

2.4. Simulación de Eventos discretos

La Simulación por eventos discretos conocido por sus siglas en inglés *Discret Event Simulation*, DES, es aplicada a sistemas que pueden representarse mediante modelos lógicos matemáticos discretos (Páez et al., 2011), que están asociados a los autómatas, definidos como máquinas virtuales o entidades teóricas que cambian de estado en función de su condición actual y las entradas que recibe (Sayama, 2015), y grafos de eventos (modelos de redes, construidos con vértices y nodos, para representar la evolución de un sistema dinámico), dentro de los cuales se destacan las redes de Petri (Tako y Robinson, 2018). Los modelos de simulación de eventos discretos son la descripción matemática de un sistema que permiten estudiar la ocurrencia de eventos en los procesos (Álvarez, 2009), utilizan números aleatorios generados por algoritmos computacionales avanzados, los cuales dan garantía de aleatoriedad y la creación del componente estocástico del modelo. Un DES puede realizarse cuando se cuenta con información de productos en un sistema de Planificación de Recursos Empresariales (ERP), sistema que permite obtener información para detectar fallas o inconvenientes como cuellos de botella o retrasos que tiene el plan de producción (Palma et al., 2009).

Un evento está definido como el conjunto de las modificaciones sobre las variables de estado del sistema que en un instante pueden ser determinadas (Páez et al., 2011), son los sucesos que puedan ocurrir en la simulación, eventos futuros dependientes de los datos históricos (Álvarez, 02009).

Los elementos que tiene un modelo de DES son entidades, atributos, variables, eventos, tiempo, recursos, y el depósito de datos estadísticos. Como resultado del modelo se puede obtener funciones lineales o distribuciones estadísticas de probabilidad como la lineal, exponencial, gamma, binomial entre otros (Álvarez, 2009). La simulación proporciona conocimiento y mayor comprensión de un sistema de manufactura, influye en la reducción de costos y aceleración de la producción (Tako y Robinson, 2018), y sirve para evaluar métricas de rendimiento (Páez et al., 2011). Con el análisis de los resultados obtenidos de la simulación se pretende obtener un mejor entendimiento del comportamiento del sistema,

elaborar conclusiones sobre su desempeño, así como generar información para la generación de recomendaciones acerca del sistema.

2.5. Redes de Petri Coloreadas

Las redes de Petri Coloreadas (RPCs) son una herramienta de modelado gráfico y matemático para la simulación de eventos discretos, permite describir y estudiar sistemas de procesamiento de información que se caracterizan por ser concurrentes, asincrónicos y estocásticos (Murata, 1989).

Dentro de las principales características que poseen las RPCs es la capacidad de relacionar un conjunto de valores (denominado color) a cada objeto (marca). Lo que permite formalizar el modelo de cualquier sistema por complejo que sea, gracias a que conjuga sus características con las capacidades de un lenguaje de programación de alto nivel al utilizar los colores de forma análoga al uso de tipos de datos en el lenguaje de programación (Jensen y Kristensen, 2009).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y APLICACIÓN

El presente capítulo describe la metodología empleada para dar solución a la problemática descrita en las secciones anteriores, para ello se emplea una serie de pasos que son intrínsecos a todos los proyectos de simulación (Banks, 1998). La metodología se desarrolló en 6 fases, tal y como se muestra en la recopilación de información a través de la figura 3.

En la fase 1 se formuló el problema a tratar y la descripción del sistema a analizar. En la fase 2, se recopila la base de datos, se analizan las áreas y departamentos involucrados, así como las actividades que realizan, el mapeo detallado del proceso completo se realiza a través de la construcción de diagramas de Gantt para cada orden que conforma la muestra de datos, posteriormente, en la fase 3, se realiza la construcción del modelo de simulación y el proceso se modela mediante RPCs. La fase 4 corresponde a la verificación del modelo, que consiste en valorar las diferencias que existen entre el sistema real y el sistema simulado, a partir de los resultados generados. Consecutivamente en la fase 5 con la información obtenida de los modelos de simulación se aporta al análisis y documentación de los resultados. Finalmente, la fase 6 destaca la importancia de la implementación de modelos de simulación como herramienta para evaluar el proceso de fabricación actual de prototipos automotrices, además de brindar una herramienta cuya finalidad es obtener información que permita establecer un tiempo de entrega estándar asociado a un determinado nivel de servicio.

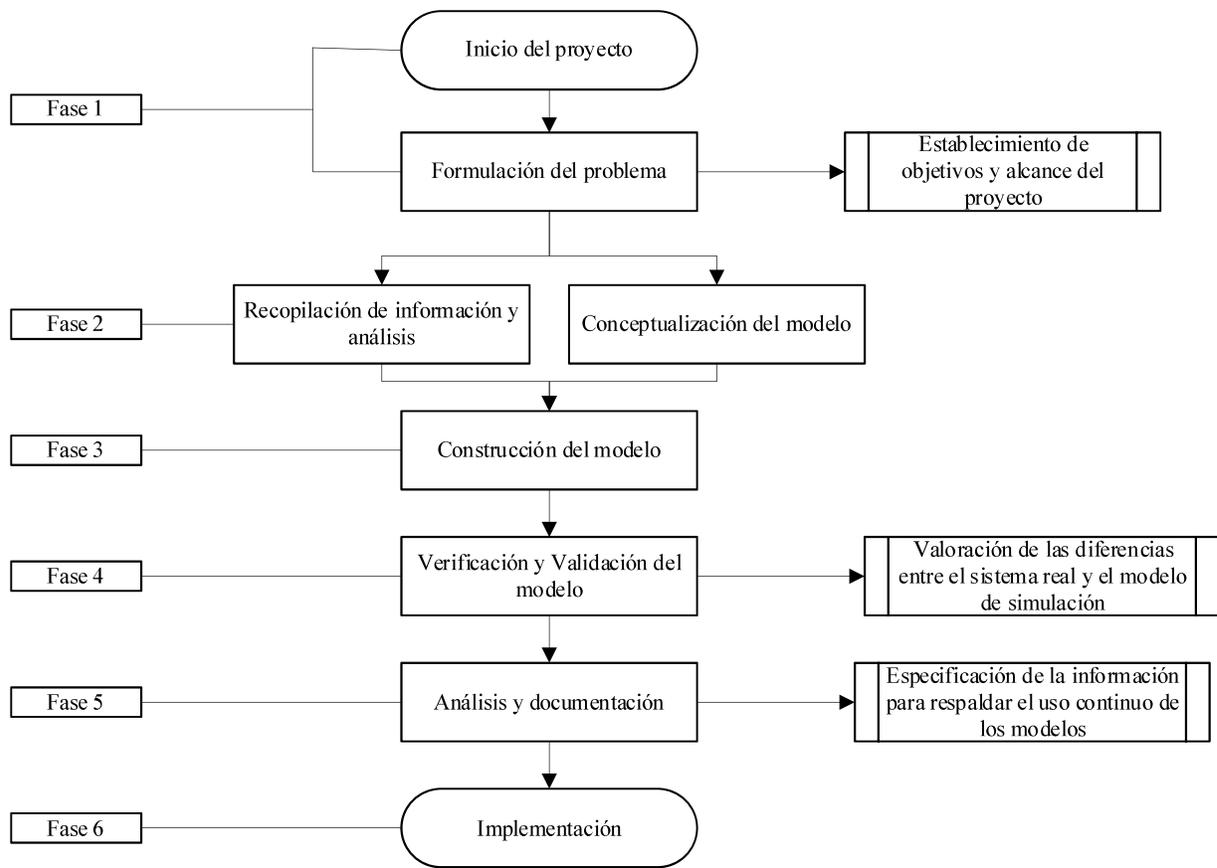


Figura 3: Metodología para un proyecto de simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de Banks (1998)

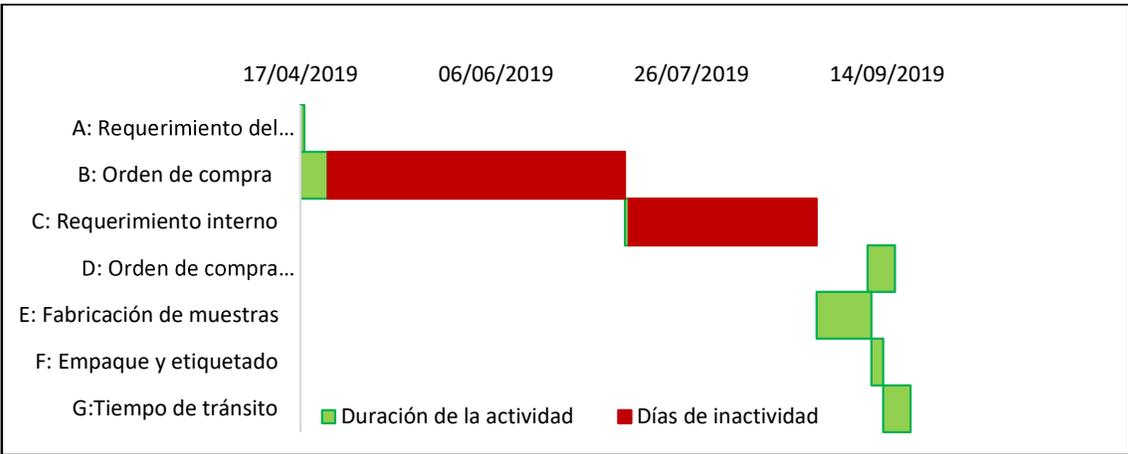
3.1. Análisis y mapeo del proceso

Para el modelado se inició por el mapeo y análisis del proceso, a partir de la muestra recolectada que comprende tres meses de órdenes procesadas, se detectó que las órdenes procesadas no siguen una sola secuencia o sucesión de actividades en un mismo orden de procesamiento, sin embargo, se pueden agrupar en 4 familias o subconjuntos de secuencias, que comparten mayor similitud en la sucesión de actividades, las cuales caracterizan el 80% de la muestra de datos, lo que permite un estudio a nivel agregado de las secuencias identificadas. Con la finalidad de cuantificar los tiempos de inactividad entre el término de una actividad y el inicio de la siguiente, se realizaron diagramas de Gantt para cada orden, con los cuales se identifican y cuantifican los periodos de inactividad más relevantes que se observan entre la ejecución de las tareas, períodos atribuibles fundamentalmente al flujo de

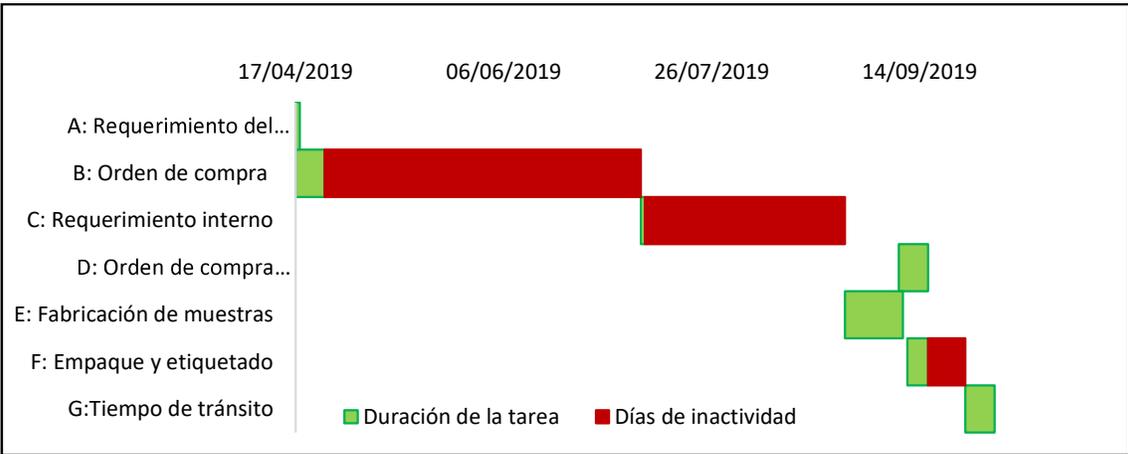
la información y la visibilidad del proceso para los distintos actores, situación que induce una alta variabilidad en la consecución a tiempo de las órdenes, y por ende al identificar estos elementos, es posible señalarlos como puntos críticos o factores limitantes en el proceso para el cumplimiento de las fechas de entrega.

A partir del mapeo detallado de la muestra de datos disponible se agruparon las órdenes que presentaban similitudes en la secuencia de ejecución y se identificaron los periodos de inactividad más críticos en cada familia de secuencias (que se refieren en el documento de aquí en adelante como secuencia 1, 2, 3 y 4), como se muestra a continuación.

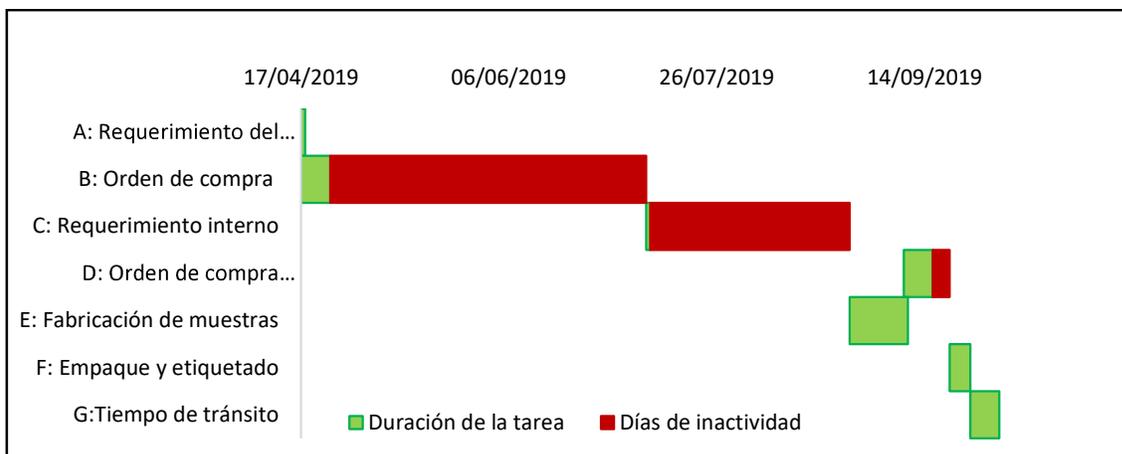
Secuencia 1



*Figura 4: Diagrama de Gantt de una orden procesada de acuerdo la secuencia 1
Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa*



*Figura 5: Diagrama de Gantt de una orden procesada de acuerdo la secuencia 1
Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa*



*Figura 6: Diagrama de Gantt de una orden procesada de acuerdo la secuencia 1
Fuente: Elaboración propia con base en la información proporcionada por la empresa*

A partir de las gráficas de Gantt de todas las órdenes que comprenden la secuencia 1, se obtiene la Tabla 3, con la información referente a los tiempos de inactividad que se registran entre las actividades. Para el presente trabajo se utiliza el término *GAP* para indicar el periodo de inactividad entre el fin de una actividad y el inicio de una subsecuente, por ejemplo, GAP BC, denota un periodo inactivo entre el término de la actividad B (formalización de la orden de compra) y el inicio de C (requerimiento interno) que es una actividad subsecuente para esta secuencia.

Tabla 3: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 1

Tiempos de inactividad entre actividades de la secuencia 1	
GAP AB	(valores entre 0 y 13 días)
GAP BC	(Valores entre 0 y 76 días)
GAP CE	(Valores entre 0 y 162 días)
GAP ED	(Valores entre 0 y 23 días)
GAP DF	(Valores entre 0 y 11 días)
GAP FG	(Valores entre 0 y 9 días)

Fuente: Elaboración propia a partir del mapeo detallado del proceso

Como se observa en la tabla 3, se encuentran los tiempos de inactividad más considerables entre las actividades CE (demora de entre 0 hasta 162 días) y la actividad BC (demora de entre 0 y 76 días), los cuales representan un área de oportunidad para implementar una mejora. Es decir, las estrategias de mejora con mayor impacto en el desempeño del proceso y en el nivel del servicio, serían aquellas que reduzcan la magnitud de estos tiempos de inactividad y/o su variabilidad.

De igual forma, se realiza el mapeo detallado para cada una de las órdenes que comprenden las secuencias 2, 3 y 4, cabe resaltar que como se mencionó anteriormente, se utiliza el término secuencia 1 para referirse al conjunto de órdenes que se agrupan en la familia 1, y así respectivamente para las otras tres secuencias identificadas en la muestra de datos. El análisis detallado de la ejecución de las actividades (gráficas de Gantt) para todas las órdenes agrupadas en las cuatro secuencias se pueden consultar en el Anexo A que corresponde a la información del proceso de elaboración de prototipos.

Las tablas 4, 5 y 6 proporcionan los tiempos de inactividad que se registran entre la conclusión de una actividad y el inicio de la siguiente para las secuencias 2, 3 y 4 respectivamente.

Tabla 4: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 2

Tiempos de inactividad entre actividades de la secuencia 2	
GAP AB	(Valores entre 0 y 70 días)
GAP CD	(Valores entre 1 y 188 días)
GAP DE	(Valores entre 0 y 37 días)
GAP EF	(Valores entre 0 y 11 días)
GAP FG	(Valores entre 0 y 7 días)

Fuente: Elaboración propia a partir del mapeo detallado del proceso

La tabla 4 muestra el rango de variabilidad de los tiempos inactivos dentro de la secuencia 2, donde se observa que los periodos de inactividad más largos se encuentran entre las actividades CD (requerimiento interno y orden de compra interna), con una variabilidad muy

grande que puede ir de 1 día hasta un periodo inactivo de 188 días, así como en la actividad AB (de 0 hasta 70 días).

Tabla 5: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 3

Tiempos de inactividad entre actividades de la secuencia 3	
GAP AC	(Valores entre 0 y 13 días)
GAP CB	(Valores entre 14 y 24 días)
GAP BD	(Valores entre 0 y 51 días)
GAP DE	(Valores entre 0, y 9 días)
GAP EF	(Valores entre 0 y 4 días)
GAP FG	(Valores entre 0 y 2 días)

Fuente: Elaboración propia a partir del mapeo detallado del proceso

Como se ve en la tabla 5, los periodos inactivos más considerables dentro de la secuencia 3 se encuentran entre las actividades BD, con una variabilidad que puede ir de 0 hasta un periodo inactivo de 51 días, así como en la actividad CB con un rango de variación de 14 hasta 24 días.

Tabla 6: Duración de los tiempos de inactividad entre las actividades de la secuencia 4

Tiempos de inactividad entre actividades de la secuencia 4	
GAP AC	(Valores entre 0 y 25 días)
GAP CB	(Valores entre 14 y 109 días)
GAP BE	(Valores entre 3 y 6 días)
GAP FG	(Valores entre 0 y 2 días)

Fuente: Elaboración propia a partir del mapeo detallado del proceso

Finalmente, en la tabla 6 se registra que los periodos inactivos de mayor variabilidad en la secuencia 4 se encuentran entre las actividades CB, y AC con magnitudes de variabilidad de 14 días hasta 109 y de 0 hasta 25 días respectivamente.

3.2. Comparativa de los valores de inactividad entre secuencias

En la figura 7, se muestra de manera agregada la variabilidad observada para los tiempos de inactividad entre cada actividad, estos se modelan mediante una distribución empírica con los valores observados en la muestra de datos históricos identificados para cada secuencia detectada. Para las distribuciones empíricas (ilustradas en la figura 7), debe notarse la presencia de discontinuidades, de tal forma que al no ajustarse de manera adecuada a modelos de distribuciones teóricas (normal, uniforme, gamma, etc.) se asume como evidente que los modelos que utilizan estas distribuciones empíricas logran una mejor semejanza al comportamiento real del sistema, sin embargo, se realizaron pruebas con otras distribuciones como la distribución uniforme y triangular, comprobando que su ajuste no era adecuado, se excluye la presentación de dichos análisis, sin embargo, en la sección de verificación del modelo se proporciona la evidencia que confirma que el enfoque adoptado permite considerar como confiable el modelo en términos de su capacidad de producir las salidas esperadas (lead times simulados vs observados).

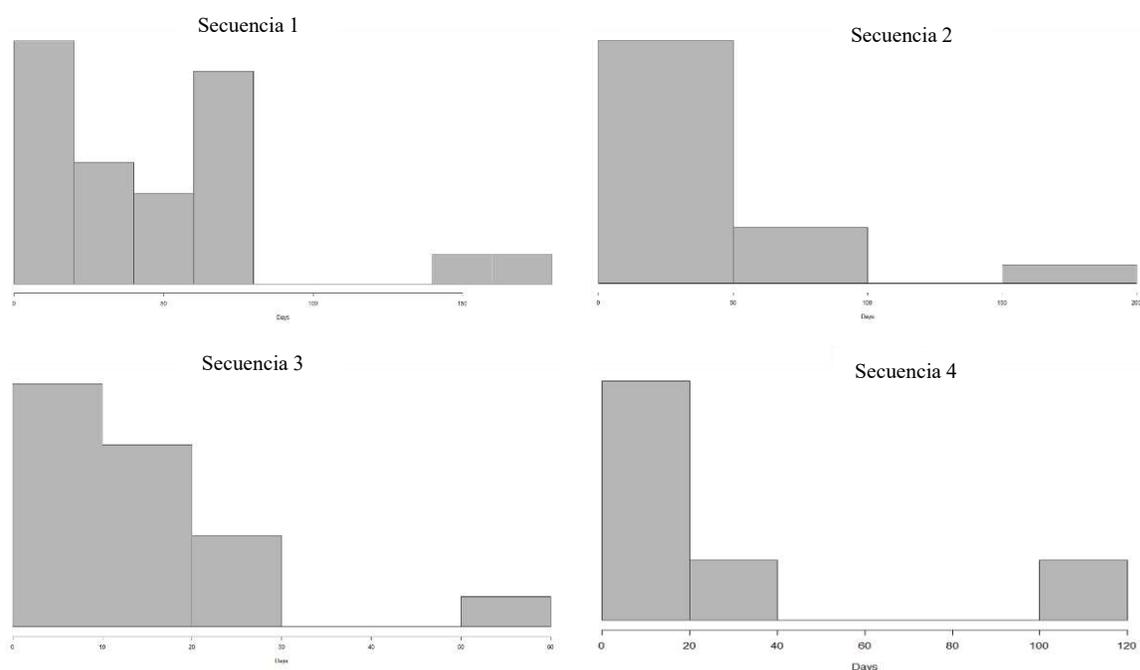


Figura 7: Distribuciones empíricas para los periodos de inactividad identificados en cada secuencia.

