

**CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN  
MATERIALES**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS JUSTO EN  
SECUENCIA**

**POR**

**LIC. JOSÉ LUIS DE LA RIVA CANIZALES**

**TESIS**

**MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD EN  
INGENIERIA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA**

**SALTILLO, COAHUILA.**

**Enero del 2013**

**ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS JUSTO EN  
SECUENCIA**

*Por*

*LIC. JOSÉ LUIS DE LA RIVA CANIZALES*

*Tesis*

***Presentada al programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología***

***Sede***

***Corporación Mexicana de Investigación en Materiales***

*Como requisito parcial para obtener el Grado Académico de*

*Maestría en Ciencia y Tecnología*  
***Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura***

***Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología COMIMSA/CONACYT***

*Saltillo, Coahuila a Enero de 2013*

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A de C.V**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “**ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS JUSTO EN SECUENCIA**”, realizada por el alumno **JOSÉ LUIS DE LA RIVA CANIZALES** matrícula **1006IM3063** sea aceptada para su defensa como Maestro en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura.

El Comité Tutorial

---

Tutor Académico  
Director de Tesis  
**Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos**

---

Tutor en Planta  
**M.C. Darío Morones Ruelas**

---

Co-tutor Académico  
**Dr. David Salvador González**  
**González**

---

Vo. Bo  
**Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés**  
Coordinación General de Estudios de Posgrado  
COMIMSA

**Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S.A de C.V**  
**Gerencia de Desarrollo Humano**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **JOSÉ LUIS DE LA RIVA CANIZALES**, una vez leída y revisada la tesis titulada “**ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS JUSTO EN SECUENCIA**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 18 del mes de enero del año 2013.

---

**Dra. Kristel K. Castillo Villar**  
Presidente

---

**Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez**  
Secretario

---

**Dr. Rolando Javier Praga Alejo**  
Vocal

---

**Dr. Elías Gabriel Carrum Siller**  
Vocal

---

**Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos**  
Vocal

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi hermosa Viry, ella es mi novia, mi amiga, mi motivo, mi todo. Verla cada día hace la diferencia. Agradezco también a mis padres y hermanos; porque con su apoyo, con su compañía y con su existencia, soy una mejor persona cada día. Así que no tienen de otra más que acompañarme en esta aventura llamada “vida”.

Agradezco al Dr. Miguel Gastón Cedillo C., quien además de encabezar el comité tutorial y ser el director de esta tesis, ha sido el principal promotor de mi desarrollo profesional-académico. De igual forma, agradezco al Dr. David Salvador González G. y al M.C. Darío Morones Ruelas por su apoyo y asesoría en el desarrollo del proyecto de investigación.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales S.A. (COMIMSA), quienes brindaron los apoyos económicos y de infraestructura para llevar a cabo las actividades del posgrado. Asimismo a su personal quienes facilitaron los procesos de dichas actividades.

Agradezco a amigos y compañeros, porque son más importantes para mí de lo que ellos se imaginan.

De corazón, muchísimas gracias.

José Luis De La Riva Canizales.

## **Resumen Biográfico del Autor**

**José Luis de la Riva Canizales**, nació en Saltillo, Coahuila el 05 del mes de abril de 1988. Es el segundo hijo de José Luis de la Riva Robles y Blanca Estela Canizales Jacobo. Actualmente es candidato a obtener el grado de Maestro en Ciencia y Tecnología con especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura. Graduado con mención honorífica de la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas en 2010 en la carrera de Licenciatura en Matemáticas Aplicadas. Además de ser galardonado por su alma-máter, la Universidad Autónoma de Coahuila con la presea “Ocelotl” en el rubro de Liderazgo en el año 2009.

Durante su desarrollo académico ha participado como ponente en los principales congresos, seminarios y foros de las áreas de Matemáticas, Estadísticas y de Ingeniería. Algunos de estos congresos son: el Congreso Nacional de Matemáticas (SSM), el Foro Nacional de Estadística (AMESTAD), el World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering (SISE), el Annual Meeting of Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), entre otros. Asimismo ha participado en proyectos industriales, a nivel nacional en la empresa CEVA Logistics de Ramos Arizpe, Coahuila, y a nivel internacional en la empresa Bashas’ en Phoenix, Arizona, EE. UU.

Sus conocimientos y aptitudes se enfocan en el análisis y mejora de operaciones industriales, específicamente para las tareas de aseguramiento de la calidad y de la gestión de procesos logísticos.

## Resumen

El proceso de suministro directo a la línea de ensamble de componentes, sub-ensambles y sistemas ha sido y continúa siendo uno de los grandes retos logísticos de industrias altamente competitivas como la automotriz, la aeroespacial y la electrónica. La dificultad deriva del interés de las empresas por sincronizar efectivamente la entrega de los suministros con el programa de producción.

Durante las pasadas décadas, las políticas “lean” y justo a tiempo han buscado reducir los niveles de inventario a lo largo de la cadena de suministro, sin embargo, el inventario, como amortiguador de las variaciones en el proceso de producción, aún mantiene su gran relevancia ante las cada vez más frecuentes interrupciones de la cadena de suministro. Actualmente los sistemas de producción deben administrar una gran variedad de componentes que permitan la “personalización de masa” de los productos ofertados al consumidor final y al mismo tiempo, mantener operaciones rentables en un mercado al que continuamente ingresan nuevos competidores de bajo costo. Ante este contexto, los procesos de suministro justo a tiempo (JIT) comienzan a mostrar sus limitaciones dando lugar a nuevos enfoques tales como el Justo en Secuencia (JIS). El JIS se caracteriza por sincronizar los procesos de las empresas formando parte de una cadena de suministro con el objetivo, no solo de garantizar el suministro del material en la cantidad, el lugar y el momento acordados, sino también, en el orden y volumen de entrega correcta.