Fuente: Elaboración propia a partir del mapeo detallado del proceso

3.3. Modelado del sistema

A partir de la información disponible de la muestra histórica de órdenes de compra, se realiza el análisis para cada secuencia identificada, y se implementa un modelo de simulación, herramienta que tiene el propósito de generar valores simulados del tiempo de proceso (lead time) esperado en conjunción con los tiempos promesa de entrega, valores que permiten caracterizar el desempeño y nivel de servicio actual del proceso de elaboración de muestras prototipo en la empresa del sector automotriz. Cabe resaltar que la estructura de los modelos implementados permite que las personas a cargo del proceso lo puedan utilizar, no obstante, que se realicen cambios en la duración de las tareas y en la distribución de los tiempos de inactividad, lo cual hace que la vigencia de dicho modelo sea de largo plazo, además de flexible y adaptable.

La modelación del proceso se hace mediante el uso de RPCs, que son un formalismo para modelado y simulación de procesos bajo un enfoque basado en eventos discretos. Para la implementación del modelo de simulación se utiliza la herramienta CPN Tools, la cual es un simulador rápido, que puede manejar eficientemente modelos de RPCs.

Para implementar cada modelo, se estructura el flujo del proceso de cada secuencia, para ello se construye un diagrama de red, en el que se establecen nodos lugar (círculos que representan los estados del sistema), transiciones (rectángulos que representan acciones o eventos que causan cambios en el sistema), colores (unidades dentro del sistema) así como sus respectivos arcos que conectan la información que se intercambia entre los nodos.

La información que se emplea para simular la realización de cada tarea incluye: la duración promedio estándar de ejecución en días, así como los tiempos de inactividad observados entre cada tarea (los días se cuentan cómo días calendario). Estos tiempos se modelan mediante una distribución empírica con los valores observados en la muestra de datos históricos, identificados para cada secuencia detectada, se utiliza la distribución empírica debido a que en el proceso de verificación y validación los modelos que emplean esta distribución se asemejan al comportamiento real del sistema, no obstante, que se realizaron pruebas con otras distribuciones como la distribución triangular y uniforme. Para simular la distribución de los tiempos promesa se utiliza la distribución gamma, la cual es una distribución de probabilidad

continúa adecuada para modelar el comportamiento de variables aleatorias con asimetría positiva y en experimentos en donde el tiempo está involucrado (Arroyo et al.,2014), para simular la distribución gamma se utiliza la herramienta de Excel con los valores extremos (mínimos y máximos) observados de los tiempos promesa registrados en la muestra de datos y se calibra con los parámetros α y β . Cabe señalar que las órdenes consideradas para este modelo suponen un incoterm DAP (*Delivery at place*) por lo tanto, la fecha promesa se considera hasta que el producto es entregado en el lugar acordado por el cliente.

En la figura 8, se presenta el modelo de simulación generado para la secuencia 1, donde se identifican principalmente cuatro componentes: nodos lugar, transiciones, colores y arcos. Los modelos construidos para las secuencias 2, 3 y 4 se pueden consultar en el anexo B.

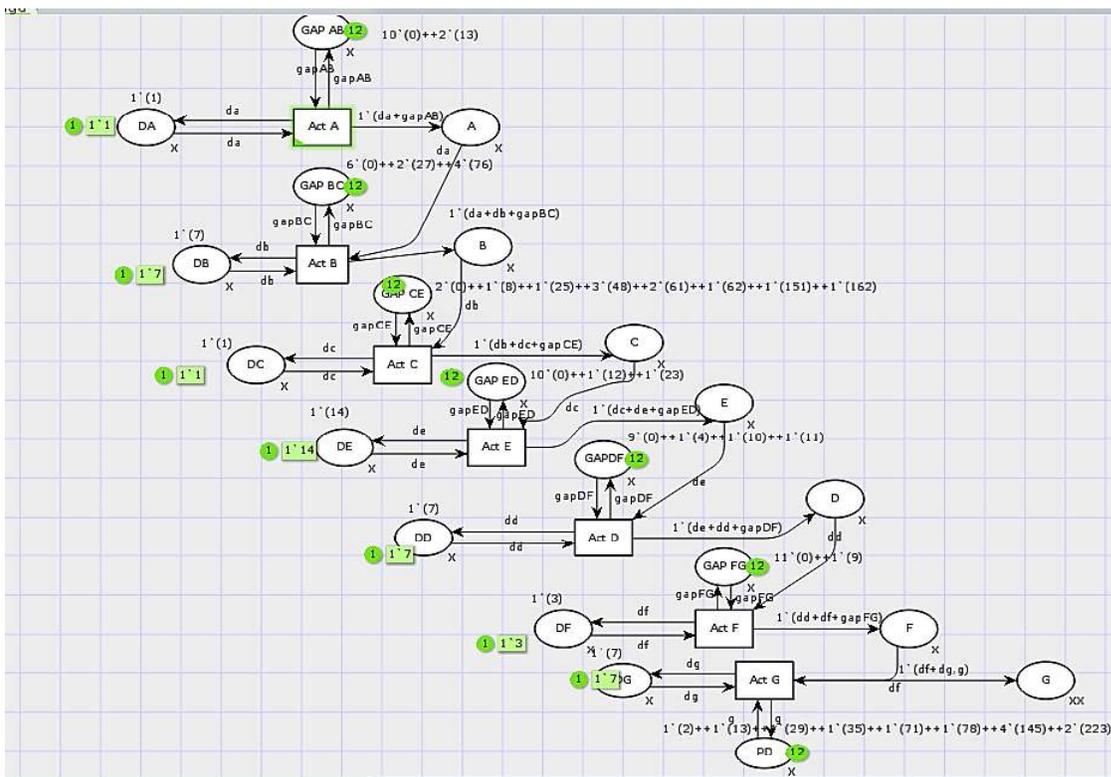


Figura 8: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 1
Fuente: Elaboración propia

En primer lugar es necesario declarar las especificaciones del modelo; las variables de entrada que se almacenan y se utilizan en el sistema, representadas como da , db , dc , dd , de , df , $gapAB$, $gapBC$, $gapCE$, $gapED$, $gapDF$, $gapFG$, todas variables enteras, que representan

la duración promedio estándar de cada actividad y el tiempo de inactividad detectado entre actividades respectivamente, después de la ejecución de cada actividad (nodos transición *Act A*, *Act B*, *Act C*, ...) se simula la ocurrencia de un desfase entre su conclusión y el inicio de la o las actividades posteriores, la duración del proceso acumulado se registra en cada etapa del proceso en los nodos lugar denotados como *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F*, y en el caso del nodo *G*, se cuantifica el tiempo total de flujo de información que transcurre a través de los arcos en dirección a los nodos para concluir todo el proceso, la magnitud de los tiempos inactivos se simula mediante la implementación de los valores obtenidos en los diagramas de Gantt, declarados como nodos lugar en cada transición donde se detectaron periodos de inactividad.

3.4 Descripción detallada del modelo

Los colores, lugares y transiciones del modelo implementado en CPN Tools son resumidos en las siguientes tablas 7, 8 y 9 respectivamente.

Tabla 7: Colores en el modelo.

Colores	Descripción	
	Definición	Explicación
<i>da, db, dd, de, df, dg</i>	Int 1...N	El color representa la duración en días de las actividades, por ejemplo: $l'(l)$, donde la actividad es de un día.
<i>gapAB, gapBC, gapCE, gapED, gapDF, gapFG</i>	Int 1...N	El color representa la duración en días de los periodos de inactividad entre actividades.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Nodos lugar en el modelo

Nodo	Descripción	
	Colores	Operación
<i>DA</i>	$l'(da)$	El token representa la duración promedio (días) de la ejecución del requerimiento por parte del cliente.
<i>DB</i>	$l'(db)$	Este token muestra la duración promedio (días) de la recepción de la orden de compra.
<i>DC</i>	$l'(dc)$	El token establece la duración promedio (días) de la Validación de la orden en el sistema de gestión de datos.
<i>DD</i>	$l'(dd)$	El token traza la duración promedio (días) entre la revisión del stock y el inicio de la manufactura.

<i>DE</i>	$l'(de)$	En este token se define la duración promedio (días) de la manufactura de los prototipos.
<i>DF</i>	$l'(df)$	Este token define la duración promedio (días) en el que se envía la fecha estimada de entrega al cliente.
<i>DG</i>	$l'(dg)$	El token define la duración promedio (días) a la recepción de entrega al cliente.
<i>A</i>	$l'(da+gapAB)$	Este token cuantifica la duración de la actividad A y la variación en el inicio y término de la cotización para la orden de compra.
<i>B</i>	$l'(da+db+gapBC)$	El token cuantifica la duración acumulada de la actividad predecesora (A) + la actividad B + el tiempo de inactividad entre el término e inicio de la actividad consecutiva (C).
<i>C</i>	$l'(db+dc+gapCE)$	El token mide la duración acumulada de la actividad predecesora (B) + la actividad C + el tiempo de inactividad que existe entre el término de C e inicio de E.
<i>D</i>	$l'(de+dd+gapDF)$	El token cuantifica la duración acumulada de la actividad predecesora (E) + la actividad D + el tiempo de inactividad que existe entre el término de D e inicio de F.
<i>E</i>	$l'(dc+de+gapED)$	El token cuantifica la duración acumulada de la actividad predecesora (C) + la actividad E + el tiempo de inactividad que hay entre el término de E y el inicio de D.
<i>F</i>	$l'(dd+df+gapFG)$	El token cuantifica la duración acumulada de la actividad predecesora (D) + la actividad F + el tiempo de inactividad que hay entre el término F y el inicio de G.
<i>G</i>	$l'(df+dg)$	El token cuantifica la duración acumulada de la actividad predecesora (F) + la actividad G.
<i>GAPAB</i>	$gapAB$	El token cuantifica la duración del tiempo de inactividad entre la actividad A y B.
<i>GAPBC</i>	$gapBC$	El token cuantifica la duración del tiempo de inactividad entre la actividad B y C.
<i>GAPCE</i>	$gapCE$	El token cuantifica la duración del tiempo de inactividad entre la actividad C y E.
<i>GAPED</i>	$gapED$	El token cuantifica la duración del tiempo de inactividad entre la actividad E y D.
<i>GAPDF</i>	$gapDF$	El token cuantifica la duración del tiempo de inactividad entre la actividad D y F.
<i>GAPFG</i>	$gapFG$	El token cuantifica la duración del tiempo de inactividad entre la actividad F y G.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Nodos transición en el modelo

Transición	Explicación
Act A	Simula la realización de la actividad A (Requerimiento del cliente).
Act B	Simula la realización de la actividad B (Orden de compra).
Act C	Simula la realización de la actividad C (Aviso Interno).
Act D	Simula la realización de la actividad D (Fecha de Inicio Planta Toluca).
Act E	Simula la realización de la actividad E (Manufactura).
Act F	Simula la realización de la actividad F (Validación y envío).
Act G	Simula la realización de la actividad G (Finalización del proceso, y registro de la duración acumulada de las actividades predecesoras).

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las salidas de los modelos de simulación para las cuatro secuencias identificadas en la muestra de datos. Posteriormente, se presentan los resultados agregados del nivel de servicio actual del proceso y finalmente se realiza un análisis de la mejora implementada en el proceso para evaluar el impacto de dicha aplicación.

4.1. Resultados de los modelos

A partir de los valores obtenidos en el análisis y mapeo del proceso, se simula la duración de la ejecución del proceso completo (*lead time*) para cada secuencia identificada, finalmente una vez que se tiene el lead time del proceso se procede a simular la distribución de los tiempos promesa, para ello se utilizan los valores mínimo y máximo comprometidos para la entrega observados en la información histórica.

4.1.1. Curvas de distribución

En la figura 9 se observa la curva de distribución acumulada para el tiempo de ejecución simulado en semanas de las secuencias identificadas en la muestra.

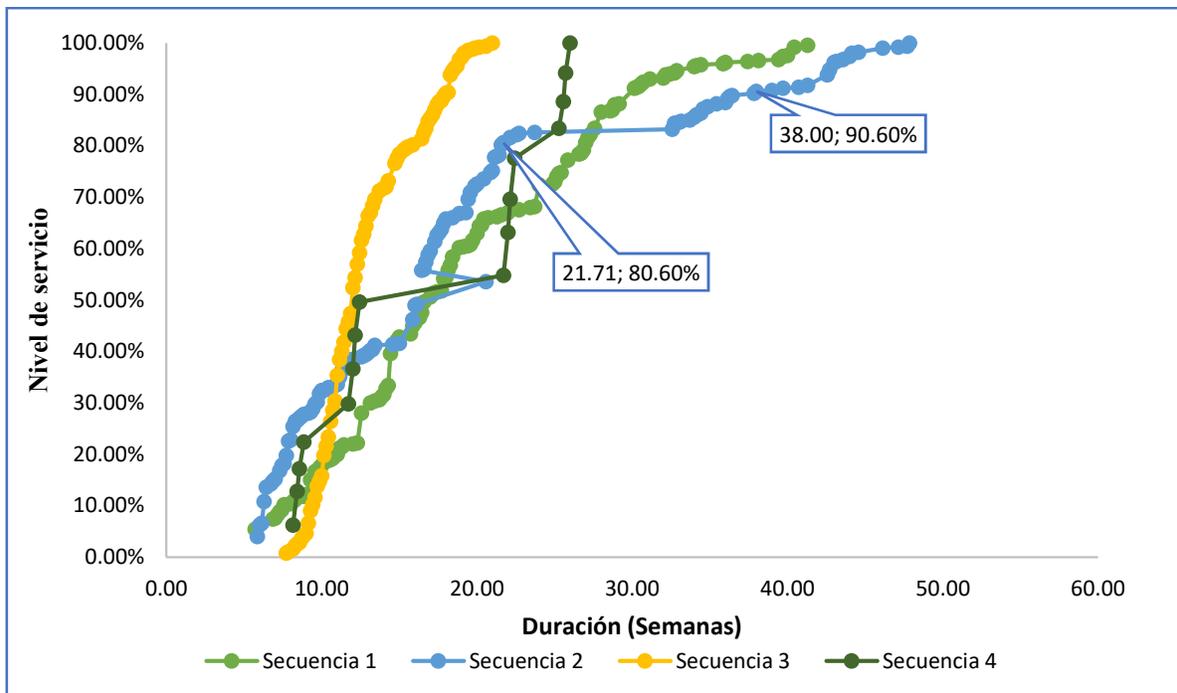


Figura 9: Curva de distribución acumulada de la duración del proceso para cada una de las 500 órdenes simuladas bajo las 4 secuencias más frecuentes.
Fuente: Elaboración propia

La Figura 9, representa las curvas de distribución simuladas para cada una de las cuatro secuencias identificadas en la muestra de datos históricos, donde se puede observar que el desempeño requerido como nivel de servicio (eje vertical) determina el tiempo de procesamiento solicitado para completar los pedidos (eje horizontal) y cumplir con el nivel de servicio requerido por la empresa.

De la comparación del desempeño entre las cuatro curvas de distribución, se observa que el desempeño, en cuanto a la extensión de los tiempos de ejecución es diferente para las cuatro secuencias identificadas, por ejemplo, la secuencia 2 (curva de distribución en color azul) presenta los mayores tiempos de ejecución para un nivel de servicio del 90%, así mismo se puede observar que para dicha secuencia incrementar un 10% en el nivel de servicio y pasar del 80% al 90% la extensión de los tiempos de ejecución para completar la orden se ven afectados por incremento en el tiempo de espera de 16.3 semanas, por otro lado se observa que la secuencia 3 (curva de distribución en color amarillo) presenta los tiempos de ejecución más cortos en comparación con las otras secuencias, puesto que todas las órdenes simuladas bajo dicha secuencia se completan en un tiempo máximo de 21 semanas (nivel de servicio

del 100%), caso contrario para las restantes secuencias que en la misma extensión del tiempo alcanzan niveles de servicio en el mejor de los casos de 75%.

De manera equivalente, se observa que las órdenes simuladas bajo la secuencia 4, se completan en un tiempo máximo de 26 semanas (nivel de servicio de 100%), caso contrario para las dos secuencias restantes, que en la misma de extensión de tiempo alcanzan niveles de servicio de 79% en el mejor escenario.

La tabla 10, proporciona un análisis de la extensión de tiempo que se requiere si se desea incrementar el nivel de servicio del 80 al 90% para cada una de las secuencias.

Tabla 10: Escenarios de nivel de servicio y extensión del tiempo de entrega en semanas.

Secuencias	Nivel de servicio		
	Tiempo de proceso simulado (Semanas)		
	80%	90%	Incremento 10%
1	26.64	28.79	2.15
2	21.7	38	16.3
3	15.72	17.93	2.21
4	23.86	25.64	1.78

Fuente: Elaboración propia

De los resultados anteriores, claramente se observa que la secuencia 2, presenta un incremento considerable respecto al tiempo de ejecución del proceso si se desea incrementar el nivel de servicio del 80 al 90%, por lo cual, se tendría que evaluar la conveniencia de ofrecer un nivel de servicio por encima del 83% o bien implementar una serie de medidas para reducir dicha variabilidad.

4.1.2. Simulación de los tiempos promesa

Para modelar el comportamiento de los tiempos promesa, se emplea la distribución gamma con los valores extremos registrados en la muestra de datos.

Para determinar el nivel de servicio actual, para cada una de las secuencias identificadas, se comparan los valores obtenidos de la duración de ejecución del proceso (lead time) (figura 9) de cada secuencia con los valores simulados para la distribución de los tiempos promesa (ver figuras 10,11,12 y 13), es decir, si el lead time es menor o igual al valor simulado para

el tiempo promesa, la orden fue entregada en tiempo, caso contrario, si el valor del lead time es superior al valor de la distribución del tiempo promesa la orden fue entregada con un desfase.

A continuación, se presentan los histogramas contruidos con los valores simulados para la distribución del tiempo promesa de cada secuencia y el nivel de servicio de éstas.

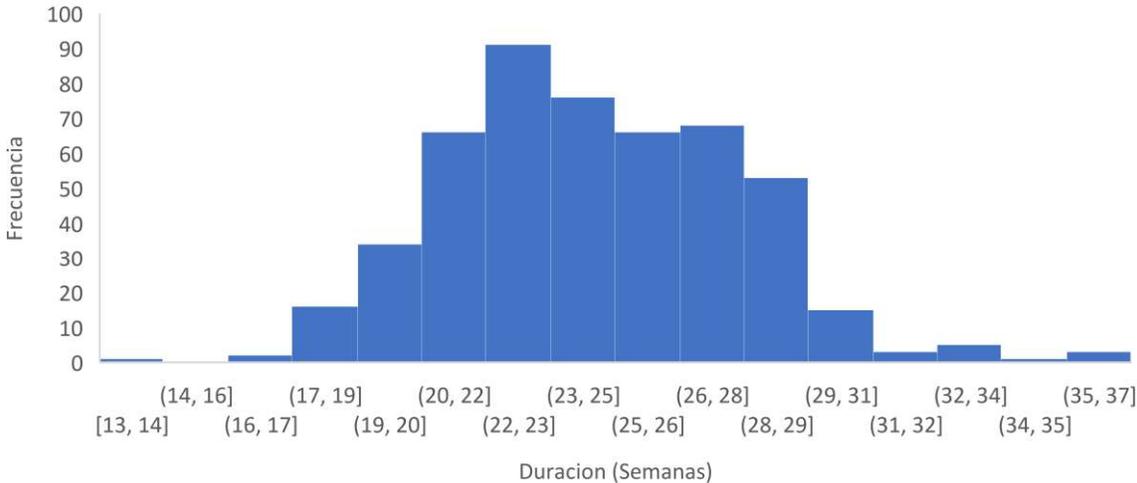


Figura 10: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 75% para la secuencia 1
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 10, el rango de los tiempos promesa para las órdenes procesadas bajo la secuencia 1 oscila entre 13 semanas y 37 semanas, sin embargo, el tiempo de ejecución del proceso (figura 9) muestra que el tiempo de proceso puede llegar a extenderse hasta 41 semanas (nivel de servicio del 100%).

La siguiente tabla muestra el nivel de servicio obtenido para la secuencia 1

Tabla 11: Nivel de servicio simulado para la secuencia 1

Órdenes simuladas	Órdenes dentro del tiempo comprometido	Nivel de servicio
500	376	75.20%

Fuente: Elaboración propia

La figura 11 representa la distribución de los tiempos promesa para la secuencia 2, donde es posible observar que el tiempo promesa comprometido con mayor frecuencia se encuentra entre 21 y 22 semanas, el rango de dispersión oscila entre 12 y 36 semanas, no obstante, se observa que el tiempo de ejecución para esta secuencia puede prolongarse hasta 47 semanas (figura 9). El nivel de servicio registrado para esta secuencia es de 75%.

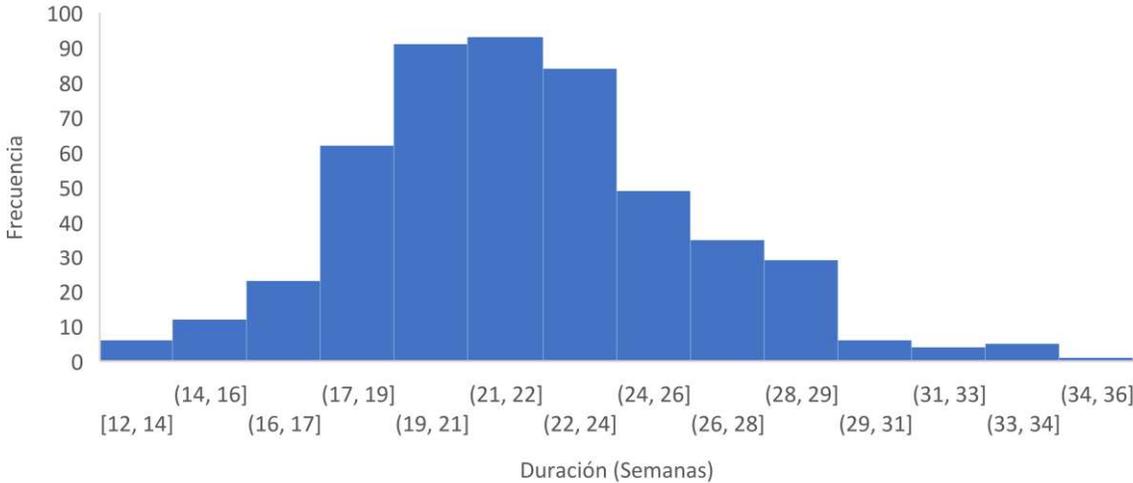


Figura 11: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 75% para la secuencia 2
Fuente: Elaboración propia

Tabla 12: Nivel de servicio simulado para la secuencia 2

Órdenes simuladas	Órdenes dentro del tiempo comprometido	Nivel de servicio
500	375	75.00%

Fuente: Elaboración propia

Los valores obtenidos para la distribución de los tiempos promesa, de la secuencia 3, se presentan en la figura 12, en donde es posible visualizar que los tiempos comprometidos para esta secuencia oscilan entre 7 y 33 semanas, siendo estos los tiempos promesa más cortos respecto a las demás secuencias analizadas. El nivel de servicio que reporta la secuencia 3 se presenta en la tabla 13.

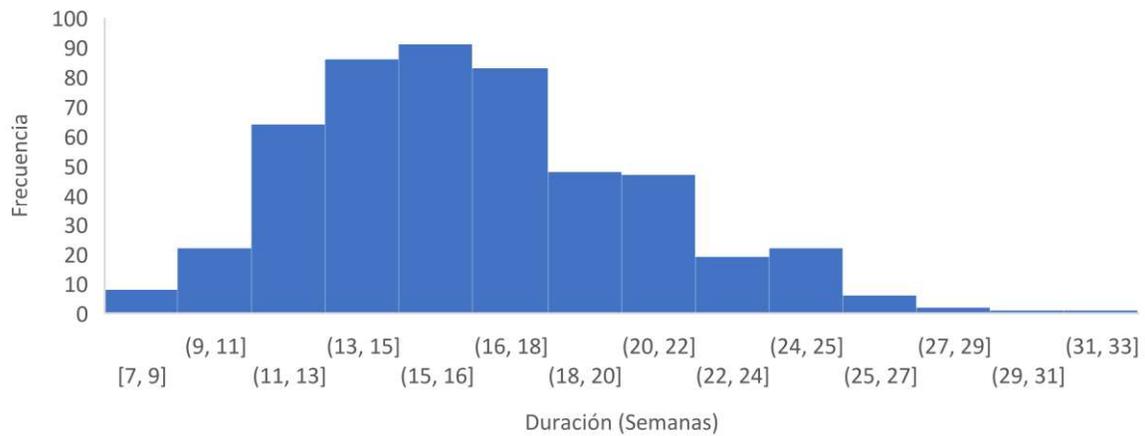


Figura 12: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 76 % para la secuencia 3
Fuente: Elaboración propia

Tabla 13: Nivel de servicio simulado para la secuencia 3

Órdenes simuladas	Órdenes dentro del tiempo comprometido	Nivel de servicio
500	383	76.6%

Fuente: Elaboración propia

Al realizar la comparación del lead time y el tiempo promesa simulados para la secuencia 4 (figura 9 y 13), se obtiene que el nivel de servicio para dicha secuencia se registra en 73.8%, por otro lado, se observa que de las 500 órdenes simuladas para esta secuencia 131 están registradas con demoras en la entrega de los prototipos, lo cual representa el 26.2%.

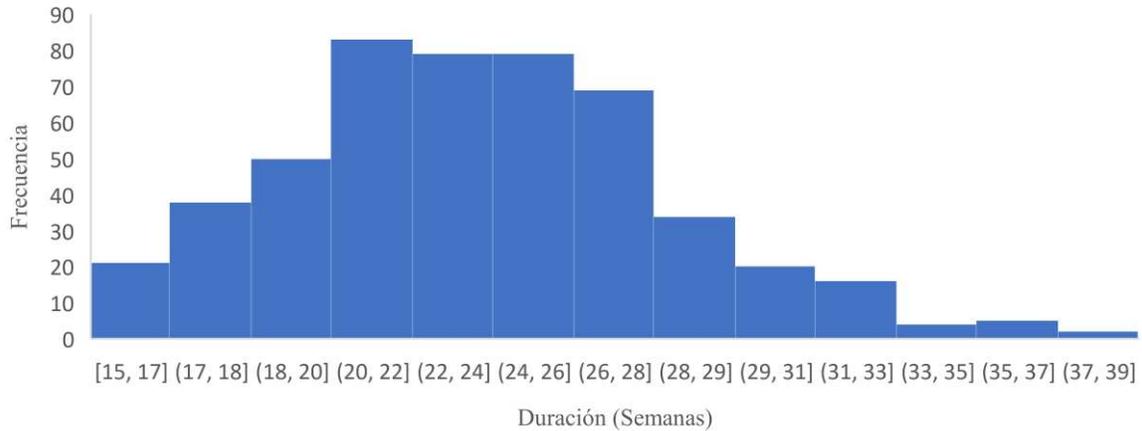


Figura 13: Distribución Gamma simulada para un nivel de servicio del 73% para la secuencia 4
Fuente: Elaboración propia

Tabla 14: Nivel de servicio simulado para la secuencia 4

Órdenes simuladas	Órdenes dentro del tiempo comprometido	Nivel de servicio
500	369	73.8%

Fuente: Elaboración propia

A través del uso de la herramienta CPN Tools, se obtuvieron los resultados de la simulación de 500 órdenes siguiendo cada una de las cuatro secuencias más frecuentes encontradas en la muestra, el conjunto de valores obtenidos al realizar la simulación permite construir una curva de distribución agregada considerando de manera integral las órdenes procesadas mediante las cuatro diferentes secuencias (Figura 14), en la que es posible visualizar y cuantificar el tiempo de ejecución (lead time) de las órdenes, así mismo se integran los valores registrados de la simulación a la distribución de los tiempos promesa, con base en la cuál es posible cuantificar el nivel de servicio actual del proceso, es decir, el porcentaje de órdenes con tiempo de ejecución menor o igual al umbral de tiempo simulado como fecha promesa.

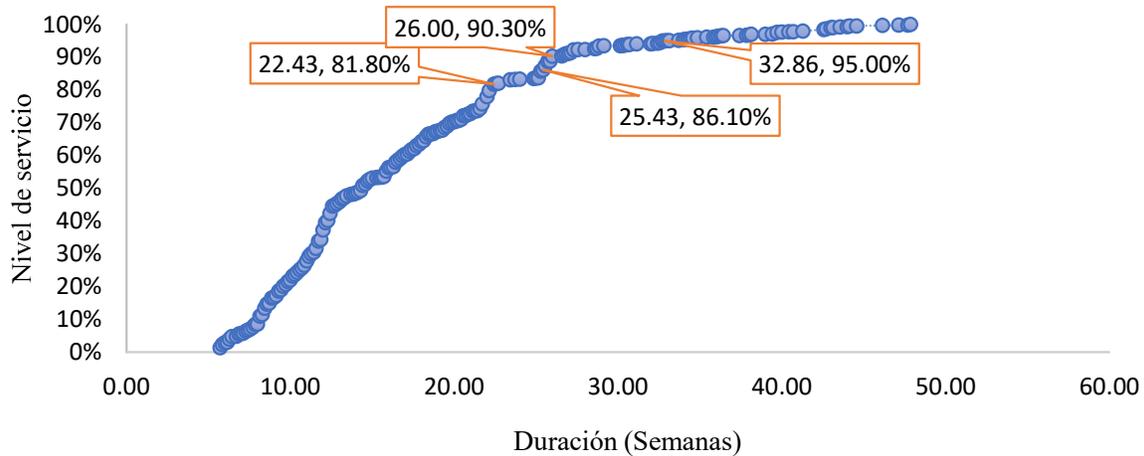


Figura 14: Curva de distribución acumulada del Lead time para las 2000 órdenes simuladas
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los valores registrados en cada modelo, el nivel de servicio agregado del proceso de elaboración de prototipos automotrices es de 75.2%, este resultado se obtiene de la suma de todas las órdenes simuladas que se entregaron dentro de la distribución del tiempo promesa simulado entre el número total de órdenes (Tabla 15).

Tabla 15: Nivel de servicio agregado

Secuencia	Órdenes simuladas	Órdenes dentro del tiempo comprometido	Nivel de servicio
1	500	376	75.20%
2	500	375	75.00%
3	500	383	76.60%
4	500	369	73.80%
Total	2000	1503	75.2%

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos del modelo, es posible determinar el nivel de servicio del proceso, en el que solo el 75.20% de las órdenes cumplen con el tiempo que compromete la empresa, por otro lado, el 24.80% de las órdenes que se procesan, se observan con desfases en el tiempo de conclusión, situación que puede atribuirse a los tiempos de inactividad entre actividades detectadas y que se constituyen como áreas críticas que merman la capacidad de respuesta del proceso.

4.2. Verificación y Validación del modelo

En esta sección se evalúan las diferencias entre el funcionamiento del modelo de simulación y el sistema real que se está estudiando, por consiguiente, para realizar dicha evaluación del modelo de simulación se empleó la validación operativa, que consiste en determinar si el comportamiento de las salidas del modelo de simulación tiene la precisión requerida para el propósito previsto del modelo (Sargent, 2013). Para el caso de estudio, se utilizó una prueba de hipótesis considerando la muestra de datos históricos disponibles. La variable de salida utilizada para la validación es el lead time (figura 14). Se realizó una prueba t de dos colas para determinar si las medias difieren significativamente (lead time del sistema real vs lead time simulado), se utilizó un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$) para probar la validez del modelo. En este caso, se define la hipótesis nula H_0 , como que el modelo es válido para el rango aceptable de precisión bajo el conjunto de condiciones experimentables, mientras que H_1 no acepta la validez del modelo. En la tabla 16, se proporciona el resultado de la prueba t, donde se puede ver que no se encuentran diferencias significativas entre los valores estimados por el modelo y los valores observados ($p > 0.05$), por lo que la validez del modelo de simulación (H_0) no es rechazada.

Tabla 16: Valor de la prueba T (Validación del modelo)

Sistema	Media	Desviación estándar	Valor- p
Sistema real	15.29	8.15	0.392
Modelo de simulación	16.57	8.25	

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, se presentaron los resultados obtenidos mediante simulación del proceso a las personas a cargo del proceso real, quienes mediante la comparación de los indicadores de desempeño del modelo y los indicadores de desempeño del sistema real (nivel de servicio) determinaron que el modelo reflejaba de manera adecuada el comportamiento del sistema. Con base en la valoración de las salidas del modelo y el desempeño esperado, se llevó a cabo la calibración de los modelos implementando ajustes en la generación de los lead times y posteriormente con el desarrollo de la distribuciones simuladas para el establecimiento de los tiempos promesa, para dicha actividad se emplearon tanto los valores

extremos observados en la información histórica como el desempeño agregado (nivel de servicio) que la empresa ha determinado con la medición de indicadores internos del proceso. De acuerdo con los resultados obtenidos de la validación operativa y la revisión de éstos por parte de la empresa, se considera que los modelos y parámetros implementados reproducen de manera adecuada el comportamiento agregado del proceso en estudio.

Cabe mencionar que dada la naturaleza del proceso y la manera en que se modeló, no se requiere asumir la existencia de una fase transitoria de arranque de producción, situación que sería requerida para un modelado a nivel micro de la operación de la línea de producción, bajo la anterior consideración, la simulación no requiere la realización de corridas de “warm-up”.

4.3. Implementación de la mejora en el proceso

La mejora continua es una herramienta que permite la ejecución constante de acciones que fomenta un crecimiento y optimización de factores importantes que mejoran el rendimiento de la empresa de manera significativa, dichas acciones provienen del análisis de los procesos, cómo se desarrollan, el impacto que tienen y dónde se producen desviaciones. Una vez que se determina las variables o factores de mayor relevancia o impacto al proceso se establece una serie de medidas que permita mejorarlo.

Derivado de la problemática de los retrasos recurrentes en las entregas de órdenes de producción de los pedidos de prototipos y el análisis previo de la situación actual del proceso de elaboración de prototipos, la empresa en cuestión decidió implementar una serie de estrategias y medidas que le permitan reducir el porcentaje de órdenes que presentan retrasos en la fecha promesa de entrega y reducir la magnitud de la variabilidad en el inicio y término de actividades consecutivas dentro del proceso, para ello se implementó un KPI que permita el monitoreo y control de la ejecución de las áreas y el personal a cargo de las etapas identificadas con los mayores tiempos de inactividad que merman la capacidad de respuesta del proceso.

El KPI implementado mide el tiempo que transcurre entre las actividades desde que se presenta el requerimiento del cliente (actividad A) hasta que se presenta la orden formal de

compra en planta Toluca (actividad D), puesto que después de realizar el mapeo del proceso se detectaron como las áreas críticas que presentan mayor variabilidad en los tiempos de inactividad, la empresa considera que estas actividades se deben desarrollar en un periodo máximo de 2 semanas (14 días), por ello cualquier orden que exceda ese tiempo presenta una desviación o demora en el proceso de elaboración de prototipos.

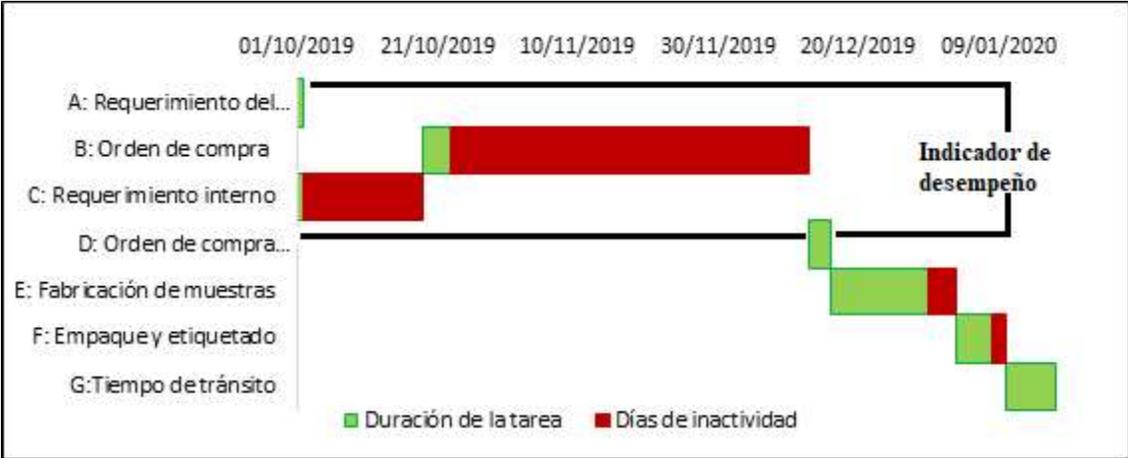


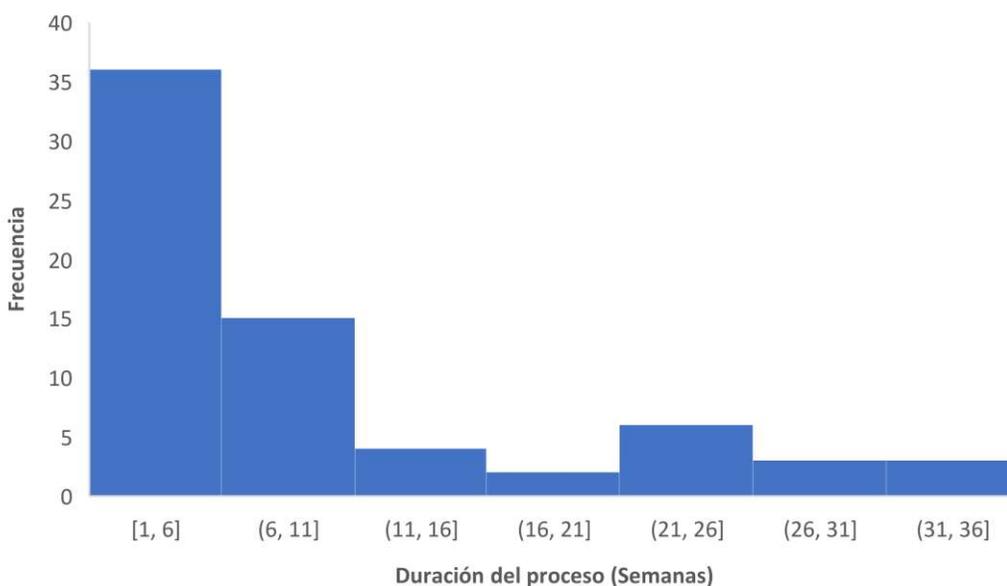
Figura 15: Diagrama de Gantt del proceso de una orden procesada de acuerdo a la secuencia 3
Fuente: Elaboración propia

La figura 15 muestra las actividades que abarca la implementación del KPI, tal como se ve en el diagrama, el indicador permite monitorear y controlar el proceso en las actividades que generaban mayor problema (tiempos de inactividad más largos), luego siguiendo el mismo enfoque se observa que aún existe potencial de mejora en el proceso, ya que existen tiempos de inactividad que no se encuentran dentro del alcance del indicador y aunque la magnitud de estos no es tan significativa como el de las áreas críticas, aun representan potenciales causas de retraso o merma en la capacidad de repuesta del proceso.

4.4. Resultados de la implementación del Indicador de desempeño

Para realizar el análisis de la mejora implementada en el proceso de elaboración de prototipos se recolectó una segunda muestra que comprende 8 meses de órdenes procesadas de la empresa (periodo percibido de febrero a octubre del 2020), así mismo se realiza la comparación del tiempo de ciclo de ambas muestras y los tiempos de inactividad entre las actividades.

A continuación, se muestra el histograma que representan el tiempo de ciclo del proceso completo, la duración del proceso (lead time) se estima desde que se presenta el requerimiento del cliente (actividad A) hasta la fecha de recepción del prototipo por parte del mismo (actividad G).



*Figura 16: Histograma del lead time del proceso de elaboración de prototipos (muestra 2)
Fuente: Elaboración propia*

La figura 16, muestra el histograma del tiempo de ejecución (lead time) para la muestra 2 en la que se implementó el KPI, donde se observa que el tiempo de ciclo más frecuente para la ejecución del proceso completo se encuentra entre 1 semana y 6 semanas, el rango de dispersión del tiempo de proceso oscila entre 1 y 36 semanas, de igual forma se ve que los datos presentan asimetría hacia la derecha, lo cual indica que el tiempo de ciclo del proceso es relativamente más corto que la muestra 1, así también el nivel de servicio obtenido para

esta muestra se registra en 83.61%, es decir, 7.41% más respecto a los valores simulados de la muestra 1 (figura 18).

Tabla 17: Nivel de servicio agregado (muestra 2)

<i>Órdenes en tiempo</i>	<i>Órdenes con retraso</i>	<i>Total de órdenes observadas</i>	<i>% de nivel de servicio</i>
57	12	69	82.61%

Fuente: Elaboración propia

La figura 17 representa el histograma de la magnitud de los tiempos de retraso en la conclusión de las órdenes de la muestra 2, donde se observa que los tiempos de retraso más frecuentes se encuentran entre 1 y 9 días (de 1 a 2 semanas), el rango de dispersión de las demoras en la entrega de los prototipos oscila de 1 día hasta 65 días.