Si bien hasta hoy las implementaciones llevadas a cabo arrojan resultados positivos, ya que han mejorado sustancialmente la reactividad de la cadena de suministro, así como su rentabilidad, se debe reconocer que los sistemas JIS son más sensibles ante la variabilidad o falla en las entregas. Considerando sus ventajas, pero también sus límites ante fallas o interrupciones en el secuenciado, la presente investigación se inició como resultado de la detección de una importante laguna de información en el área, lo que determinó que el análisis de confiabilidad de los sistemas JIS era indispensable. La efectiva asignación de los recursos operativos al proceso de

secuenciado, es una tarea clave para alcanzar la sincronización de la cadena de suministro y dado que se trata de un sistema en evolución dinámica, se buscó realizar el análisis de confiabilidad de las variables clave desde una perspectiva sistémica y dinámica. Entre las variables operativas clave que la presente investigación identificó, se tienen las relacionadas con el transporte, la tecnología de información, las instalaciones y el personal.

Con el fin de medir la sincronización del proceso de suministro, se detectó que el binomio tiempo-costo ofrece una buena representación del nivel de sincronía que existe entre las exigencias del ensamblador y su proceso de producción, y las del proveedor y su capacidad de respuesta. De este modo, el factor de Confiabilidad, midió el nivel de garantía de no-disrupción en la sincronía del proceso. Así, con el propósito de establecer una solución al reto del análisis de la confiabilidad, este proyecto de investigación se centró en el desarrollo de un modelo dinámico del sistema de abastecimiento Justo en Secuencia tomando como base el caso de una empresa líder a nivel mundial en la prestación de servicios logísticos a la industria automotriz. Dada la alta estandarización de los procesos en empresas de ensamble, los resultados de la presente investigación son generalizables a otras industrias dentro del mismo sector, como la aeroespacial y la electrónica principalmente.

Específicamente, el modelo considera las interacciones entre variables como: i) tamaño de flotilla; ii) demanda de viajes de abastecimiento; iii) confiabilidad; iv) costo de implementación del JIS; y v) tiempo de retardo. Las decisiones sobre el tamaño de flotilla se basan en la combinación de los tres criterios: a) confiabilidad; b) costo; y c) tiempo. Para el desarrollo del modelo dinámico, se hizo uso de la metodología de Dinámica de Sistemas, en la que en su fase de definición del modelo cuantitativo se incorporó los resultados del análisis de confiabilidad empleando la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad. Entre los resultados obtenidos están principalmente dos: 1) definición de la estrategia de solución a la problemática general del abastecimiento JIS, la cual considera un análisis confiabilidad-costo para la fase de medición del



proceso; y 2) La formulación del modelo dinámico como herramienta de control y toma de decisiones.

A partir del impacto de estos resultados sobre el caso de estudio se estableció dos importantes conclusiones: i) con la evaluación del desempeño del sistema de abastecimiento JIS de la empresa 4PL respecto a los indicadores de confiabilidad, tiempo y costos, se midió que la empresa mantuvo una probabilidad del 16% de con el parque vehicular de 25 unidades podía cubrir la totalidad de los viajes requeridos hacia GM de un periodo de 80 minutos. Asimismo, tuvo una ganancia promedio de \$38,800 MXN diarios y un alto nivel de servicio hacia su cliente GM, considerando que en ninguna ocasiones el retardo en la entrega de autopartes afectó directamente sobre algún paro a la línea de ensamble de GM. Y ii) se evaluaron diversas políticas de gestión respecto a la interacción de criterios para la toma de decisión sobre el tamaño de flotilla a contratar, de lo que resultó que la política de considerar los tres criterios de decisión *Confiabilidad, Tiempo de retardo y Ganancia*, es la que mejores consecuencias respecto a estos tres mismos factores tendría para la empresa, principalmente en el aumento a un 29% de probabilidad de éxito en la no-disrupción de su proceso de suministro.

# Índice

<b>Lista de figura</b> .....	<b>1</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
1.1. Introducción .....	5
1.2. Problemática .....	8
1.2.1 Descripción del problema .....	8
1.2.2 Preguntas de investigación .....	10
1.2.3 Hipótesis general .....	11
1.2.4 Objetivos .....	12
1.2.5 Justificación .....	13
1.2.6 Delimitaciones .....	13
1.3. Enfoque de investigación y metodología .....	14
1.4. Contribuciones y límites de la investigación .....	15
1.5. Estructura de tesis .....	16
<b>Capítulo 2. ANTECEDENTES</b> .....	<b>17</b>
2.1 Introducción .....	18
2.2 Justo en Secuencia .....	19
2.3 Sistema de entregas .....	24
2.4 Gestión del sistema Justo en Secuencia .....	27
2.5 Conclusiones .....	32

<b>Capítulo 3. METODOLOGÍA</b>	<b>34</b>
3.1 Introducción	35
3.2 Análisis de Confiabilidad	36
3.2.1 Análisis Multivariado de Confiabilidad	39
3.3 Análisis de Costos Logístico	42
3.3.1 Función de Costos Logísticos	43
3.4 Dinámica de Sistemas	46
3.4.1 Articulación del problema	48
3.4.2 Definición de hipótesis dinámica	50
3.4.3 Modelo de simulación	52
3.4.4 Pruebas de validación	53
3.4.4.1 Verificación estructural	54
3.4.4.2 Validación del comportamiento	55
3.4.4.3 Evaluación de políticas de gestión	55
3.4.5 Diseño y evaluación de políticas de gestión	56
3.5 Conclusiones	57
 <b>Capítulo 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS</b>	 <b>59</b>
4.1 Introducción	60
4.2 Caso CEVA Logistics	60
4.3 Hipótesis dinámica	68
4.4 Modelo de simulación	73
4.4.1 Evaluación de confiabilidad	75
4.4.2 Ecuación del modelo dinámico	82

4.5 Validación del modelo .....	92
4.5.1 Consistencia dimensional .....	92
4.5.2 Reproducción del comportamiento .....	94
4.5.3 Condiciones extremas .....	96
4.5.4 Análisis de sensibilidad .....	97
4.6 Diseño y evaluación de políticas de gestión .....	99
4.7 Conclusiones .....	104
<b>Capítulo 5. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>106</b>
5.1 Introducción .....	107
5.2 Conclusiones .....	107
5.3 Medios de transferencia .....	113
5.4 Investigación futura .....	114
<b>Bibliografía .....</b>	<b>116</b>
<b>Anexo A. Interface gráfica: Modelo de gestión .....</b>	<b>124</b>
<b>Anexo B. Aplicaciones en MatLab para el análisis de confiabilidad multivariada ....</b>	<b>128</b>

## Lista de figuras

1.1 Operación JIS de la CS: caso automotriz (Fuente: Meissner, 2010) .....	9
1.2 Investigación abductiva, (Morones, 2011) .....	14
1.3 Diagrama de metodología del proyecto de investigación. ....	15
3.1 Segmentación de costos JIS, (Wagner & Silveira, 2011) .....	43
3.2 Patrones de comportamiento en Dinámica de Sistemas, (Sterman, 2000) .....	49
3.3 Elementos del diagrama causal: variables y flechas .....	50
3.4 Tipos de bucles .....	51
3.5 a) Diagrama de Forrester, b) Notación de diagramas de Forrester .....	52
4.1 Tiempo vs tamaño de flotilla .....	65
4.2 Demanda de viajes vs flotilla de vehículos .....	65
4.3 a) Variables de desempeño vs flotilla, b) Tiempo vs variables de desempeño. c) Tiempo vs desempeño actual .....	66
4.4 Diagrama causal del proceso de suministro CEVA Logistics .....	68
4.5 Bucle B1 .....	69
4.6 Bucle B2 .....	70
4.7 Bucle B3 .....	71
4.8 Bucle B4 .....	72
4.9 Criterios de decisión .....	73
4.10 Relación dependiente entre $v$ y $t$ .....	77
4.11 Ajuste probabilístico a la PDF condicional .....	78
4.12 $\mu$ vs $v$ .....	79
4.13. $\sigma$ vs $v$ .....	80
4.14 Validación gráfica de la PDF bivariada .....	81

4.15 Diagrama de Forrester sobre el bucle B1 .....	83
4.16 Diagrama de Forrester sobre el bucle B2 .....	87
4.17 Diagrama de Forrester sobre el bucle B4 .....	89
4.18 Índices de desempeño del modelo de simulación .....	95
4.19 Comportamiento de <i>Tamaño de flotilla</i> en el modelo de simulación .....	96
4.20 Tamaño de flotilla ante baja demanda de viajes .....	97
4.21 Conducta extrema de confiabilidad requerida .....	97
4.22 Sensibilidad de tamaño de flotilla respecto a confiabilidad requerida .....	98
4.23 Sensibilidad de tamaño de flotilla respecto a ganancia esperada .....	99
4.24 Conducta de políticas de gestión .....	101
4.25 Índices de desempeño bajo políticas de gestión .....	103
5.1 Interface gráfica: Modelo de gestión .....	113

## Lista de tablas

4.1 Clasificación de variables .....	74
4.2 Pruebas de ajuste para $v=20$ y $v=25$ .....	78
4.3 Relación: demanda de viajes vs tiempo demandado .....	85
4.4 Consistencia dimensional .....	93
4.5 Resultados de índices de desempeño bajo políticas de gestión 1031.1 Cadena de suministro JIS (Fuente: Meissner, 2010) .....	21

# Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN



## 1.1. Introducción

El actual ambiente competitivo en industrias de ensamble como el automotriz, está obligando a las empresas a mantener una producción cada vez más rápida, más barata, y esencialmente más estandarizada. En consecuencia, las empresas están siendo obligadas a ofrecer una más grande variedad de diferentes productos (personalización de masa) y mayor valor agregado al consumidor final, a precios cada vez más reducidos. Un ejemplo es el caso de GMC (General Motors Company) que ofrece más de 36 millones de combinaciones de autopartes para el ensamble de su automóvil Corsa, mientras que Ford emplea para su modelo Focus, alrededor de 367 millones de combinaciones. En el mercado Europeo, Volkswagen ofrece cerca de 2 mil millones de combinaciones para su modelo Golf, mientras que por su parte, en el mercado Japonés, Toyota emplea más de 160 mil combinaciones de piezas para el ensamble del Corolla, (Pil y Holweg, 2004; Wagner y Silveira, 2010b). El manejo de tales cantidades de combinaciones y la necesidad de reducción del tiempo de producción, hace cada vez más compleja la gestión logística. Sincronizar los procesos de abastecimiento, producción y distribución, bajo la configuración de las variables involucradas en la satisfacción de los requerimientos económicos y de servicio; se vuelve una tarea complicada. Este fenómeno no es exclusivo de la industria automotriz, otros sectores industriales como el electrónico, el aeroespacial y el de equipo agrícola experimentan este mismo problema (Wagner y Silveira, 2010). En general, se trata de un fenómeno que se presenta en empresas ensambladoras con altos volúmenes de producción, oferta de productos altamente personalizados y que por lo tanto, administran una gran variedad de componentes.

En la presente investigación, se determina que la gestión de las operaciones en la cadena de suministro considera el manejo de los recursos humanos, financieros y de materiales propios y ajenos de la empresa, esencialmente en los procesos de producción y de abastecimiento. De este modo, el reto para el tomador de decisiones es la correcta administración de los recursos considerando que la estrategia de la

cadena de suministro debe ser congruente con la estrategia competitiva de la empresa. Es decir, que las operaciones en la cadena de suministro propicien el equilibrio entre la capacidad de respuesta y la eficiencia que mejor satisfagan las necesidades de la empresa y sus clientes, (Chopra y Meindl, 2008). Sin embargo, la gestión de operaciones se hace compleja en función de los recursos que deben ser manejados.