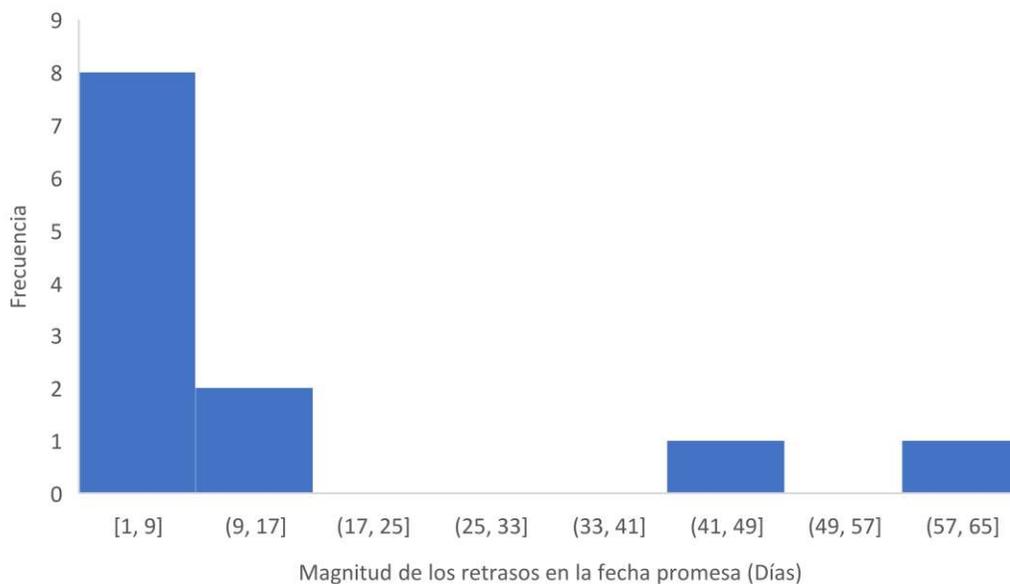
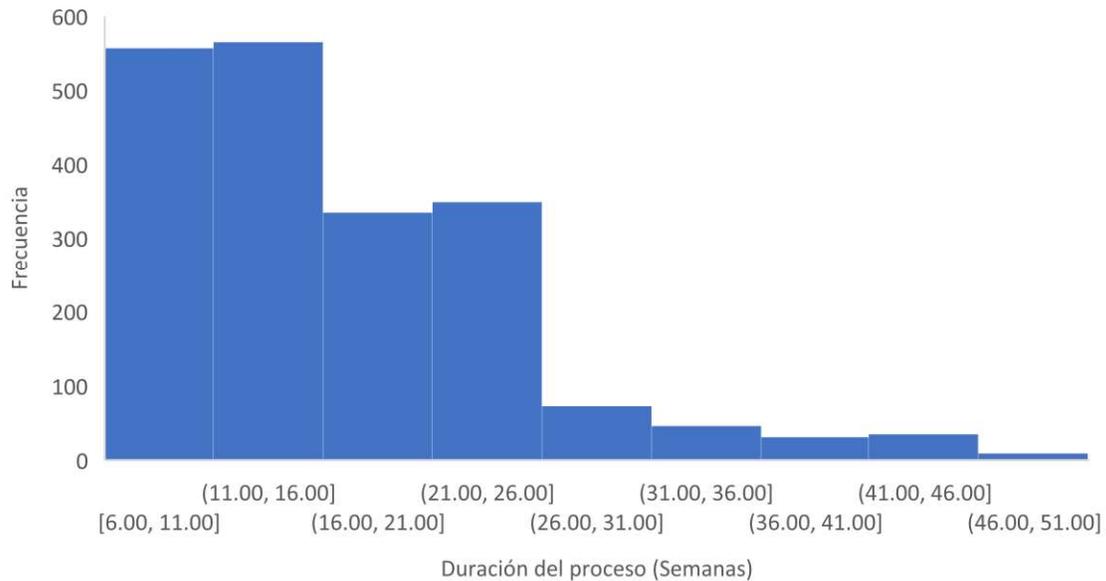


Figura 17: Histograma de la magnitud de los retrasos en la fecha promesa de entrega (muestra 2)
Fuente: Elaboración propia

A continuación (figura 18), se muestra el histograma agregado del lead time del proceso de elaboración de prototipos para las 2000 órdenes simuladas de la muestra 1.



*Figura 18: Histograma del tiempo de proceso (lead time) para las 2000 órdenes simuladas
Fuente: Elaboración propia*

La figura 18 muestra que el tiempo de ciclo de mayor frecuencia para la muestra 1 oscila entre las 11 semanas y 16 semanas, así mismo se ve que el rango de dispersión del lead time fluctúa desde 6 hasta 51 semanas. El nivel de servicio registrado para las 2000 órdenes simuladas se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 18: Nivel de servicio agregado

<i>Órdenes en tiempo</i>	<i>Órdenes con retraso</i>	<i>Total, de órdenes observadas</i>	<i>% de nivel de servicio</i>
1503	497	2000	75.20%

Fuente: Elaboración propia

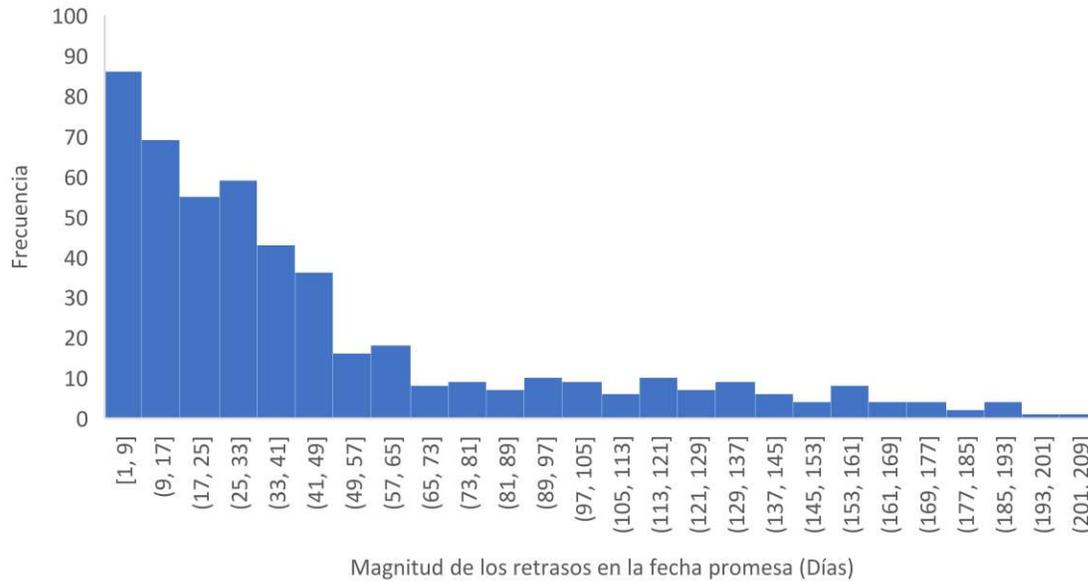


Figura 19: Histograma de la magnitud de los retrasos en la fecha promesa de entrega (muestra 1)
Fuente: Elaboración propia

El histograma mostrado en la figura 19, muestra las magnitudes de los retrasos en la fecha pactada para la entrega del prototipo, se observa, que la duración de las demoras más frecuentes está entre 1 y 9 días (de 1 a 2 semanas), el rango de la dispersión de los retrasos en la fecha de entrega oscila desde un día hasta 209 días.

Al realizar la comparación de las muestras analizadas, se observa un incremento de 7.41% en el nivel de servicio de la empresa, es decir, la implementación del indicador de desempeño propició un incremento en el porcentaje de órdenes dentro del tiempo promesa de entrega, así mismo se observa que la magnitud de los retrasos en la fecha promesa para la muestra en que se implementó el KPI disminuyó en 68.89%, ya que la muestra 1, reportaba una dispersión en las magnitudes de los retrasos de 1 hasta 209 días, caso contrario, con la muestra en la que se implementó el indicador, que reporta un rango de dispersión de 1 a 65 días.

La introducción del KPI en las áreas más críticas (de mayor tiempo de inactividad) funge como una alerta o semáforo que permite monitorear de manera preventiva el desempeño del proceso, por lo cual la detección temprana de una orden que presenta desviaciones o tiempos de inactividad entre el término e inicio de actividades permite que en actividades posteriores se preste mayor cuidado en el desarrollo del proceso, lo cual se ve reflejando en una reducción

de 68.89% en la magnitud de los retrasos y un aumento de 7 puntos porcentuales en el nivel de servicio.

Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general del presente trabajo terminal de grado, que consistió en realizar un análisis y evaluación del proceso de elaboración de prototipos en una empresa del sector automotriz, se diseñó una estrategia basada en la implementación de modelos de simulación de eventos discretos como herramienta para caracterizar, analizar y evaluar el proceso, con la finalidad de recolectar información para la construcción de los modelos de simulación y analizar el proceso, se realizó el mapeo detallado de una muestra de proyectos que comprenden 3 meses de operación de la empresa, para ello se elaboraron diagramas de Gantt para cada proyecto incluido en la muestra de datos, con lo que se permitió la detección de las áreas y actividades críticas que aportan mayor variabilidad al proceso, así mismo, fue posible identificar la magnitud de tiempos de inactividad entre el término e inicio de actividades consecutivas.

La simulación del sistema permitió evaluar el estado actual del proceso e identificar el impacto que generan las actividades críticas en el nivel de servicio de la empresa. Como resultado del presente trabajo, se obtiene la implementación de los modelos de simulación como una herramienta de evaluación de procesos y apoyo a la toma de decisiones, puesto que permite analizar el sistema desde una perspectiva más amplia, y evaluar los posibles cambios en el sistema. Las RPCs son un formalismo de la simulación de eventos discretos que se ha empleado de manera sistemática para el análisis y toma de decisiones en las áreas de planificación y gestión de procesos, en este caso, se evidenció su funcionalidad para estimar el comportamiento del proceso y la generación de información relevante respecto a la variabilidad esperada en cuanto al nivel del servicio como métrica de desempeño.

La simulación de eventos discretos resultó ser una herramienta efectiva al igual que en el trabajo de Sánchez et al., (2015), proporcionando un método para el desarrollo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones, además de contribuir con una metodología cuya finalidad es obtener información que permita establecer un lead time estándar asociado con el nivel de

servicio que la empresa requiera, así mismo, dentro de las aportaciones del presente análisis se resalta la identificación de las actividades con los mayores tiempos de inactividad en el proceso, por lo que se analizó la implementación de un indicador de desempeño como una alternativa de mejora para el proceso de elaboración de prototipos, cuya función ayuda a monitorear y controlar las áreas de mayor magnitud en los tiempos de inactividad y propiciar un incremento en la capacidad de respuesta del proceso para ser más competitivos y eficaces.

La implementación del indicador de desempeño en las áreas y actividades detectadas con mayores periodos de inactividad, proporcionó un incremento en el nivel de servicio agregado de 7 puntos porcentuales, así mismo, se observa una reducción de 68.89% en la magnitud de los retrasos en la fecha promesa de entrega.

Otra de las aportaciones del presente trabajo es la traducción de los modelos aquí presentados a JaamSim, software accesible de uso libre y gratuito con una interfaz más amigable, además, se proporciona un manual (Anexo C) para realizar modificaciones para su uso independiente por parte de la empresa para futuros análisis. Cabe mencionar que el impacto a nivel de proceso, para las mejoras que se diseñen se podría evaluar antes de su implementación a través de la actualización de los modelos traducidos al software JaamSim.

Recomendaciones

En relación con las recomendaciones del presente trabajo terminal de grado se destaca la importancia del uso e implementación de la simulación de sistemas como una alternativa accesible para analizar y comprender de forma acertada las interrelaciones o puntos críticos que pueden tener los procesos y a partir de estos modelar soluciones eficientes. También se sugiere a los tomadores de decisiones, el empleo de la simulación como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, puesto que permite analizar, comprender, evaluar y explorar diversos escenarios sin incurrir en los riesgos asociados que conlleva experimentar en el sistema real. Dentro de la parte operacional de los modelos de simulación, se recomienda que en el momento que se desee analizar diferentes escenarios, es decir, evaluar cambios en la duración de las actividades o se realice el despliegue de potenciales mejoras en el proceso, bastaría

con actualizar los parámetros de entrada del modelo y analizar el efecto que tienen dichos cambios en el desempeño del proceso.

Por otro lado, si se requiere analizar o evaluar cambios en la estructura del proceso habría que realizar modificaciones en la configuración de los modelos de simulación presentados.

Trabajo futuro

Con respecto al trabajo futuro de este trabajo terminal de grado y siguiendo la misma línea de investigación, se observa que aún existe potencial de mejora en el proceso de elaboración de prototipos, por lo cual se sugiere realizar la valoración e implementación de otros KPIs en las demás áreas registradas con desfases en el tiempo de conclusión de cada actividad, también se recomienda el análisis y evaluación de la estandarización del proceso (de ser posible la homologación de las secuencias de producción, tomando como estándar la de mejor desempeño actual).

Referencias

- Álvarez, J. S. (2009). *Modelos de simulación de eventos discretos: ¿por qué, ¿cómo y cuándo?* *Pharmaco Economics Spanish Research Articles*, 6(3), 83-89, disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03320854#citeas>
- Antonelli, D., Litwin, P., & Stadnicka, D. (2018). Multiple System Dynamics and Discrete Event Simulation for manufacturing system performance evaluation. *Procedia CIRP*, 78, 178-183.
- Arango Serna, M. D., Perez Ortega, G., & Rojas Lopez, M. D. (2008). MODELLING OF THE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT INDICATORS. A SYSTEMIC POINT OF VIEW. *DYNA*, 75(156), 19-28.
- Atieh, A. M., Kaylani, H., Almuhtady, A., & Al-Tamimi, O. (2016). A value stream mapping and simulation hybrid approach: application to the glass industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5-8), 1573-1586.
- Arroyo, I., Bravo, L. C., Llinás, H., & Muñoz, F. L. (2014). Distribuciones Poisson y Gamma: Una discreta y continua relación. *Prospectiva*, 12(1), 99-107.
- Banks, J. (Ed.). (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons.
- Chen, I. J., & Paulraj, A. (2004). *Towards a theory of supply chain management: the constructs and measurements*. 22, 119–150. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2003.12.007>
- Fullana Belda, C., & Urquía Grande, E. (2009). Los modelos de simulación: una herramienta multidisciplinar de investigación. *Encuentros multidisciplinares*.

- Habibifar, N., Hamid, M., Bastan, M., & Azar, A. T. (2019). Performance optimisation of a pharmaceutical production line by integrated simulation and data envelopment analysis. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 14(4), 360–376. <https://doi.org/10.1504/IJSPM.2019.103587>
- Heshmat, M., El-Sharief, M., & El-Sebaie, M. (2017). Simulation modelling and analysis of a production line. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 12(3-4), 369-376
- Hosseinpour, F., & Hajihosseini, H. (2009). Importance of simulation in manufacturing. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 51(3), 292-295.
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (2017). Global supply chain and operations management. *A decision-oriented introduction to the creation of value*, 2.
- Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L. K., & Young, T. (2010). Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research*, 203(1), 1-13.
- Jensen, K., & Kristensen, L. M. (2009). *Coloured Petri nets: modelling and validation of concurrent systems*. Springer Science & Business Media.
- Kellner, M. I., Madachy, R. J., & Raffo, D. M. (1999). Software process simulation modeling: why? what? how?. *Journal of Systems and Software*, 46(2-3), 91-105.
- Kleijnen, J. (2003). *Supply Chain Simulation: A Survey*. *CentER Discussion Paper*, (2003–103), 82–89, disponible en: <https://ideas.repec.org/s/tiu/tiucen.html>
- Longo, F., & Mirabelli, G. (2008). An advanced supply chain management tool based on modeling and simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 54(3), 570-588.
- Mourtzis, D. (2020). Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1927-1949.

- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541-580.
- Ong, S. K., Yuan, M. L., & Nee, A. Y. C. (2008). Augmented reality applications in manufacturing: a survey. *International Journal of Production Research*, 46(10), 2707–2742. doi:10.1080/00207540601064773
- Páez, F. E., Urriza, J. M., Orozco, J. D., & Buckle, C. (2011). *Un modelo de eventos discretos para la simulación de sistemas de tiempo real*. In XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/18797>
- Palma, R. R., Martínez, F., & Quilez, R. (2009). Propuesta para optimización de sistemas productivos modelados con simulación por eventos discretos. In XI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/19694>
- Persson, F., & Olhager, J. (2002). Performance simulation of supply chain designs. *International journal of production economics*, 77(3), 231-245.
- Pires, M. C., Frazzon, E. M., Carreirão Danielli, A. M., Kück, M., & Freitag, M. (2018). *Towards a simulation-based optimization approach to integrate supply chain planning and control*. *Procedia CIRP*, 72, 520–525, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.288>
- Sanchez, P., Ceballos, Y. F., & Torres, G. S. (2015). Análisis del proceso productivo de una empresa de confecciones: modelación y simulación. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 6.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of simulation*, 7(1), 12-24.

- Sayama, H. (2015). Introduction to the modeling and analysis of complex systems. Open SUNY Textbooks. Standridge, C. R., & Marvel, J. H. (2006, December). Why lean needs simulation. In Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference (pp. 1907-1913). IEEE.
- Standridge, Charles R.; Marvel, Jon H. Why lean needs simulation. In Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference. IEEE, 2006. p. 1907-1913.
- Tako, A. A., & Robinson, S. (2018). *Comparing discrete-event simulation and system dynamics: Users' perceptions*. In *System Dynamics* (pp. 261-299). Palgrave Macmillan, London, disponible en: https://doi.org/10.1057/978-1-349-95257-1_9
- Vieira, A. A. C., Dias, L., Santos, M. Y., Pereira, G. A. B., & Oliveira, J. (2020). *Are simulation tools ready for big data? Computational experiments with supply chain models developed in Simio*. *Procedia Manufacturing*, 42(2019), 125–131, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.093>
- Zhang, M., Chen, J., & Chang, S. H. (2020). *An adaptive simulation analysis of reliability model for the system of supply chain based on partial differential equations*. *Alexandria Engineering Journal*, disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.002>
- Zhang, C., & Zhang, C. (2007). Design and simulation of demand information sharing in a supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15(1), 32-46.