En este sentido, existen metodologías tales como Lean Manufacturing, Calidad Total, Benchmarking, Balanced Scorecard, Just-in-Time, entre otras (Arellano, 2004), que se basan en fomentar: 1) la asociación entre las empresas de una cadena de suministro; 2) la reducción de desperdicios; y 3) el desempeño por estándares de operación. Éstas, básicamente se aplican en sistemas donde se desea cumplir con una demanda estable y de alto valor, para ello se establecen: i) pocos proveedores; ii) asociaciones de largo plazo; iii) sistemas de información estandarizados; y iv) garantía de altos niveles de calidad (Thun et al., 2007).

Hoy en día, tales modelos resultan limitados debido a los crecientes requerimientos de la demanda final, lo que resulta en un mayor riesgo de interrupciones en la producción, ya sea por fallas del proveedor, del transporte o de calidad. Un factor principal de dicho riesgo es la complejidad del manejo de una gran cantidad de productos en inventario (Wagner y Silveira, 2010; Cedillo-Campos, 2012). Según Santos et al. (2006), Justo a Tiempo (o JIT, por sus siglas en inglés, Just-in-Time) tiene el potencial para mitigar los riesgos de interrupción, pero éste decrece al intentar coordinar procesos que involucran la manufactura de productos con muchas variantes. Particularmente, JIT busca minimizar los desperdicios en tiempo, espacio, capital y de labor humano; realizando una producción esbelta y flexible a través de la reducción de trabajo en progreso, de espacios, de tiempos de espera y de complejidad logística (Thun et al., 2007).

De este modo, a partir de las ventajas que presenta Justo a Tiempo y con el objetivo de superar las desventajas del mismo, se ha desarrollado un concepto alternativo de gestión de operaciones conocido como Justo en Secuencia (JIS, por

siglas en inglés, *Jus-in-Sequence*). Los primeros casos de éxito del JIS son los de Toyota y Daimler en los años 80's y 90's. Actualmente, JIS tiene gran auge en diversos sectores industriales como el automotriz, el electrónico y el textil. En 1996 sólo el 5% de las partes de un automóvil eran entregas JIS mientras que para 2007 este porcentaje estaba cerca del 40%, (Wagner y Silveira, 2010). Conceptualmente se considera al JIS como un refinamiento de JIT. Esto es debido a que además de responder a la entrega de mercancías en el momento, lugar, cantidad y calidad correctos, también mejora la reactividad de la cadena de suministro al cumplir con entregas en la secuencia correcta (Werner, 2003). Con ello, las empresas manufactureras que implementan JIS eliminan la fase de almacenamiento previo de componentes, al entregarlos directamente en los puntos de uso en la línea de producción. Esto implica que el proveedor logístico se encargue de realizar la entrega en los puntos de uso de las piezas, listas para ser ensambladas en la secuencia de producción requerida. Esta acción es conocida como **proceso de secuenciado**, la cual permite mitigar la complejidad logística que debe ser manejada por la empresa manufacturera debido a la manipulación de un gran número de variantes en los componentes. En realidad, no es que se elimine dicha complejidad, sino que está es transferida a al proveedor logístico.

Si bien el JIS conlleva importantes ventajas económicas y de servicio al cliente, la complejidad logística que absorbe favorece el incremento de disrupciones, por factores tales como piezas defectuosas, retrasos de entregas y mal secuenciado (Thun et al., 2007). En este sentido, un factor crítico para el éxito del JIS, es la capacidad de respuesta del proveedor logístico para realizar el suministro de mercancías ante los requerimientos del manufacturero y las fluctuaciones estocásticas de la demanda, sin comprometer la confiabilidad de las entregas y la eficiencia del proceso, (Meissner, 2010).

De manera particular, este trabajo buscó establecer una herramienta para la toma de decisiones sobre la configuración de los recursos operativos de una empresa

terciaria, encargada del abastecimiento secuenciado a una empresa manufacturera. Esto en función de direccionar su operación hacia niveles de desempeño que permitan el equilibrio entre su capacidad de respuesta y la eficiencia operativa deseado por la empresa. La aportación de esta investigación radica, además de proveer de una solución concreta a una problemática particular real (descrita a detalle más adelante), en exponer un enfoque estratégico innovador para el análisis y mejora de la gestión de las operaciones JIS.

## **1.2. Problemática**

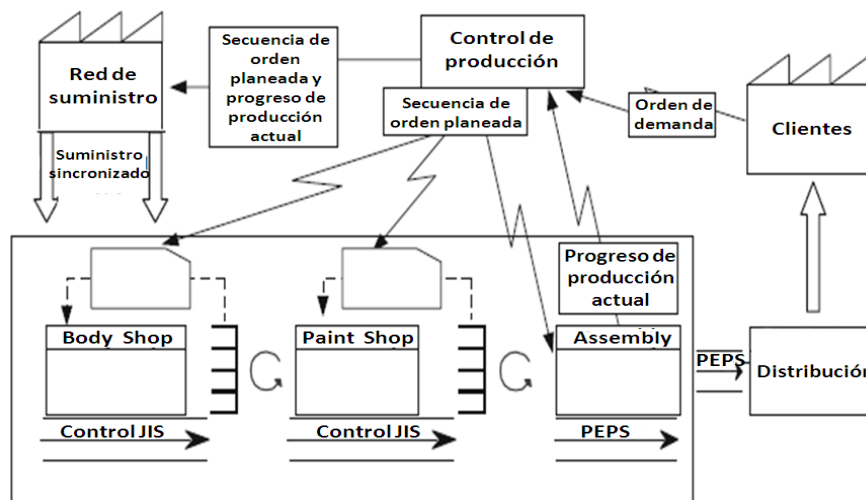
Las penalizaciones por incumplimiento en las entregas directas a la línea de ensamble en la industria automotriz tienen un elevado costo para los miembros de la cadena de suministro que generan un paro en las operaciones. Las penalizaciones debido a interrupciones en el proceso de secuenciado pueden alcanzar hasta los \$5,000 dólares por minuto de paro, (Morones, 2011a). De ahí la importancia de la gestión efectiva de los recursos que permitan mitigar el riesgo de fallas en el secuenciado. En este sentido, a continuación se expone el entorno de la problemática particular que motivo el desarrollo de esta investigación. Asimismo, se muestra los aspectos que la caracterizan, entre ellos, las preguntas de investigación, las hipótesis de investigación, los objetivos y sus delimitaciones.