ANEXO A: Información del proceso de elaboración de prototipos

Tabla 19: Información de los proyectos

Orden	Cantidad	Proceso A		Proceso B		Proceso C		Proceso D		Proceso E		Proceso F		Proceso G		Fecha promesa de entrega
		Requerimiento del cliente		Orden de compra		Requerimiento interno		Orden de compra interna (Toluca)		Manufactura		Empaque y etiquetado		Tránsito		
		Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	
1	18	21/08/2019	22/08/2019	05/09/2019	12/09/2019	21/08/2019	22/08/2019	05/09/2019	12/09/2019	01/10/2019	15/10/2019	15/10/2019	18/10/2019	16/10/2019	23/10/2019	16/10/2019
2	115	17/04/2019	18/04/2019	17/04/2019	24/04/2019	09/07/2019	10/07/2019	09/09/2019	16/09/2019	27/08/2019	10/09/2019	10/09/2019	13/09/2019	13/09/2019	20/09/2019	09/09/2019
3	115	17/04/2019	18/04/2019	17/04/2019	24/04/2019	09/07/2019	10/07/2019	09/09/2019	16/09/2019	27/08/2019	10/09/2019	11/09/2019	16/09/2019	25/09/2019	02/10/2019	09/09/2019
4	115	17/04/2019	18/04/2019	17/04/2019	24/04/2019	09/07/2019	10/07/2019	09/09/2019	16/09/2019	27/08/2019	10/09/2019	20/09/2019	25/09/2019	25/09/2019	02/10/2019	09/09/2019
5	115	17/04/2019	18/04/2019	17/04/2019	24/04/2019	09/07/2019	10/07/2019	12/09/2019	19/09/2019	10/09/2019	24/09/2019	19/09/2019	24/09/2019	23/09/2019	30/09/2019	09/09/2019
6	100	05/08/2019	06/08/2019	13/09/2019	20/09/2019	19/08/2019	20/08/2019	27/09/2019	04/10/2019	27/09/2019	11/10/2019	11/10/2019	16/10/2019	15/10/2019	22/10/2019	04/10/2019
7	100	05/08/2019	06/08/2019	13/09/2019	20/09/2019	19/08/2019	20/08/2019	27/09/2019	04/10/2019	30/09/2019	14/10/2019	14/10/2019	17/10/2019	17/10/2019	24/10/2019	04/10/2019
8	100	05/08/2019	06/08/2019	13/09/2019	20/09/2019	19/08/2019	20/08/2019	27/09/2019	04/10/2019	07/10/2019	21/10/2019	21/10/2019	24/10/2019	25/10/2019	01/11/2019	04/10/2019
9	40	31/07/2019	01/08/2019	10/09/2019	17/09/2019	26/08/2019	27/08/2019	04/10/2019	11/10/2019	20/09/2019	04/10/2019	05/10/2019	09/10/2019	07/10/2019	14/10/2019	07/10/2019
10	99	18/07/2019	19/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	21/08/2019	22/08/2019	28/10/2019	04/11/2019	22/10/2019	05/11/2019	30/10/2019	04/11/2019	01/11/2019	08/11/2019	27/09/2019
11	36	18/07/2019	19/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	21/08/2019	22/08/2019	28/10/2019	04/11/2019	22/10/2019	05/11/2019	30/10/2019	04/11/2019	01/11/2019	08/11/2019	04/10/2019
12	50	22/10/2019	23/10/2019	22/10/2019	29/10/2019	22/10/2019	23/10/2019	28/10/2019	04/11/2019	22/10/2019	05/11/2019	29/10/2019	01/11/2019	01/11/2019	08/11/2019	26/11/2019
13	10	19/09/2019	20/09/2019	19/09/2019	26/09/2019	26/09/2019	27/09/2019	05/11/2019	12/11/2019	22/10/2019	05/11/2019	22/11/2019	27/11/2019	25/11/2019	02/12/2019	18/10/2019
14	12	30/09/2019	01/10/2019	05/11/2019	12/11/2019	01/10/2019	02/10/2019	06/11/2019	13/11/2019	25/10/2019	08/11/2019	08/11/2019	13/11/2019	14/11/2019	21/11/2019	08/11/2019
15	8	26/08/2019	27/08/2019	05/11/2019	05/11/2019	04/09/2019	05/09/2019	06/11/2019	13/11/2019	29/10/2019	12/11/2019	05/11/2019	08/11/2019	11/11/2019	18/11/2019	08/11/2019
16	10	28/11/2019	29/11/2019	29/11/2019	06/12/2019	29/11/2019	02/12/2019	16/12/2019	23/12/2019	10/12/2019	24/12/2019	13/12/2019	18/12/2019	16/12/2019	23/12/2019	11/12/2019
17	38	28/11/2019	29/11/2019	29/11/2019	06/12/2019	29/11/2019	02/12/2019	16/12/2019	23/12/2019	10/12/2019	24/12/2019	03/01/2020	08/01/2020	04/01/2020	10/01/2020	11/12/2019
18	7	01/10/2019	02/10/2019	19/10/2019	23/10/2019	01/10/2019	02/10/2019	13/12/2019	20/12/2019	16/12/2019	30/12/2019	03/01/2020	08/01/2020	10/01/2020	17/01/2020	01/12/2019
19	15	19/06/2019	20/06/2019	05/08/2019	12/08/2019	04/09/2019	05/09/2019	24/07/2019	31/07/2019	13/09/2019	27/09/2019	17/09/2019	20/09/2019	20/09/2019	27/09/2019	16/09/2019
20	150	12/06/2019	13/06/2019	26/06/2019	03/07/2019	03/07/2019	04/07/2019	08/01/2020	15/01/2020	02/12/2019	16/12/2019	09/01/2020	14/01/2020	10/01/2020	17/01/2020	21/01/2020
21	150	12/06/2019	13/06/2019	26/06/2019	03/07/2019	03/07/2019	04/07/2019	08/01/2020	15/01/2020	08/01/2020	22/01/2020	09/01/2020	14/01/2020	10/01/2020	17/01/2020	21/01/2020

Orden	Cantidad	Proceso A		Proceso B		Proceso C		Proceso D		Proceso E		Proceso F		Proceso G		Fecha promesa de entrega
		Requerimiento del cliente		Orden de compra		Requerimiento interno		Orden de compra interna (Toluca)		Manufactura		Empaque y etiquetado		Tránsito		
		Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	Recepción	Termino	
22	250	12/06/2019	13/06/2019	26/06/2019	03/07/2019	03/07/2019	04/07/2019	08/01/2020	15/01/2020	13/12/2019	27/12/2019	09/01/2020	14/01/2020	10/01/2020	17/01/2020	21/01/2020
23	300	01/08/2019	02/08/2019	19/11/2019	26/11/2019	01/08/2019	02/08/2019	06/12/2019	13/12/2019	02/12/2019	16/12/2019	06/12/2019	11/12/2019	13/12/2019	20/12/2019	21/11/2019
24	300	06/05/2019	07/05/2019	16/07/2019	23/07/2019	16/07/2019	17/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	13/07/2019	26/07/2019	18/07/2019	23/07/2019	20/07/2019	26/07/2019	19/07/2019
25	20	06/05/2019	07/05/2019	16/07/2019	23/07/2019	16/07/2019	17/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	12/07/2019	26/07/2019	25/07/2019	30/07/2019	30/07/2019	06/08/2019	19/07/2019
26	40	06/05/2019	07/05/2019	16/07/2019	23/07/2019	16/07/2019	17/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	19/07/2019	02/08/2019	02/08/2019	07/08/2019	06/08/2019	13/08/2019	19/07/2019
27	100	06/05/2019	07/05/2019	16/07/2019	23/07/2019	16/07/2019	17/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	26/07/2019	09/08/2019	20/08/2019	23/08/2019	23/08/2019	30/08/2019	19/07/2019
28	90	06/05/2019	07/05/2019	16/07/2019	23/07/2019	16/07/2019	17/07/2019	18/07/2019	25/07/2019	19/08/2019	02/09/2019	26/08/2019	29/08/2019	05/09/2019	12/09/2019	19/07/2019
29	40	02/10/2019	03/10/2019	03/10/2019	10/10/2019	03/10/2019	04/10/2019	08/10/2019	15/10/2019	03/10/2019	17/10/2019	09/10/2019	14/10/2019	10/10/2019	17/10/2019	04/10/2019
30	160	02/10/2019	03/10/2019	03/10/2019	10/10/2019	03/10/2019	04/10/2019	08/10/2019	15/10/2019	18/10/2019	01/11/2019	25/10/2019	30/10/2019	28/10/2019	04/11/2019	04/10/2019
31	100	02/10/2019	03/10/2019	03/10/2019	10/10/2019	03/10/2019	04/10/2019	08/10/2019	15/10/2019	21/11/2019	05/12/2019	28/11/2019	01/12/2019	02/12/2019	09/12/2019	04/10/2019

Fuente: Elaboración propia a partir de la información proporcionada por la empresa

Diagramas de Gantt

Secuencia 1

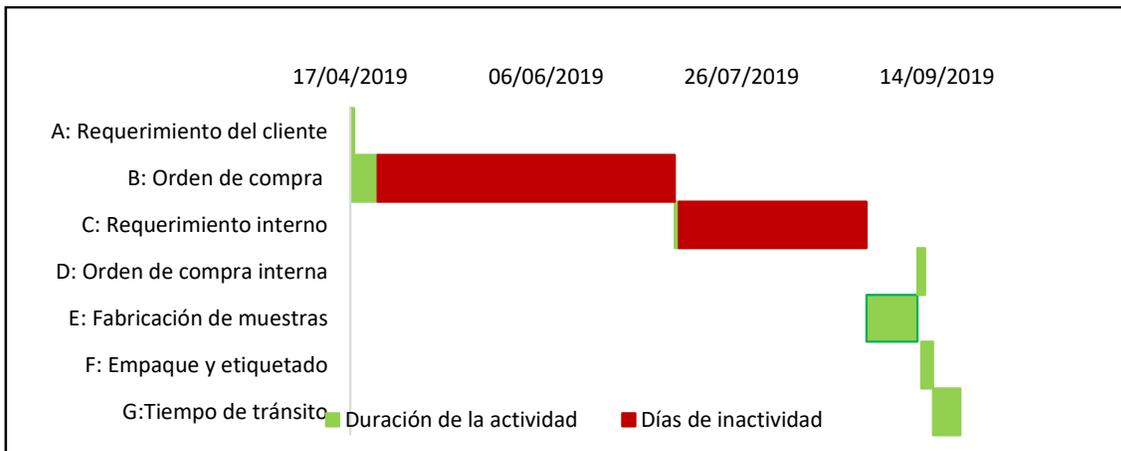


Figura 20: Diagrama de Gantt de la orden 2 procesada de acuerdo con la secuencia 1

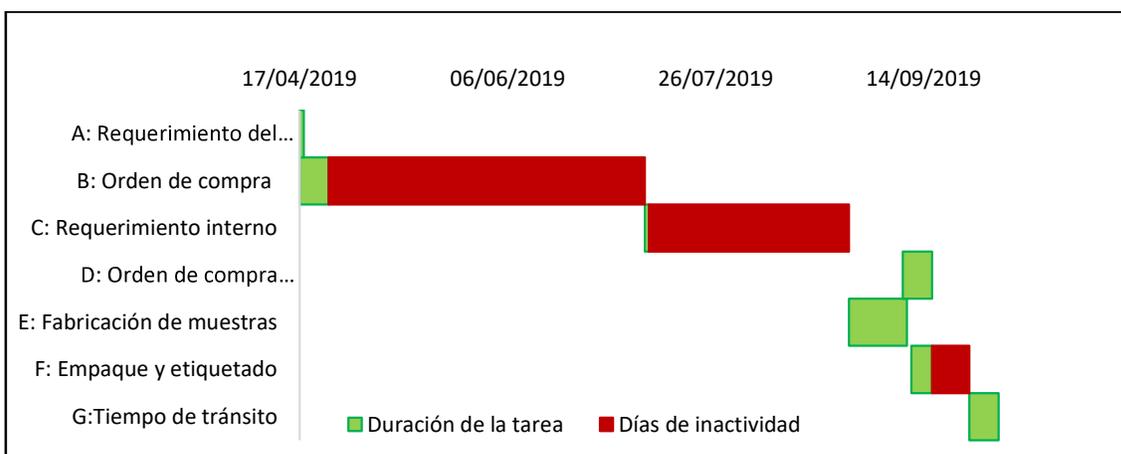


Figura 21: Diagrama de Gantt de la orden 3 procesada de acuerdo con la secuencia 1

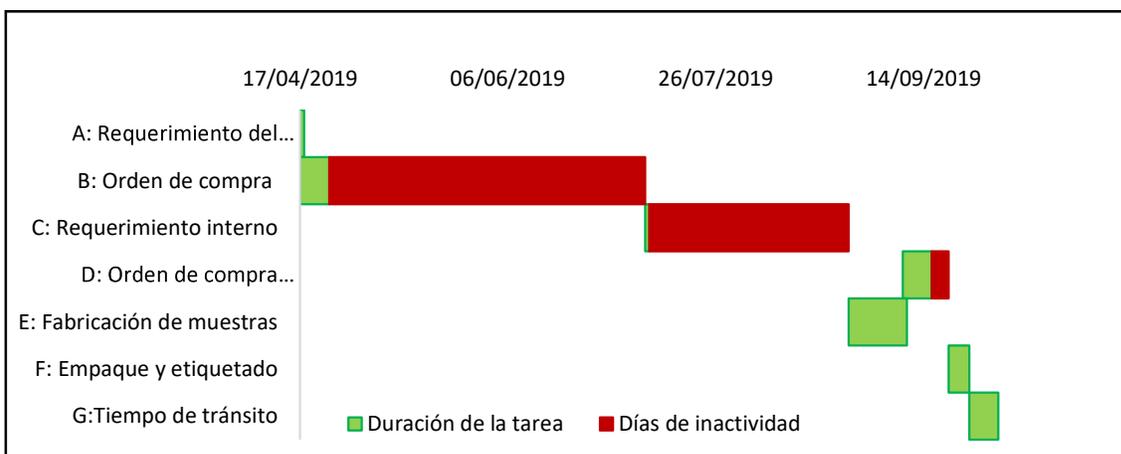


Figura 22: Diagrama de Gantt de la orden 4 procesada de acuerdo con la secuencia 1

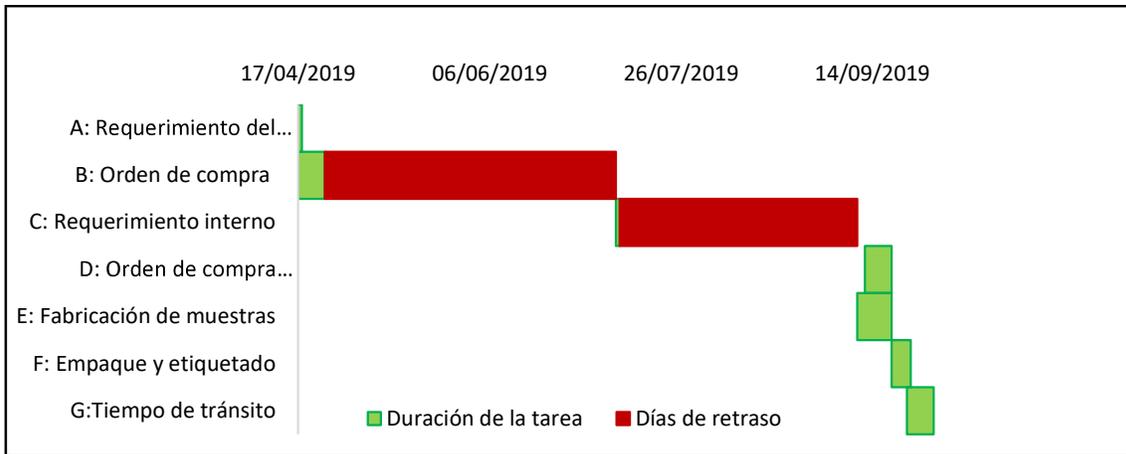


Figura 23: Diagrama de Gantt de la orden 5 procesada de acuerdo con la secuencia 1

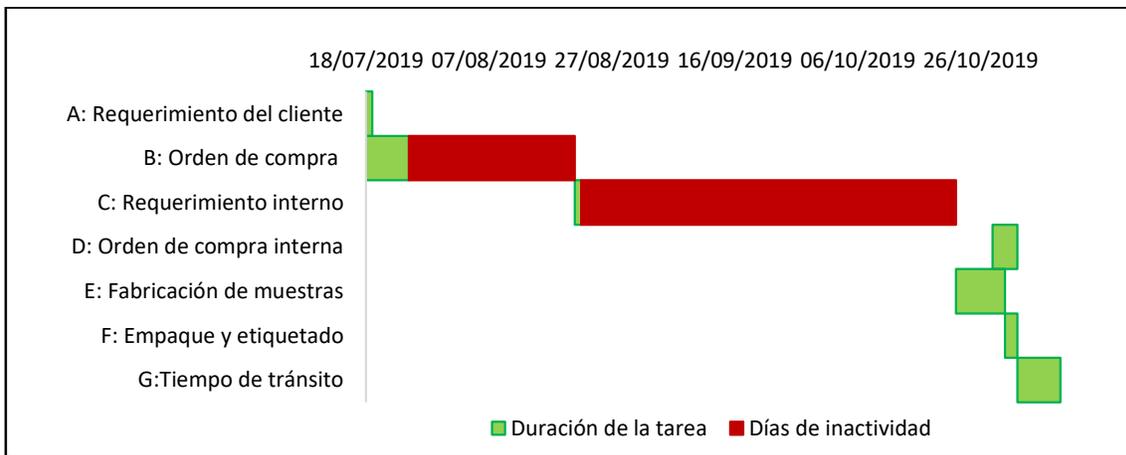


Figura 24: Diagrama de Gantt de la orden 10 procesada de acuerdo con la secuencia 1

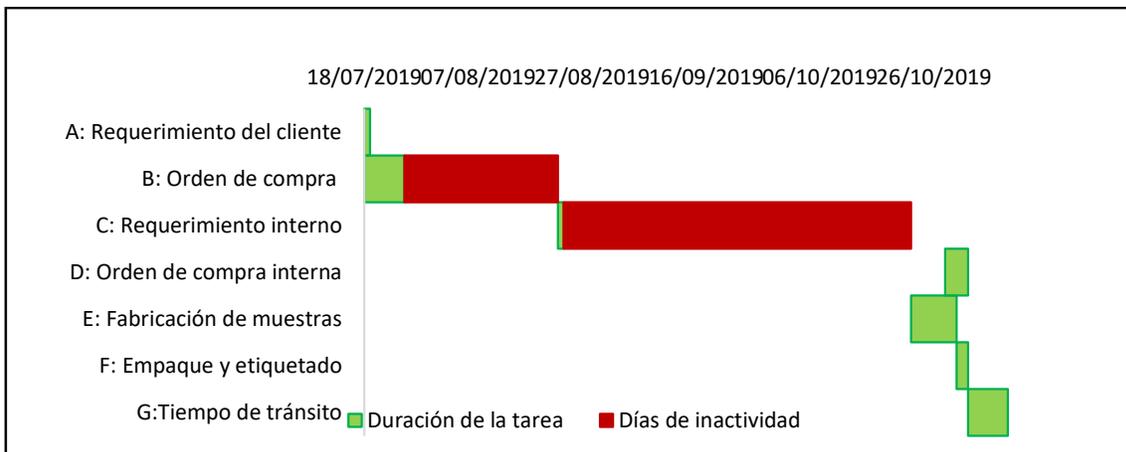


Figura 25: Diagrama de Gantt de la orden 11 procesada de acuerdo con la secuencia 1

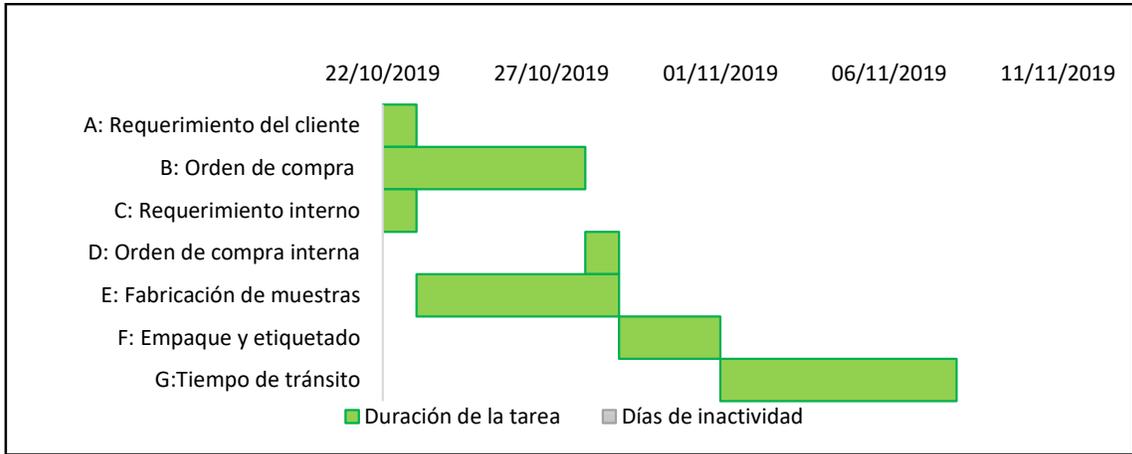


Figura 26: Diagrama de Gantt de la orden 12 procesada de acuerdo con la secuencia 1

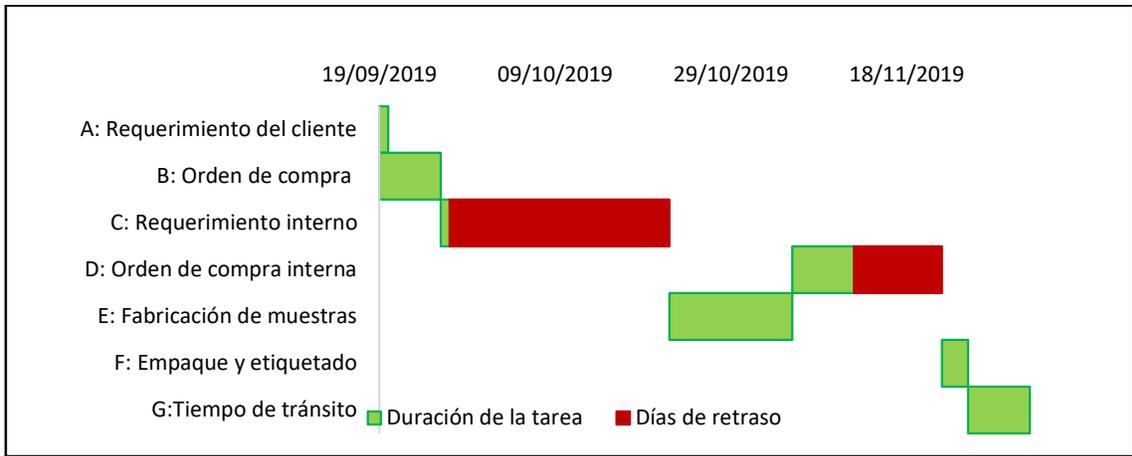


Figura 27: Diagrama de Gantt de la orden 13 procesada de acuerdo con la secuencia 1