### **1.2.1. Descripción del problema**

Este proyecto de investigación tuvo como origen, el análisis de las operaciones de la empresa CEVA Logistics, la cual es parte de uno de los clústeres automotrices más importantes del país, el ubicado en el municipio de Ramos Arizpe, Coahuila, México. CEVA Logistics es una empresa que tiene amplia participación en diferentes industrias que van desde la automotriz, electrónica, alta tecnología, industrial, gran consumo,

hasta la editorial. Esta planta en particular, tiene como función el abastecimiento secuenciado de mercancías a la empresa de ensamble terminal General Motors (GM), ubicada dentro del mismo clúster industrial. La cadena de suministro en la que participa CEVA Logistics, responde a la descripción general presentada en la Figura 1.1, donde se observa un proceso cíclico en el cual participan la planta manufacturera, los proveedores y los clientes. Esta cadena de suministro se diferencia del patrón común por las funciones del proveedor, en este caso CEVA Logistics, quien hace la entrega de las autopartes de manera secuenciada y directamente en los puntos de uso de cada mercancía, con base en la programación secuenciada de la producción definida por el ensamblador. De ahí se realiza la producción según el proceso secuenciado dentro de la planta (Body shop, Paint shop y Assembly). Finalmente, se lleva a cabo la distribución del producto final hacia los puntos de venta o almacén de los clientes.

Básicamente CEVA Logistics sincroniza sus operaciones con las de su único cliente, GM, destacando que únicamente realiza el abastecimiento para el área de vestiduras. Dicha operación de CEVA sigue el sistema de trabajo build-to-order, (BTO), realizando el abastecimiento solo cuando hay un pedido formal por parte de GM.



**Figura 1.1.** Operación JIS de la CS: caso automotriz.

La decisión de cuando enviar está básicamente en función del nivel de inventario de seguridad y el tiempo de respuesta que tiene CEVA para cada tipo de autoparte. Esta decisión es compleja ante el creciente número de las diferentes piezas con diversas variantes y su combinación durante el proceso de producción de vehículos, lo cual se ve reflejado al momento de realizar la programación y ejecución de los envíos. Sujeto a que CEVA realiza una óptima programación de las cargas en los envíos, la ejecución del proceso del abastecimiento secuenciado debe cumplir con los requerimientos de la demanda de autopartes respecto a fechas compromiso y cortos plazos de entrega. Si este supuesto es cumplido, CEVA aumenta sus ganancias económicas y de servicio al cliente, como resultado de evitar interrupciones o paros de la línea de ensamble de GM. Para ello, la adecuada asignación de los recursos operativos es fundamental. Entre algunos de estos factores se consideran para el análisis están, el tamaño de la flota de vehículos de carga, el personal asignado a cada tarea, el tiempo de operación exigido por la demanda y la cantidad de mercancías a enviar en cada periodo. Si bien, la configuración actual de los factores operativos en CEVA Logistics logra el funcionamiento demandado, el equipo de tomadores de decisión desconocía si esa configuración era la correcta para el óptimo rendimiento respecto a las metas definidas.

En consecuencia, con el propósito de mitigar esta problemática este proyecto de investigación tuvo la finalidad de establecer la configuración de las variables operativas a fin a establecer el desempeño deseado de la operación del abastecimiento JIS de CEVA Logistics.

### **1.2.2. Preguntas de Investigación**

Con base en el propósito de evaluar y modelar el abastecimiento JIS, se establecieron las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles son las características de un proceso JIS?
- ¿Cuáles son las actividades que describen un proceso de abastecimiento de mercancías bajo la práctica JIS?
- ¿Cuáles son las fallas o incidentes que afectan la operatividad del sistema de abastecimiento del caso de estudio?
- ¿Cuáles son factores de desempeño para la evaluación de un sistema de entrega de mercancías?
- ¿Qué representa un análisis de confiabilidad sobre el desempeño de un sistema JIS?
- ¿Qué unidades observables determinan los índices de confiabilidad de un sistema de entregas JIS?
- ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de un análisis dinámico sobre el comportamiento de un sistema de abastecimiento JIS?
- ¿Cuál es el efecto de asociar el nivel de confiabilidad de un sistema con el de costos logísticos en la práctica JIS?
- ¿Qué áreas de oportunidad existen en el flujo de valor del proceso de abastecimiento JIS del caso de estudio?

### 1.2.3. Hipótesis General

La hipótesis principal y las hipótesis secundarias expuestas a continuación permitieron establecer la línea de estudio para el proyecto:

**H1:** Si se realiza el análisis dinámico del desempeño de un sistema JIS incorporando indicadores de confiabilidad en su evaluación, entonces, será posible identificar áreas de oportunidad para la mejora y establecer políticas operativas que mejoren el desempeño logístico del sistema de suministro, aumentando el rendimiento económico de la cadena de suministro.

**H1a:** Si se implementa un enfoque dinámico para la evaluación de confiabilidad, entonces, se será posible medir pertinentemente el comportamiento de la variabilidad del sistema JIS, como elemento de soporte para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones para el abastecimiento.

**H1b:** Si se incorpora el índice de confiabilidad como variable en las funciones de costos de un proceso JIS, entonces el índice de costos logísticos del sistema permitirá una predicción robusta de su valor.