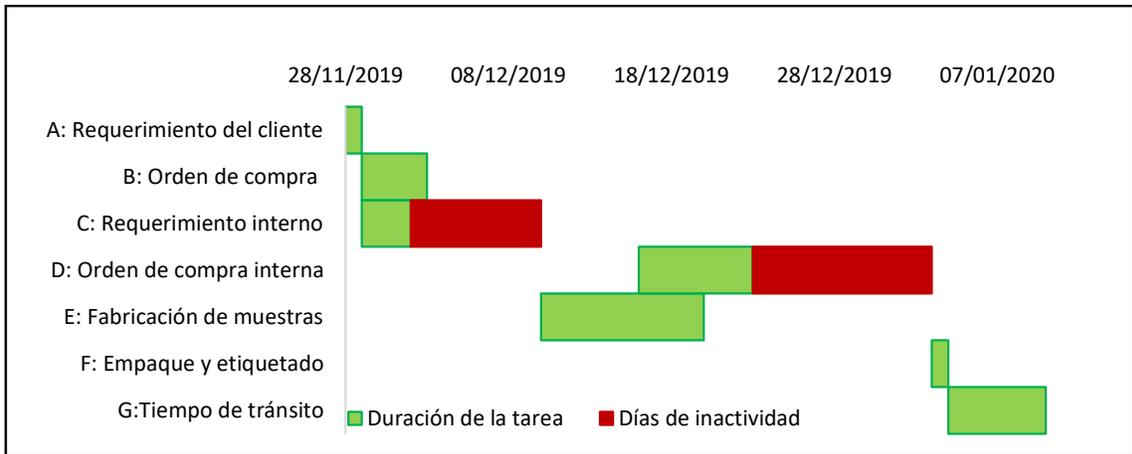


Figura 28: Diagrama de Gantt de la orden 17 procesada de acuerdo con la secuencia 1

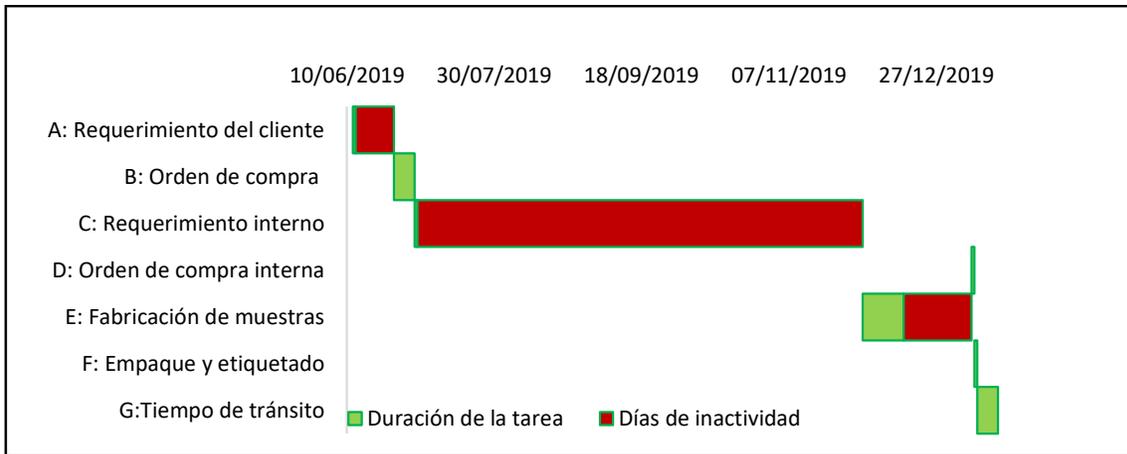


Figura 29: Diagrama de Gantt de la orden 20 procesada de acuerdo con la secuencia 1

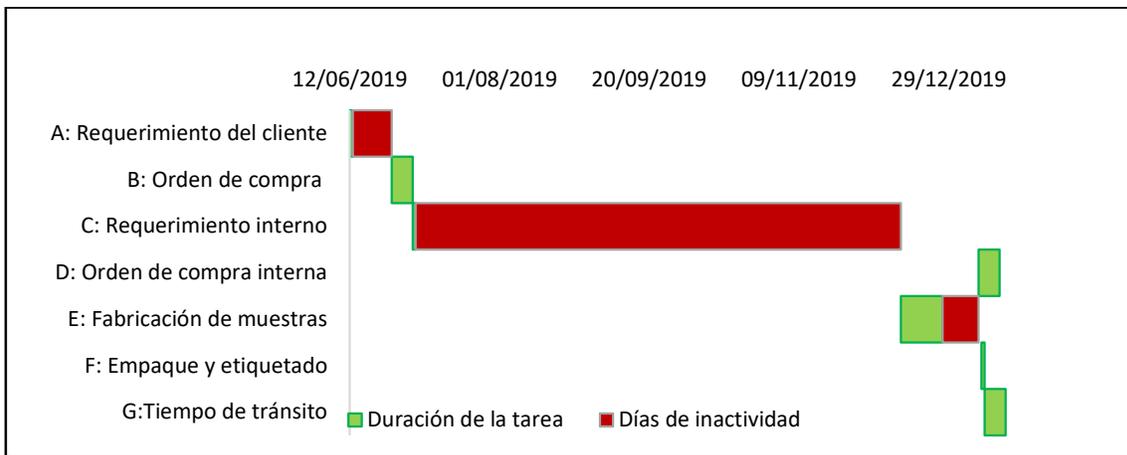


Figura 30: Diagrama de Gantt de la orden 22 procesada de acuerdo con la secuencia 1

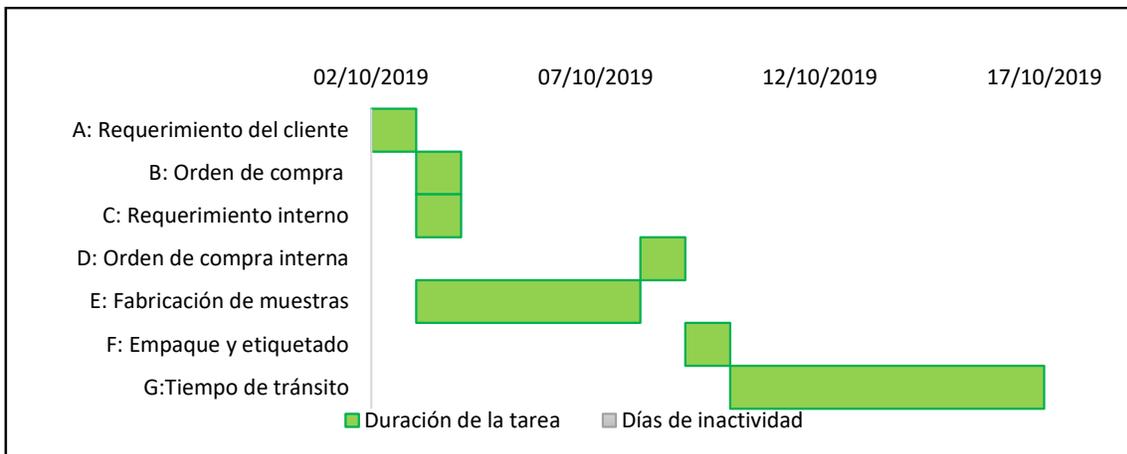


Figura 31: Diagrama de Gantt de la orden 29 procesada de acuerdo con la secuencia 1

Secuencia 2

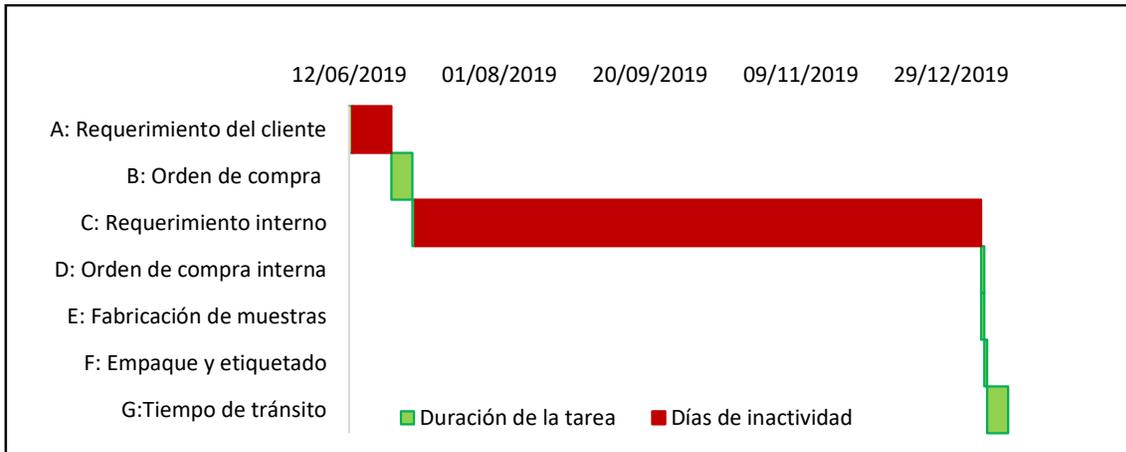


Figura 32: Diagrama de Gantt de la orden 21 procesada de acuerdo con la secuencia 2

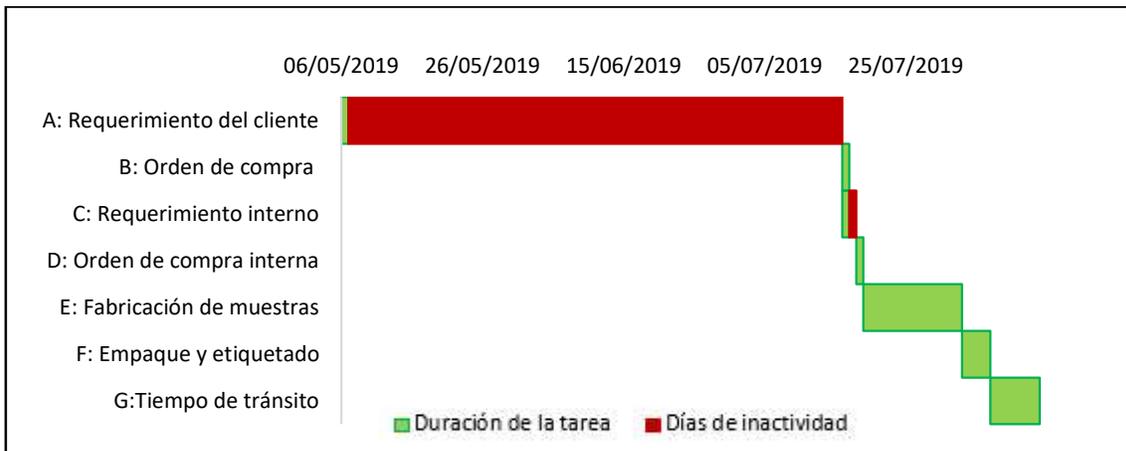


Figura 33: Diagrama de Gantt de la orden 26 procesada de acuerdo con la secuencia 2

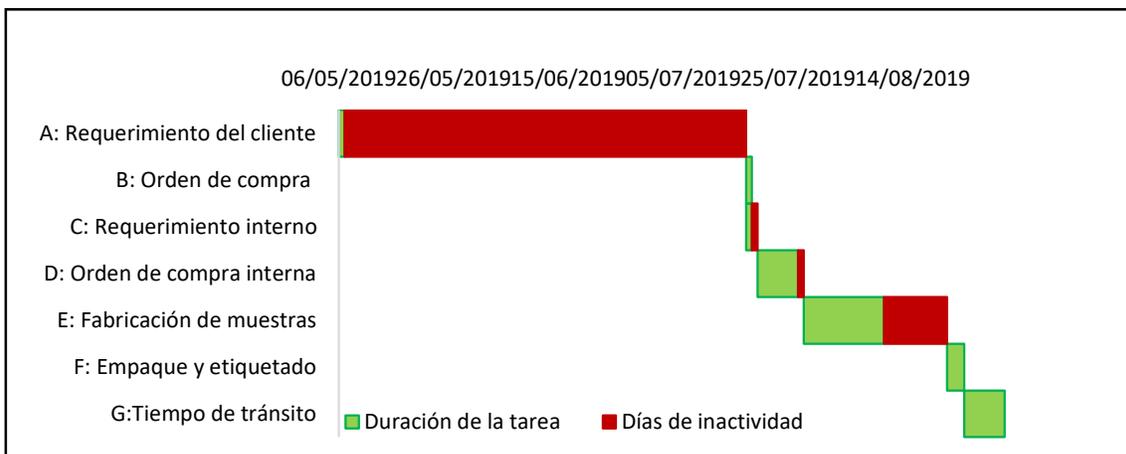


Figura 34: Diagrama de Gantt de la orden 27 procesada de acuerdo con la secuencia 2

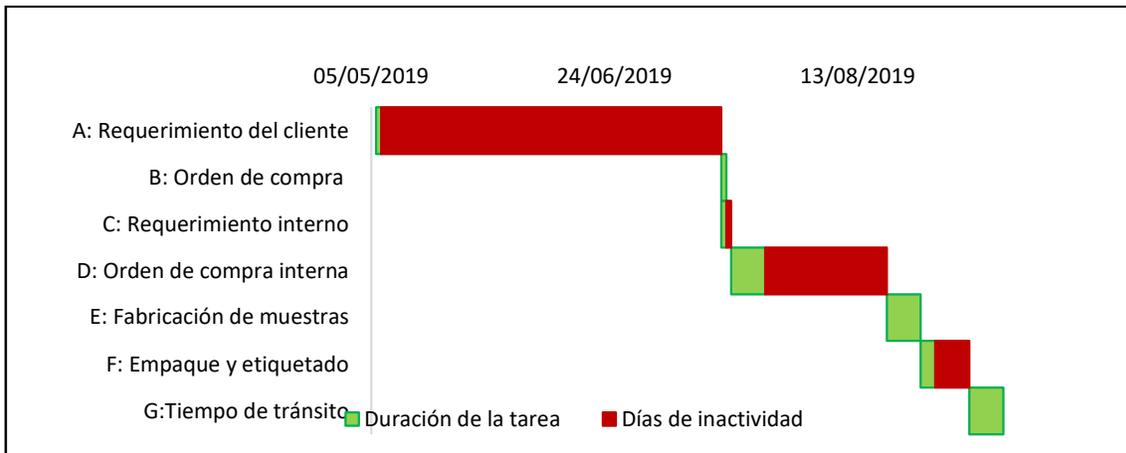


Figura 35: Diagrama de Gantt de la orden 28 procesada de acuerdo con la secuencia 2

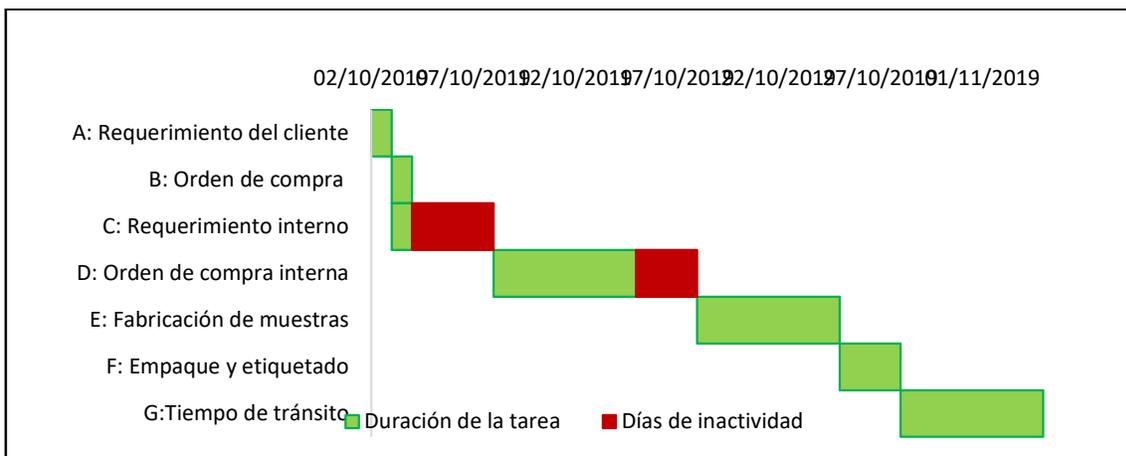


Figura 36: Diagrama de Gantt de la orden 30 procesada de acuerdo con la secuencia 2

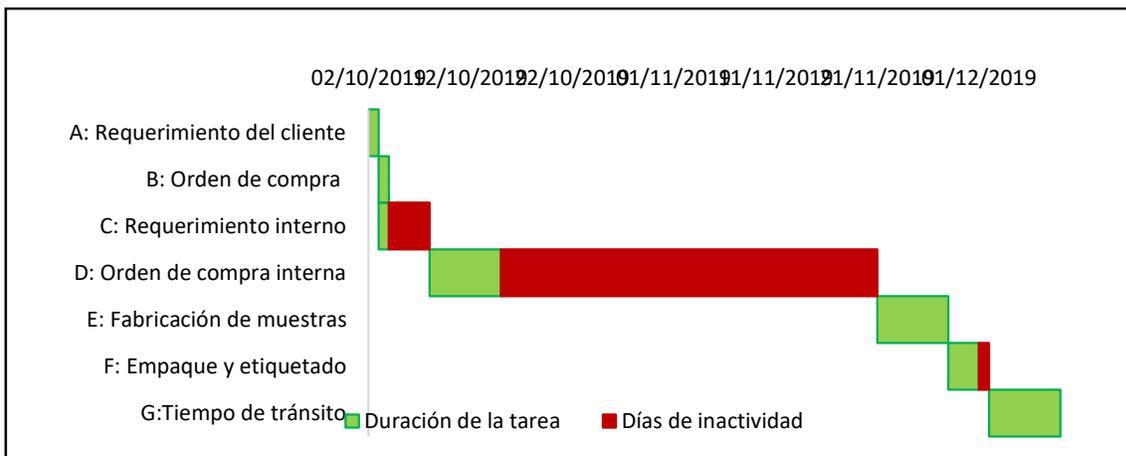


Figura 37: Diagrama de Gantt de la orden 31 procesada de acuerdo con la secuencia 2

Secuencia 3

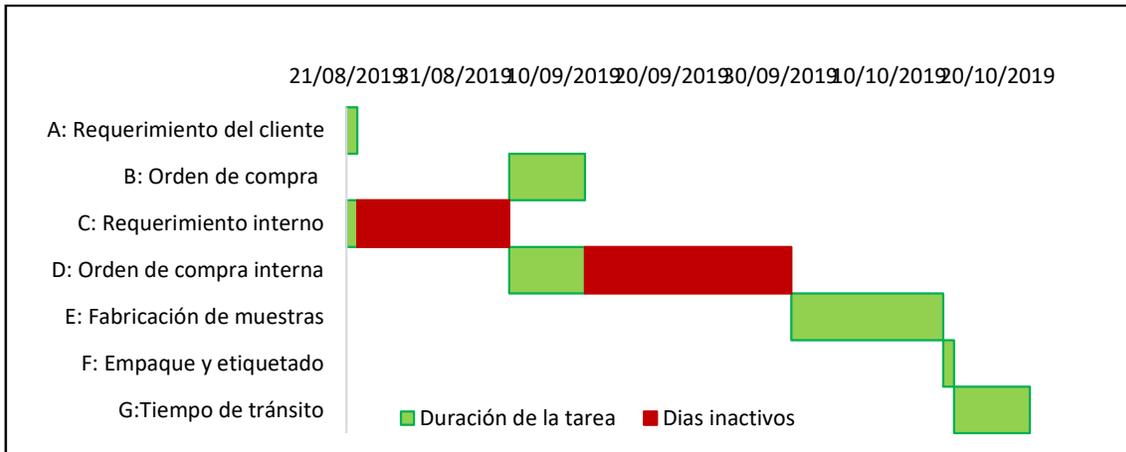


Figura 38: Diagrama de Gantt de la orden 1 procesada de acuerdo con la secuencia 3

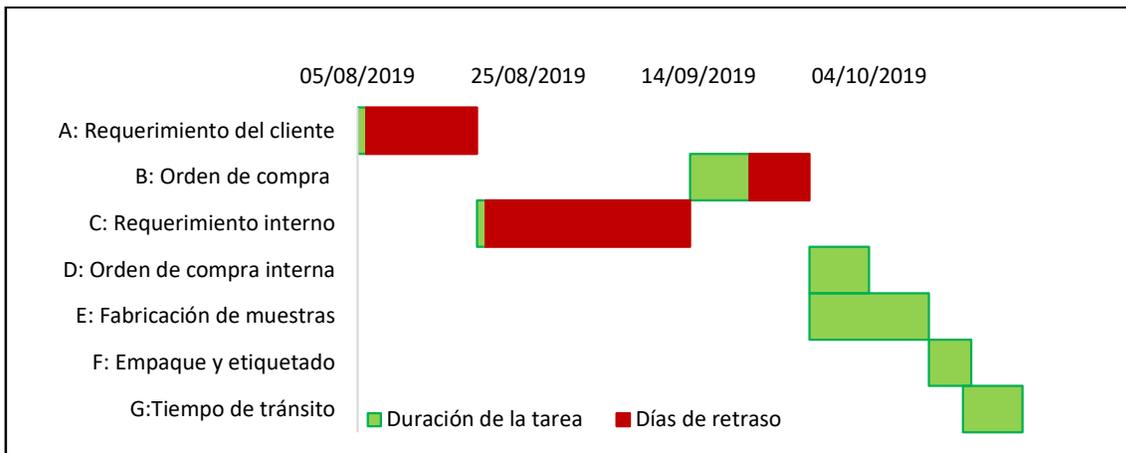


Figura 39: Diagrama de Gantt de la orden 6 procesada de acuerdo con la secuencia 3

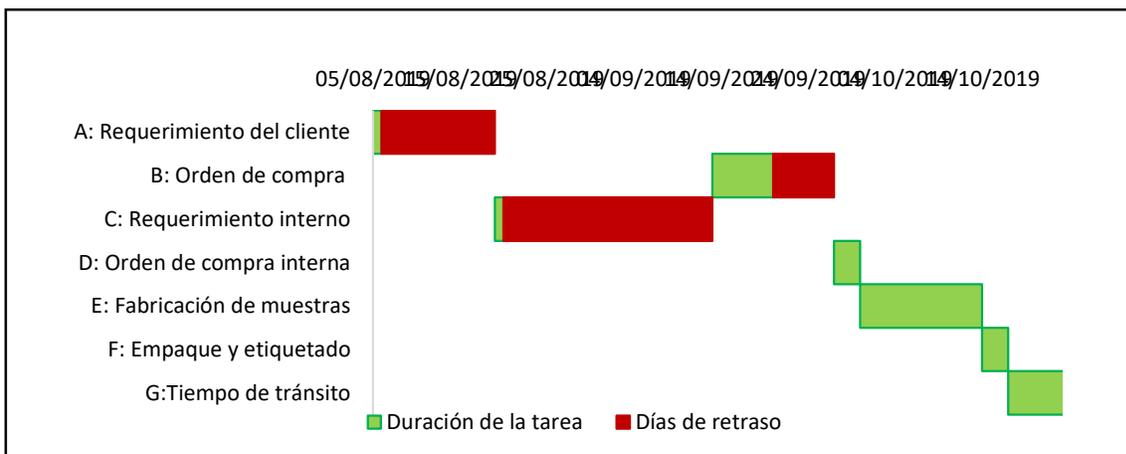


Figura 40: Diagrama de Gantt de la orden 7 procesada de acuerdo con la secuencia 3

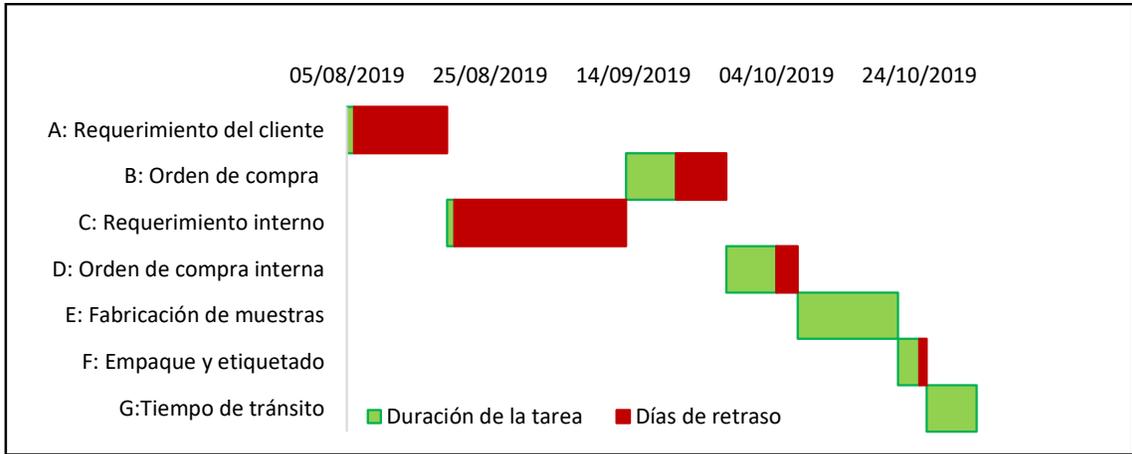


Figura 41: Diagrama de Gantt de la orden 8 procesada de acuerdo con la secuencia 3

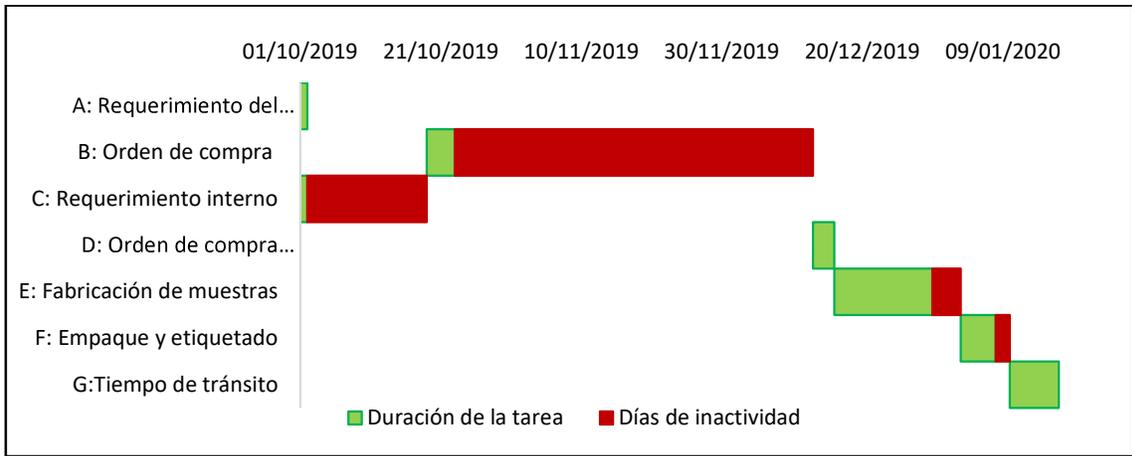


Figura 42: Diagrama de Gantt de la orden 18 procesada de acuerdo con la secuencia 3

Secuencia 4

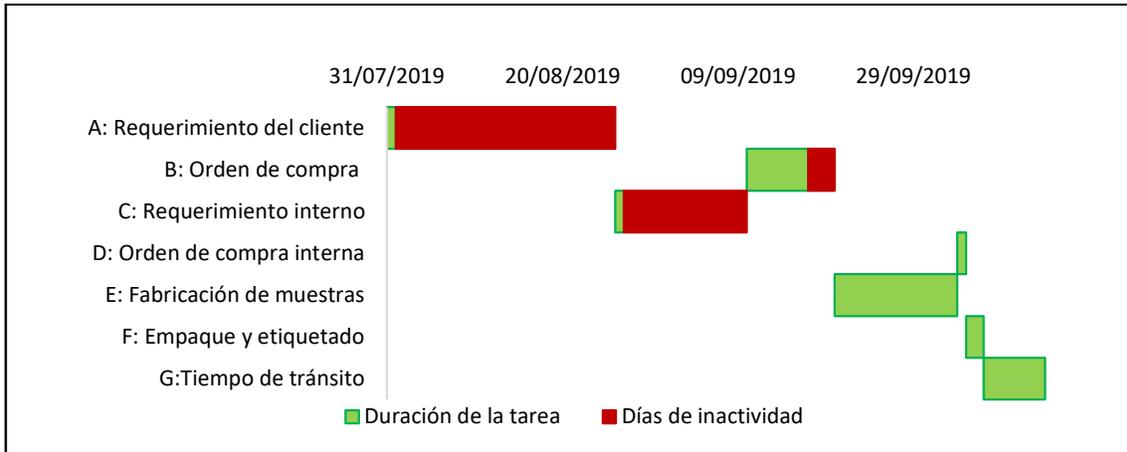


Figura 43: Diagrama de Gantt de la orden 9 procesada de acuerdo con la secuencia 4

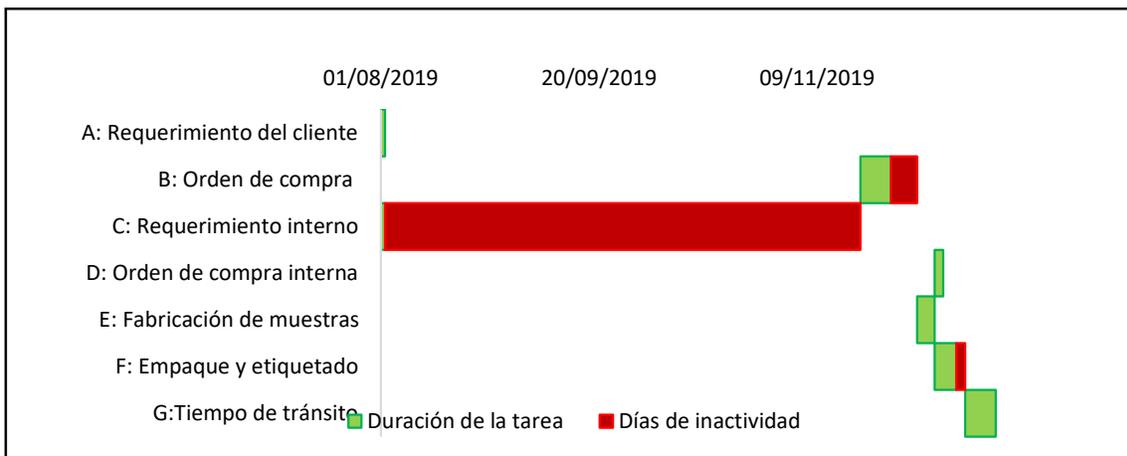


Figura 44: Diagrama de Gantt de la orden 23 procesada de acuerdo con la secuencia 4

ANEXO B: Modelos de simulación implementados en Cpn Tools

En esta sección se presentan los modelos de simulación implementados en el software Cpn Tools para las 4 secuencias identificadas en la muestra.

Modelo implementado para la secuencia 1

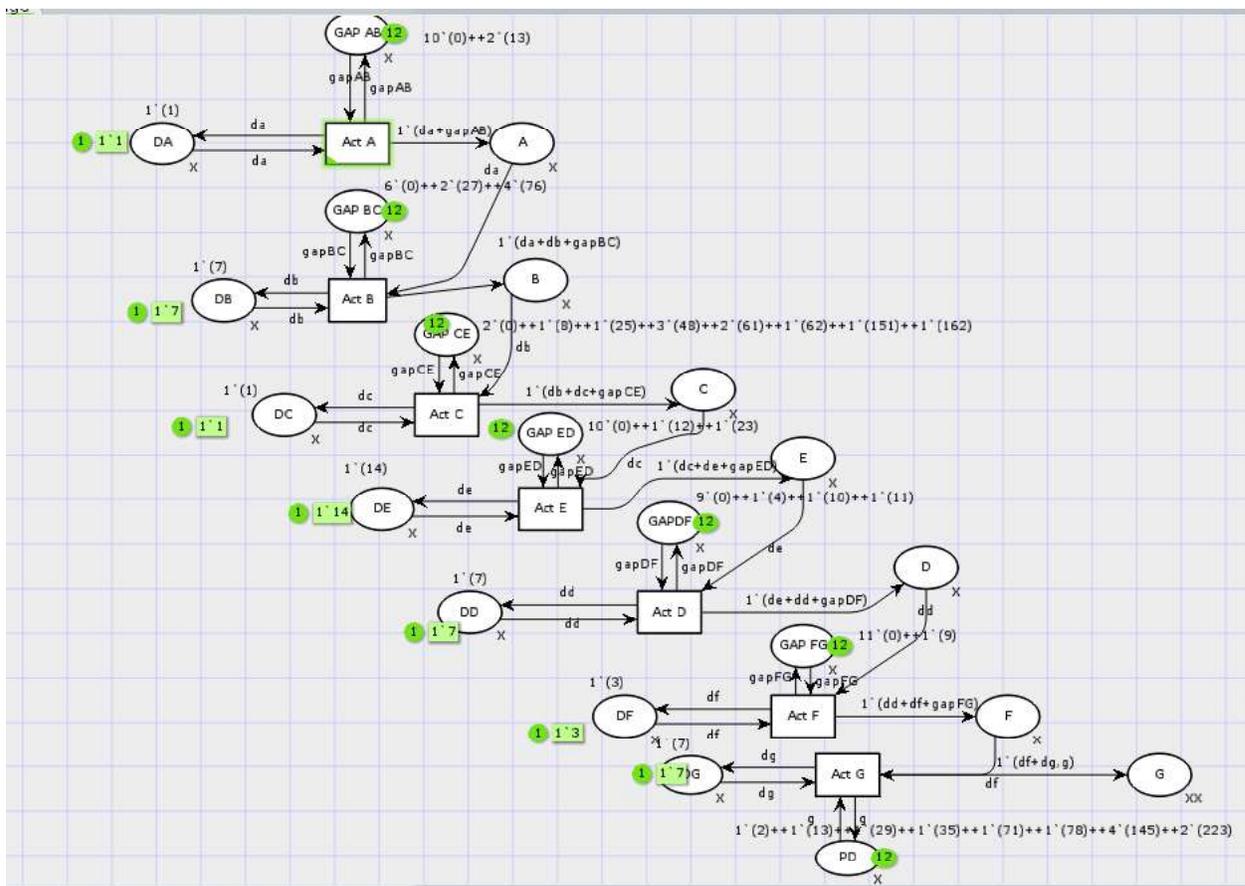


Figura 45: Modelo implementado en Cpn Tools para la secuencia de procesamiento 1
Fuente: Elaboración propia

Modelo implementado para la secuencia 2

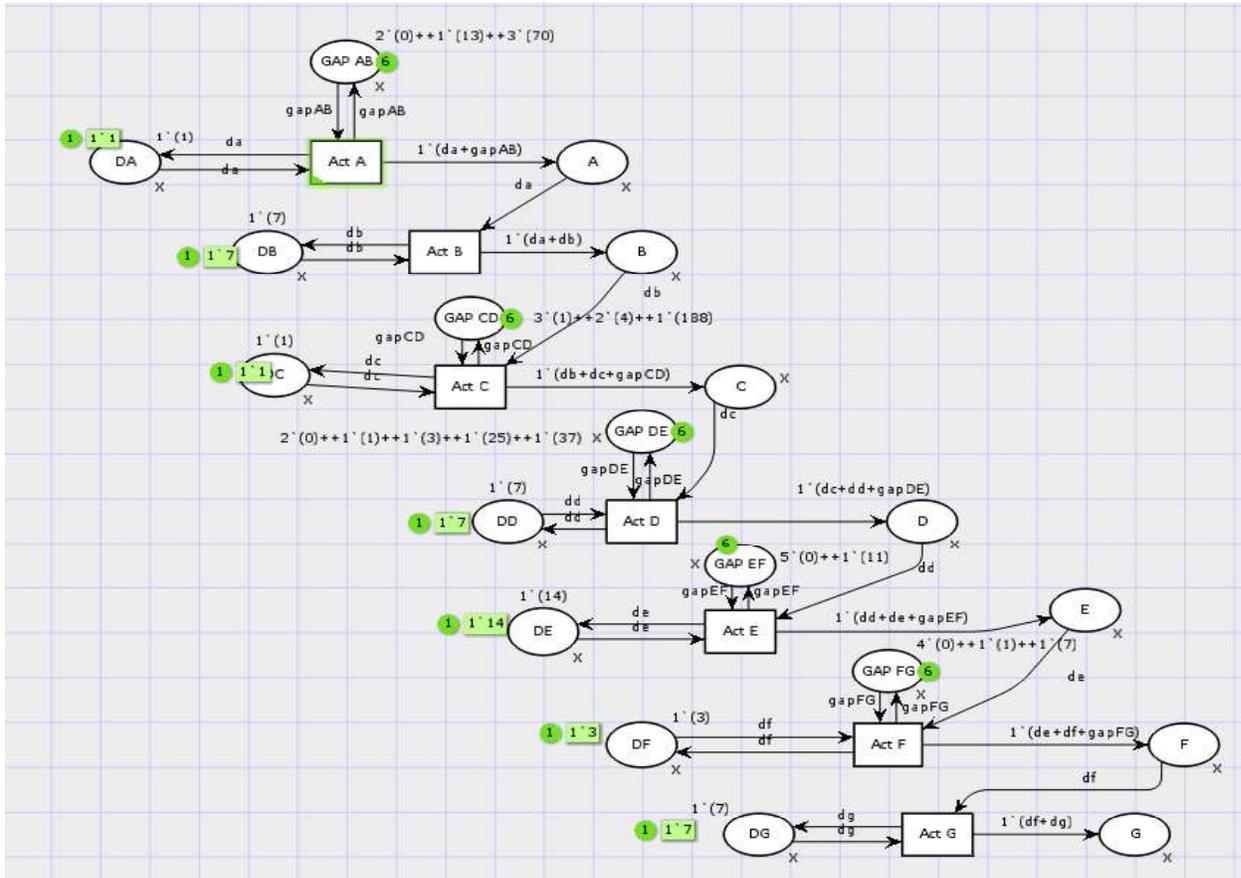


Figura 46: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 2
Fuente: Elaboración propia

Modelo implementado para la secuencia 3

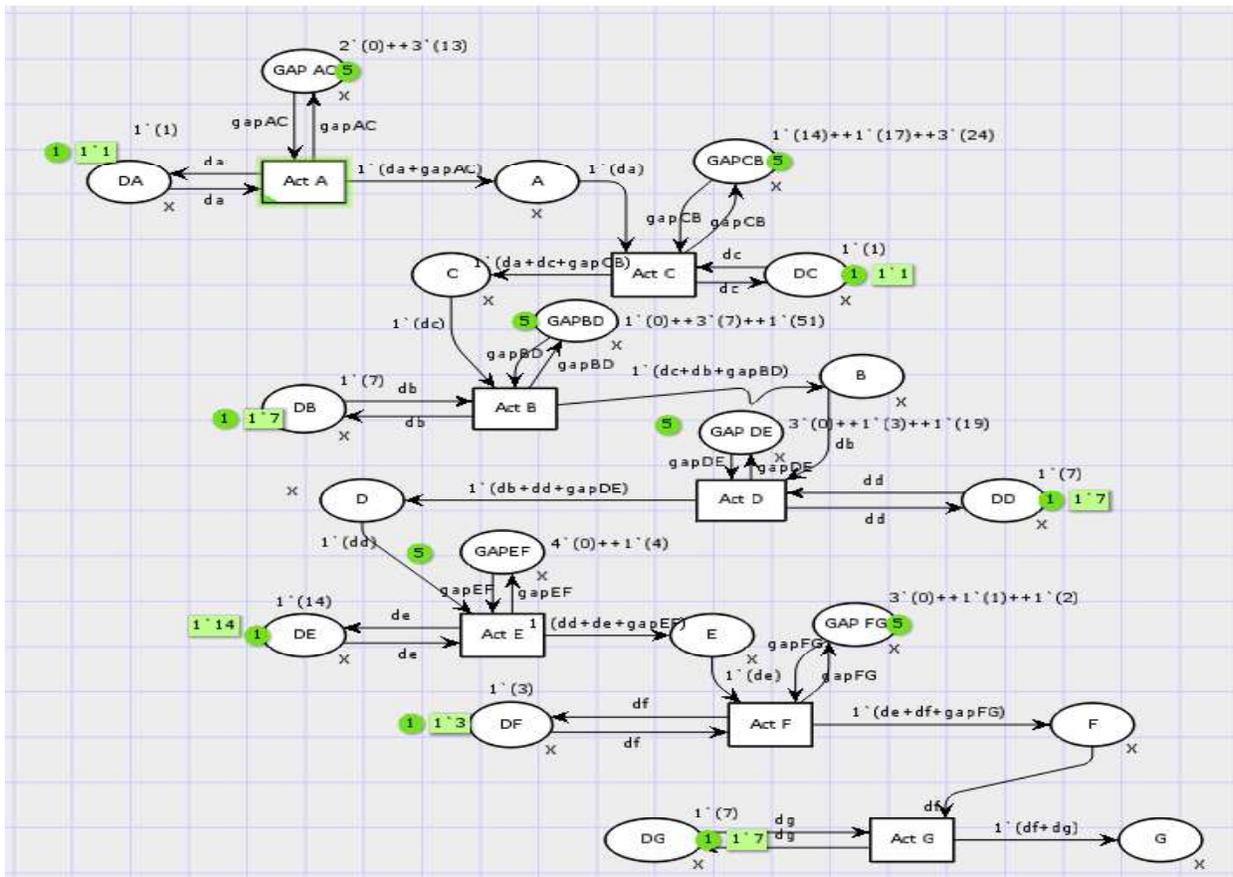


Figura 47: Modelo implementado en CPN Tools para la secuencia de procesamiento 3
Fuente: Elaboración propia

ANEXO C: Manual de usuario del modelo implementado en JaamSim

En esta sección se presentará una guía para realizar cambios y modificaciones en los modelos implementados para las secuencias identificadas en el proceso de elaboración de prototipos.

JaamSim

Jaamsim (Simulación y modelado de animación Java) es un software de acceso gratuito de código abierto para la simulación de eventos discretos. El software consta de un único ejecutable que se puede copiar en la computadora del usuario, se ejecuta en Windows, Mac OS X y Linux o cualquier computadora moderna con un procesador de serie Intel Core i3, i5 e i7.

Hay tres versiones del ejecutable de JaamSim disponibles para cada versión:

1. JaamSimYYYY-NN.exe (el ejecutable de 64 bits para Windows)
2. JaamSimYYYY-NN_x86.exe (el ejecutable de 32 bits para Windows)
3. JaamSimYYYY-NN.jar (el archivo jar ejecutable para Windows, Mac OS X y Linux)

Interfaz Gráfica del usuario

La interfaz gráfica de JaamSim cuenta con un panel de control que proporciona una serie de funciones para el control y ejecución (*control panel*, 1), una ventana de visualización para la representación gráfica del modelo (*viewer*,2), una ventana con las entidades para la construcción del modelo que proporciona una selección de objetos para su implementación (*model builder*,3), un selector de objetos que enumera los objetos presentes en el modelo (*object selector*,4), el editor de entrada que permite editar valores clave para el objeto seleccionado (*input editor*,5) y finalmente el visor de salida que muestra las salidas del objeto seleccionado (*output viewer*, 6).