#### **1.2.4. Objetivos**

Tras establecer la problemática y las fases del proyecto para solucionarla, como objetivo general del proyecto de investigación se definió el siguiente:

*Desarrollar un análisis dinámico para evaluar el desempeño de un sistema Justo en Secuencia, en su etapa de abastecimiento de mercancías, incorporando índices de confiabilidad y costos logísticos.*

Mientras, como objetivos particulares del mismo, se tuvieron:

1. Detectar las variables y características del proceso de abastecimiento de mercancía dentro de un sistema JIS
2. Adaptar el factor de confiabilidad en la evaluación de costos logísticos del sistema, a través de los costos de un sistema Justo en Secuencia.
3. Realizar la modelación con un enfoque dinámico de los factores que determinan el desempeño del sistema de abastecimiento.
4. Establecer una metodología integral de modelación del sistema de entrega de mercancías que contemple las fases de modelación dinámica y evaluación de índices de confiabilidad y vulnerabilidad.



5. Adaptar la metodología y modelación a un ejecutable para la facilidad del rediseño dinámico.

#### **1.2.5. Justificación**

La gestión de recursos orientada a un desempeño deseado en una operación tan compleja como JIS, es una problemática que se replica en diversas industrias caracterizadas por una alta competitividad y una alta variación de la demanda. Estas y otras características requieren una herramienta que apoye a los tomadores de decisión en alcanzar el desempeño requerido, al tiempo que permita mayor reactividad ante una demanda cada vez más estocástica y facilitando la pro-actividad de la cadena de suministro ante fallas o interrupciones. Este contexto nos impulsó a considerar para el análisis, un entorno dinámico y multivariado en la formulación del análisis y posterior propuesta de solución.

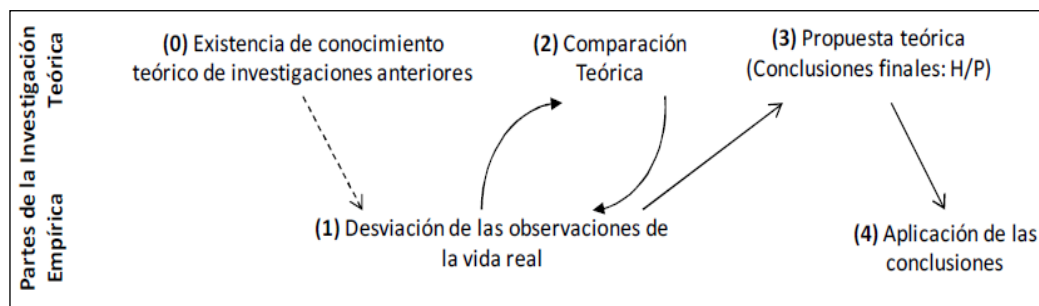
#### **1.2.6. Delimitaciones**

En primer lugar, este proyecto busca realizar una aportación a los métodos de análisis del desempeño de operaciones en entornos Justo en Secuencia, por lo que se descartó la revisión a detalle de otras estrategias de ingeniería para la gestión de procesos. Es importante aclarar que el objetivo de base no fue comparar las estrategias Justo a Tiempo y Justo en Secuencia, lo que por lo tanto quedó fuera del análisis. En segundo lugar, este proyecto solo se centra en la operación del suministro de mercancías, en la relación entre un proveedor y un cliente. La complejidad del análisis desarrollado exigía un ambiente que permitiera el total control de las variables operativas. En tercer lugar, con respecto al producto resultante del proyecto, es decir, que al establecer la configuración de las variables de desempeño no se contempló llevar a cabo la optimización de la operación. Solo consideró evaluar diferentes

configuraciones en distintos escenarios simulados. Si bien, la idea general del análisis de la operación JIS mediante un enfoque dinámico integrando el análisis de confiabilidad y de costos logísticos, para mejorar su gestión, es uno de los aportes más importantes, las técnicas empleadas para ello son seleccionadas con base en las necesidades de la operación.

### 1.3. Enfoque de Investigación y Metodología

Basado en la perspectiva de una investigación abductiva (Figura 1.2), la presente investigación tiene su origen en el conocimiento práctico obtenido del funcionamiento del sistema JIS de la empresa CEVA Logistics. Lo que posteriormente fue enriquecido con una amplia revisión de la literatura y que finalmente, al obtener resultados de nuestro análisis, fue contrastado con la operación real de la empresa.



**Figura 1.2** Investigación abductiva, (Cedillo y Sánchez, 2008).

De este modo, tras identificar la problemática a resolver y la revisión de estrategias y técnicas de solución, se estableció la dirección de esta investigación. Para ello, tanto la metodología de investigación, como el plan de trabajo para el desarrollo del proyecto, estuvieron compuestos de las etapas que se muestran en la Figura 1.3.



Figura 1.3 Diagrama de metodología del proyecto de investigación.

#### 1.4. Contribuciones y límites de la investigación

Considerando el objetivo de establecer una metodología práctica para analizar el desempeño de la gestión de un sistema JIS, la presente investigación se planteó tres tipos de contribuciones:

- ✓ **Contribución Científico-Tecnológica.** El diseño de un esquema de análisis integrado que acopla técnicas para evaluar dinámicamente la confiabilidad en el desempeño de operaciones de un sistema Justo en Secuencia.
- ✓ **Contribución Regional.** Resolución de la problemática de la empresa y alcanzar una mayor seguridad del cumplimiento de la demanda, mitigando el

riego de interrupción del sistema de secuenciado mediante la programación dinámica de los factores operativos.

- ✓ **Contribución Socio-Económica.** Desarrollo de una herramienta metodológica para el análisis de políticas de gestión JIS, que permite la toma de decisiones con solidez científica a través de una plataforma informática de fácil manejo.