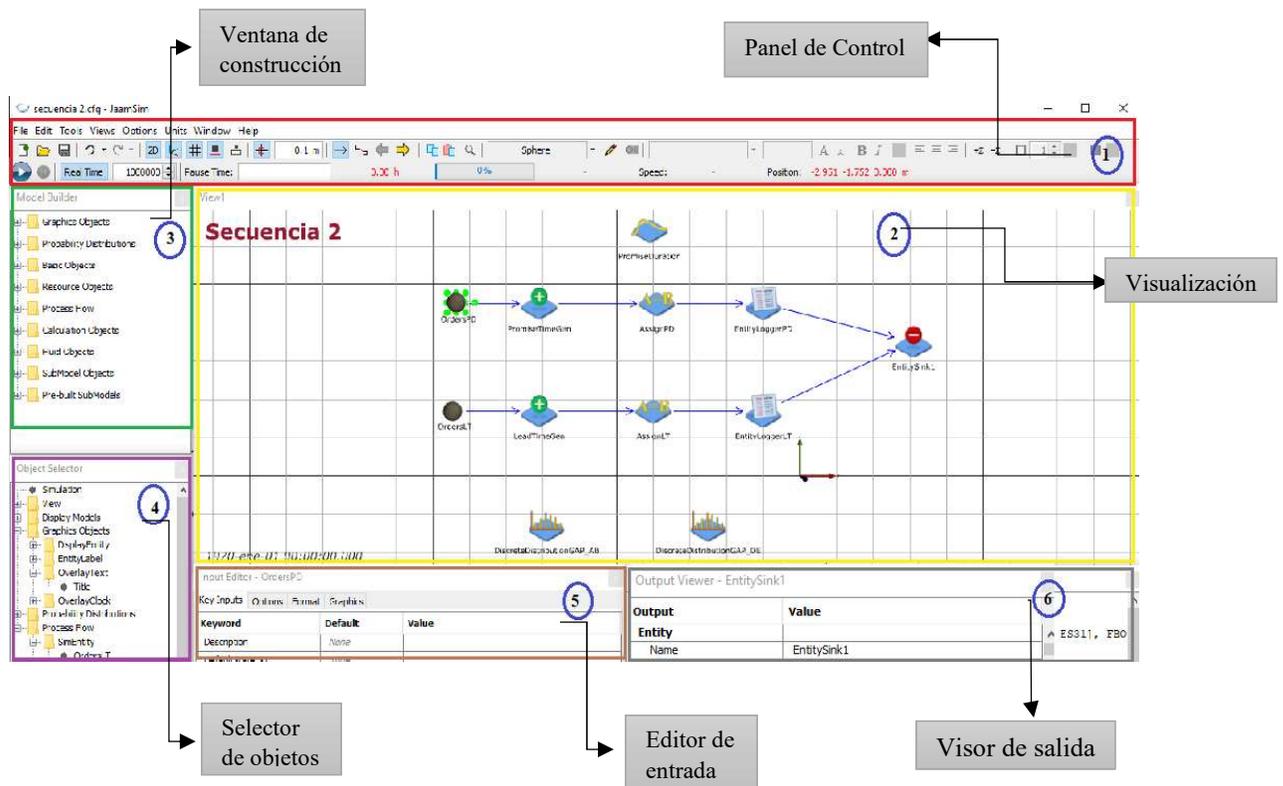


Figura 49: Interfaz gráfica del usuario

Después de ejecutar JaamSim y abrir el archivo titulado “Secuencia 2” se mostrará el modelo implementado para dicha secuencia, tal como se muestra en la siguiente figura.

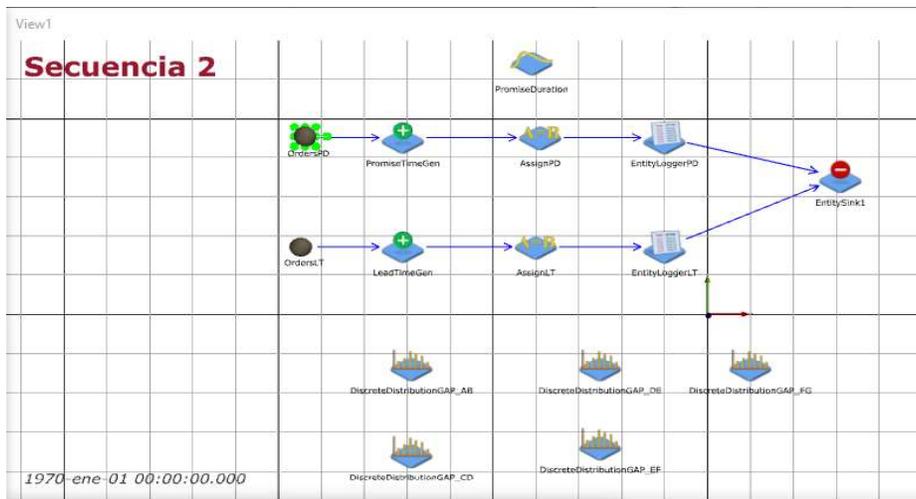


Figura 50: Modelo de la secuencia 2 implementado en JaamSim

La figura 2 muestra las entidades que constituyen el modelo implementado para las secuencias el cual se compone por las siguientes;

Tabla 20: Descripción de las entidades del modelo (Manual de JaamSim versión 2020-12)

Objeto	Descripción	
	<i>Sim Entity</i>	Es la entidad básica que fluye a través del modelo
	<i>Entity Generator</i>	Crea copias de las entidades que fluyen en el modelo a intervalos de tiempo específicos
	<i>Assign</i>	Este objeto puede asignar o modificar valores a los atributos
	<i>Entity Logger</i>	Es la entidad encargada de registrar y guardar los valores de salida y datos de estado de una entidad generada en un reporte de salida
	<i>Entity Sink</i>	Destruye las entidades entrantes
	<i>Discrete Distribution</i>	Genera muestras a partir de un conjunto de discreto de valores

El modelo simula la duración del proceso vs el tiempo promesa en el que se compromete cada una de las órdenes simuladas, por ello la estructura del modelo cuenta con dos entidades de cada objeto, por ejemplo, en “OrdersLT” se especifica las duraciones de cada actividad que comprende el proceso y “OrdersPD” representa las entradas para la simulación del tiempo promesa.

Si la empresa decidiera explorar diferentes escenarios y realizar cambios en la duración de las actividades o bien evaluar el desempeño del proceso ante cambios en las distribuciones de los tiempos de inactividad registrados, se podrían realizar mediante las siguientes modificaciones en el modelo.

Cambios en la duración de las actividades

Se selecciona el objeto “OrdersLT” y en el editor de entrada (*Input editor*) se selecciona “options” y se realizan los cambios en el renglón de “attributedefinitionlist” columna “value”, tal como se muestra en las siguientes figuras.

Keyword	Default	Value
AttributeDefinitionList	None	{DA 1 [d]} {GAP_AB 0 [d]} {DE 7 [d]} {GA
CustomOutputList	None	

Output	Value
Entity	
Name	OrdersLT
ObjectType	SimEntity
SimTime	0.00000 h
Parent	Simulation
DA	24.0 h

Figura 51: Modificaciones en la duración de las actividades

Al desplegar “value” se abrirá una ventana para realizar los cambios en la duración de las actividades, como se muestra a continuación.

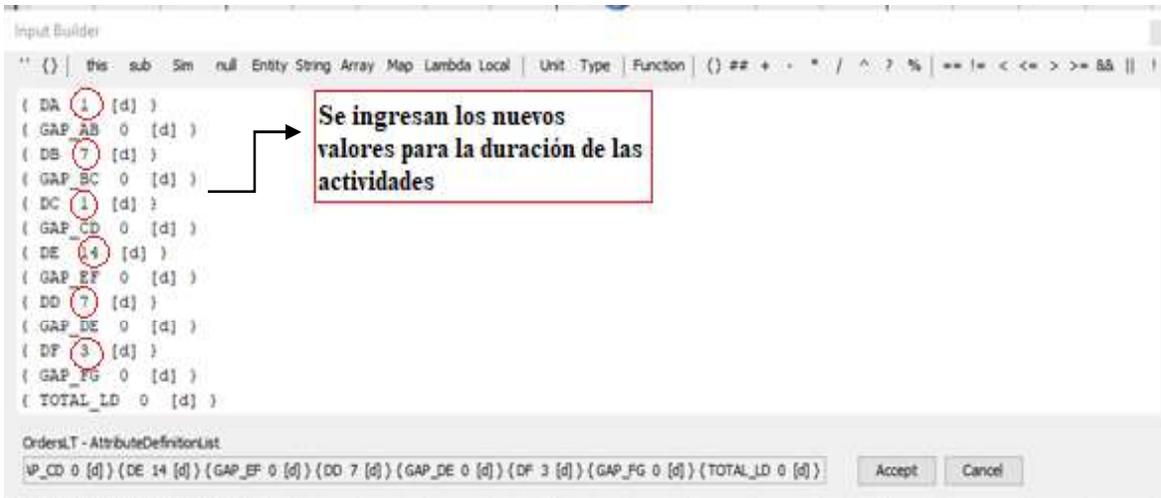


Figura 52: Ventana para realizar los cambios en la duración de las actividades

Para realizar cambios en el número de experimentos se selecciona “LeadtimeGenerator” y se realizan los cambios en la ventana de editor de entrada, en la sección de “Key inputs”.

Secuencia 2

Input Editor - LeadTimeGen

Keyword	Default	Value
Description	None	
NextComponent	None	AssignLT
FirstArrivalTime	0.0 h	
InterArrivalTime	2.7777777777...	
EntitiesPerArrival	1.0	500
PrototypeEntity	None	OrdersLT
BaseName	Generator Name	
MaxNumber	Infinity	500

Output Viewer - LeadTimeGen

Output	Value
Entity	
Name	LeadTimeGen
ObjectType	EntityGenerator
SimTime	0.00000 h
Parent	Simulation
DisplayEntity	
Position	-7.1 1.7 0.0 m
Size	1.0 1.0 1.0 m
Orientation	0.0 0.0 0.0 deg
Alignment	0.0 0.0 0.0

Figura 53: Ventana para realizar cambios en el número de órdenes a simular

Cambios en las distribuciones de los tiempos de inactividad

Cada modelo implementado cuenta con distribuciones para los tiempos de inactividad registrados para cada secuencia, para realizar cambios se debe seleccionar la distribución a modificar y en la sección de “Key inputs” ingresar los nuevos valores en el renglón “Value list” y registrar las probabilidades asignadas a cada valor en el renglón de “Probabilitylist”, tal como se muestra en la siguiente figura.

Secuencia 2

Keyword	Default	Value
Description	None	
UnitType	None	TimeUnit
RandomSeed	None	10
MinValue	-infinity h	
MaxValue	Infinity h	
ValueList	None	0 13 70 d
ProbabilityList	None	0.33 0.17 0.5

Output	Value
Entity	
Name	DiscreteDistributionGAP_AB
ObjectType	DiscreteDistribution
SimTime	0.00000 h
Parent	Simulation
DisplayEntity	
Position	-6.9 -1.3 0.0 m
Size	1.0 1.0 1.0 m
Orientation	
Alignment	

Se ingresan los nuevos valores observados

Se registran las probabilidades registradas para cada valor asignado

Figura 54: Ventana para realizar cambios en la distribución de los tiempos de inactividad

¿Cómo ejecutar el modelo de simulación?

Una vez realizados los cambios necesarios se guardan con la opción **FILE** y **SAVE**, posteriormente se procede a correr el modelo, para ello se presiona el botón **RUN** (*Space key*) que se encuentra en el panel de control.

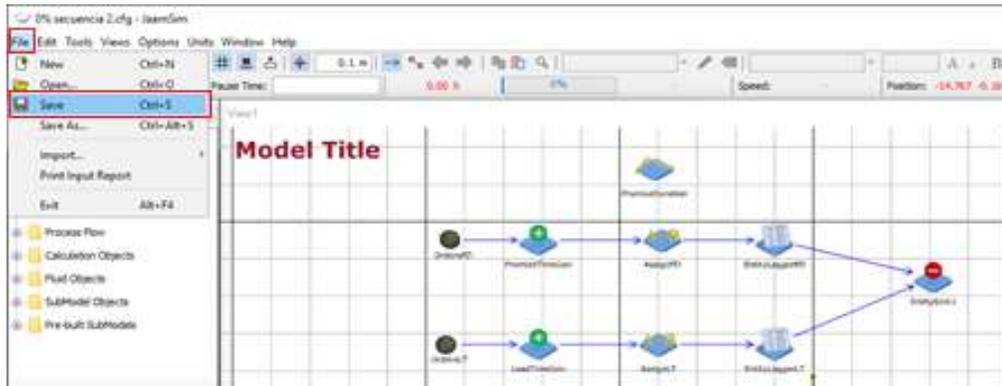


Figura 55: Ventana para guardar los cambios en el modelo

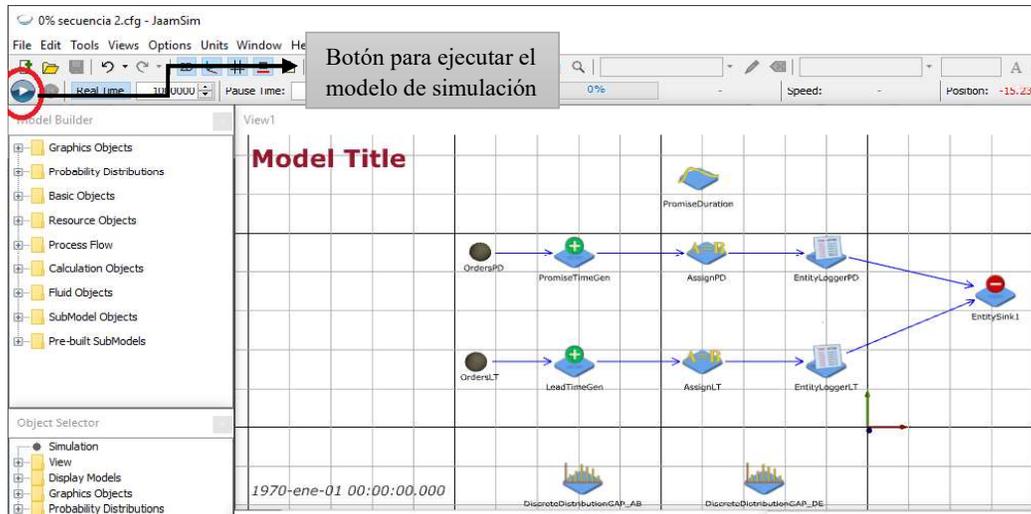


Figura 56: Botón para ejecutar el modelo de simulación

Visualización de los resultados

Al correr el modelo de simulación se genera de manera automática dos archivos en formato de documento de texto denominados *Secuencia 2- EntityLoggerLT* y *Secuencia 2- EntityLoggerPD*, el primero hace referencia a los resultados simulados para la ejecución del proceso completo (lead time) y el segundo archivo muestra los tiempos promesa simulados para cada lead time. Los archivos se guardan directamente en la carpeta donde se encuentra almacenado el modelo.

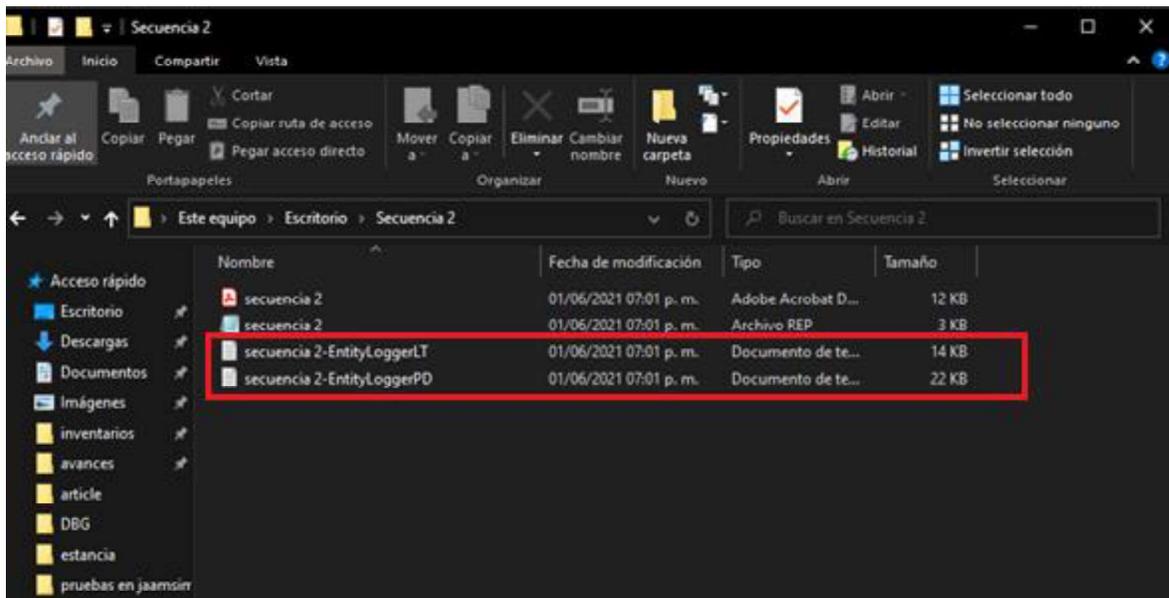


Figura 57: visualización de los archivos generados

```

secuencia 2-EntityLoggerLT: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Simulation freq 0.0 -
Simulation centres 0.0 -
Simulation temps 0.0 -
Simulation Software Name JaamSim -
Simulation Software Version 2020-12 -
Simulation Configuration File C:\Users\LENOVO\Desktop\Secuencia 2\secuenc
Simulation RunNumber 1.0 -
Simulation RunIndex { 1 } -
Simulation Present Time and Date jun 01, 2021 19:01 -
Simulation Initialization Duration 0.0 h
Simulation Run Duration 24.0 h
Simulation Present Simulation Time 0.0 h

this.SimTime/1[h] this.obj [AssignLT].obj.TOTAL_LD/1[d]
0.0 LeadTimeGen_1 66.0
0.0 LeadTimeGen_2 38.0
0.0 LeadTimeGen_3 119.0
0.0 LeadTimeGen_4 328.0
0.0 LeadTimeGen_5 118.0
0.0 LeadTimeGen_6 143.0
0.0 LeadTimeGen_7 114.0
0.0 LeadTimeGen_8 104.0
0.0 LeadTimeGen_9 110.0
0.0 LeadTimeGen_10 105.0
0.0 LeadTimeGen_11 298.0
0.0 LeadTimeGen_12 129.0
0.0 LeadTimeGen_13 141.0
0.0 LeadTimeGen_14 104.0
0.0 LeadTimeGen_15 143.0
0.0 LeadTimeGen_16 74.0
0.0 LeadTimeGen_17 104.0
0.0 LeadTimeGen_18 231.0
0.0 LeadTimeGen_19 62.0
0.0 LeadTimeGen_20 118.0

```

Columna del tiempo de proceso simulado (lead time en días)

Figura 58: Visualización de los resultados simulados para el lead time

```

EntityLoggerPD: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Simulation freq 0.0 -
Simulation centres 0.0 -
Simulation temps 0.0 -
Simulation Software Name JaamSim -
Simulation Software Version 2020-12 -
Simulation Configuration File C:\Users\LENOVO\Desktop\Secuencia 2\s
Simulation RunNumber 1.0 -
Simulation RunIndex { 1 } -
Simulation Present Time and Date jun 01, 2021 19:01 -
Simulation Initialization Duration 0.0 h
Simulation Run Duration 24.0 h
Simulation Present Simulation Time 0.0 h

this.SimTime/1[h] this.obj [AssignPD].obj.Tiempo/1[d]
0.0 PromiseTimeGen_1 190.95277367879976
0.0 PromiseTimeGen_2 148.32765157565584
0.0 PromiseTimeGen_3 92.38912190113263
0.0 PromiseTimeGen_4 128.64921819211483
0.0 PromiseTimeGen_5 192.17096492497328
0.0 PromiseTimeGen_6 120.67372968000758
0.0 PromiseTimeGen_7 123.90522415754566
0.0 PromiseTimeGen_8 97.90525737869267
0.0 PromiseTimeGen_9 97.04266139056273
0.0 PromiseTimeGen_10 153.9481883454755
0.0 PromiseTimeGen_11 263.3677127918598
0.0 PromiseTimeGen_12 175.2229030807286
0.0 PromiseTimeGen_13 98.00811027030609
0.0 PromiseTimeGen_14 254.12845340761507
0.0 PromiseTimeGen_15 167.96060994382867
0.0 PromiseTimeGen_16 119.6605891194991
0.0 PromiseTimeGen_17 169.2046675459071
0.0 PromiseTimeGen_18 157.16649680116123
0.0 PromiseTimeGen_19 141.95375870678717
0.0 PromiseTimeGen_20 127.50475342375576
0.0 PromiseTimeGen_21 176.76713329952148

```

Columna del tiempo
promesa simulado
(días)

Figura 59: Visualización de los resultados simulados para el tiempo promesa

Los resultados se pueden extraer y copiar en una hoja de cálculo de Excel para realizar el respectivo análisis del nivel de servicio de cada secuencia identificada (órdenes que se completan dentro del tiempo comprometido).