### **1.5. Estructura de la tesis**

La presente tesis está organizada en alrededor de cinco capítulos. El Capítulo 1 se expuso la información preliminar sobre la problemática de estudio, así como los aspectos técnicos que dieron dirección a la investigación. En el Capítulo 2, se presenta una revisión sobre las características que describen la operación de una práctica Justo-en-Secuencia (JIS), sus beneficios y riesgos, así como la descripción del reto que tiene la gestión del abastecimiento JIS con un enfoque centrado en desempeño de operaciones. En el Capítulo 3, tras mostrar los requerimientos de un análisis multivariado para la confiabilidad y un enfoque dinámico para el modelo de gestión, se describe la metodología desarrollada que integró: i) Modelos Jerárquicos de Probabilidad para el análisis de confiabilidad; y ii) Modelación en Dinámica de Sistemas para el análisis dinámico. En el Capítulo 4, se realizó la implementación de la metodología propuesta aun caso de estudio dentro de la industria automotriz. Finalmente, en el Capítulo 5, se presentan las conclusiones sobre los alcances obtenidos del proyecto, su metodología y su aplicación a la problemática de la gestión de los recursos en un proceso JIS. De igual manera, se exhiben los medios y mecanismos de transferencia que validan la contribución académica de la investigación; y el trabajo futuro relacionado a los tópicos involucrados en la investigación. Como anexos, se integró el manual de uso de la herramienta computacional desarrollada en el software STELLA 9.1. Así como la metodología a detalle del análisis de confiabilidad mediante el lenguaje computacional MatLab.

# Capítulo 2.

ANTECEDENTES

## 2.1. Introducción

El concepto de Cadena de Suministro es cada día más conocido y aplicado en la industria. Este contempla la planificación y gestión de todas las actividades involucradas en el suministro, manufactura, distribución, y demás actividades logísticas. Todo ello mediante la asociación y coordinación con los socios operativos, tales como proveedores, intermediarios, proveedor de servicios a terceros, y clientes. En esencia, la gestión de la cadena de suministro integra la administración de la oferta y la demanda, dentro y entre las empresas, (CSCMP, 2012). Por lo que, el sincronizar una efectiva cadena de suministro con la estrategia competitiva de la empresa, conlleva al alcance de los retos de la misma y la mejora en sus resultados.

Cada empresa de cada industria requiere de una cadena de suministro especializada según sus necesidades y características. En consecuencia, para diseñarla, se requiere de un conjunto distinto de técnicas pero que respondan a una misma estrategia competitiva. Así, en un entorno caracterizado por la alta competitividad del mercado, la necesidad de manejar una gran cantidad y variedad de productos, el suministro de una amplia variedad de módulos, y principalmente, donde la producción se desarrolla bajo una rígida secuencia, es entonces que la implementación de la práctica logística Justo-en-Secuencia (JIS) permite el pertinente ajuste entre la estrategia competitiva de la empresa y su estrategia de cadena de suministro. Para el caso de la industria automotriz, dicho ajuste es cada vez más un elemento crítico de la competencia al generar coherencia en el modelo de negocio de las empresas.

Con el objetivo de proponer un procedimiento para alcanzar la integración, y consecuente estabilidad en la operación de sistemas JIS, se inició este proyecto de investigación. En primera instancia, en este capítulo se exponen las características que describen la aplicación de la práctica Justo en Secuencia, así como sus beneficios y riesgos. Considerando que esta práctica puede adoptarse en diversas actividades de la cadena de suministro, hemos restringido el análisis solo al proceso de abastecimiento

con base en identificar a la efectiva gestión de este proceso como una condición necesaria para la eficiente gestión de la práctica JIS en toda la cadena de suministro.

Tras delimitar el área de estudio, se analiza la gestión por desempeño de operaciones, lo que nos ayudará a definir la metodología para la asignación y estabilidad de los recursos operativos que demanda el proceso de aprovisionamiento. La contribución académica de este estudio radica en describir un enfoque de análisis innovador para entornos JIS. Es decir, para la fase de medición de indicadores de estabilidad se valida el aporte de un enfoque costo-confiabilidad, mientras que para la fase de control se valida la aportación de un enfoque dinámico, lo que permite la actualización dinámica de la configuración de factores a niveles deseados de estabilidad.

## **2.2. Justo en Secuencia**

El desarrollo del concepto de Justo en Secuencia nació de las limitantes de la práctica Justo a Tiempo (JIT). Se conoce a JIT como una parte fundamental del concepto *Lean Manufacturing*, el cual enfoca las actividades operativas para desarrollar entregas en el lugar correcto, en el momento correcto, en la cantidad correcta y con la calidad correcta. JIT generalmente es implementado en un entorno donde se requiere de una demanda estable, la asociación a largo plazo con proveedores seleccionados detalladamente, de un sistema de comunicación estándar para la coordinación rápida y confiable entre las partes, y de la garantía de una alta calidad del material suministrado (Thun et. al., 2007). El potencial de JIT, radica en la posibilidad de disminuir los niveles de inventarios y tiempo de operación en las plantas manufactureras, lo cual a su vez permite la reducción de espacios en el almacén y del personal que manipula los inventarios. No obstante, en un entorno donde se requiere un alto grado de integración del proceso de producción, mayor sincronización y sólidos estándares de evaluación de la calidad del proceso, los límites operativos de las empresas que implementan un

enfoque JIT son rápidamente superados (Hüttmeir, 2009). Lo que resulta en riesgo de interrupciones en la producción debido a problemas de transporte, de calidad o de comunicación, principalmente porque estos problemas son difícilmente compensados en dicho entorno, considerando una condición de cortos tiempos de reacción (Thun et al., 2007). Aun cuando recientes contribuciones relacionadas al JIT se han enfocado en la gestión de la calidad y la mejora continua (Golhar y Stamm, 1991; Wagner y Silveira, 2010), dichos aportes no han podido mitigar las dificultades del entorno arriba expuesto. Esto derivó en la necesidad de una estrategia de gestión que sí pudiera compensar los riesgos de dicho entorno, y que ofreciera un mayor potencial de mejora al proceso de suministro. Ello ha dado como resultado el desarrollo de la práctica Justo en Secuencia (JIS). Estrategia enfocada principalmente en facilitar la gestión de producción en masa con gran variedad de productos.

En términos de ingeniería, JIS es conocido como un refinamiento del JIT. Debido a que JIS adopta la filosofía de trabajo de JIT agregando además el componente de las entregas en el orden correcto, es decir, que se cubre la necesidad de entregas en la secuencia que exige la demanda. Sin embargo en un enfoque logístico, JIS es considerada como una estrategia logística sofisticada con el potencial de responder más rápido a las turbulencias del mercado y fluctuaciones en la demanda, todo sin comprometer la confiabilidad de las entregas y la eficiencia del proceso.

En este sentido, el objetivo de JIS es eliminar los desperdicios en la manufactura implementando un sistema de producción Lean a través de la sincronización de la entrega de las piezas necesarias en el punto de ensamble y la secuencia predefinida de la producción. De este modo, las piezas son trasladadas en racks especializados directamente del almacén del proveedor a la línea de producción, minimizando el almacenamiento de la mercancía en la planta manufacturera. Lo que se conoce como *buffer*. Ello resulta en la eliminación de espacio de almacén, de personal



que opere dicha mercancía, del tiempo de re-trabajo, y principalmente de la complejidad de manipular la mercancía.

Según Wagner y Silveira (2010), de forma general, el JIS se diferencia de JIT a través de tres principales características. En primer lugar, bajo este esquema de operaciones logísticas existe una intensa correlación entre proveedores y manufacturero. En segundo lugar, la entrega de piezas se desarrolla en el orden secuenciado. En tercer lugar, la entrega de piezas se realiza en racks sofisticados que permiten su adecuada protección durante el traslado y manipulación. A partir de estas diferencias, se requiere para la aplicación de JIS una mayor integración de los procesos de operación del proveedor y del manufacturero, así como de más altos estándares en términos de medición y control del proceso de producción secuenciada.

De acuerdo con Thun et. al. (2007), existen tres variantes de la aplicación de JIS con base en la relación proveedor-manufacturero. La primera es la que considera que sólo el manufacturero trabaja con la práctica JIS y el proveedor aunque realiza el abastecimiento en forma secuenciada, su producción se mantiene bajo un sistema de manufactura basada en inventarios (Built-to-Stock). Su desventaja son los altos niveles de inventarios del proveedor. Una forma de mitigarlo, es empleando un proveedor externo de servicios logísticos (4PL), ya que éste absorbe la necesidad de un almacén de dicho inventario. Sin embargo, el requisito para lograrlo es integrar al proveedor externo desde la planeación y la gestión del proceso de las entregas. La segunda variante, es la que contempla que tanto el proveedor, como el manufacturero aplican JIS en su proceso de producción. Esta variante, exige al proveedor ajustar sus operaciones según la demanda secuenciada que tiene el manufacturero. Las ventajas para el proveedor son análogas a las del manufacturero. En cuanto a sus desventajas, la más importante es la relacionada con el hecho de que alguna disrupción en alguno de los procesos afecta irremediamente a ambos. Finalmente, la tercera variante considera que cuando proveedor y manufacturero realizan la producción con el enfoque JIS pero que debido a la distancia geográfica entre ambos, el proveedor

mantiene un almacén cercano al manufacturero del cual se realice el abastecimiento secuenciado, formando lo que se conoce como parque de proveedores (Supplier Park). La ventaja es la eliminación de los costos asociados a la transportación en racks especializados, ya que se realiza la entrega directa a la línea de ensamble desde el almacén del proveedor.

Bajo este esquema, los procesos de producción y abastecimiento de Toyota y Daimler de los años 80's y 90's fueron los primeros casos de éxitos de la implementación de JIS. En el caso descrito por Hüttmeir (2009) como el inicio del JIS, éste partió de un proveedor de asientos para automóvil que logró desarrollar la capacidad para producir y suministrar de manera secuenciada a una planta de ensamble de Toyota. Si bien desde el inicio, la ensambladora exigía a sus proveedores la entrega sincronizada, el proveedor de asientos argumentaba que debido a los cortos tiempos de producción y transportación en el proceso, así como a la alta variabilidad en la demanda de los asientos, no era posible cumplir con el requerimiento. De este modo, se propuso la instalación de un almacén cercano a la planta de Toyota desde donde se llevaba a cabo el secuenciado de la demanda para ser entregado directamente a la línea de ensamble. Es posible que a partir de esto, otros proveedores siguieran la misma estrategia. Este caso, permitió conocer gran parte de las desventajas y riesgos asociados a JIS.

Actualmente JIS se practica ampliamente en el sector automotriz, donde ha mantenido un importante auge. De hecho, de un 5% de las piezas de un automóvil que eran entregadas bajo el contexto JIS en 1996, para 2007 este porcentaje se ha elevado a cerca del 40% (Wagner y Silveira, 2010). Sin embargo, JIS ha dejado de ser una práctica exclusiva de la industria automotriz. Por ejemplo, Dell y Siemens en el sector electrónico, John Deere uno de las principales empresas del sector de maquinaria para la construcción, y Steelcase líder de la industria de manufactura de muebles de oficina y hogar también lo han implementado (Wagner & Silveira, 2011). Otras expresiones equivalentes a JIS que han sido utilizadas son: JIT en Secuenciado (por Toyota),

Entrega de Partes Secuenciadas (por Chrysler), Secuenciado de Vehículos en Línea (por Ford), Suministro Secuenciado en Línea (por Vauxhall), y Collar de Perlas con JIS (por Daimler) (Wagner y Silveira, 2010).

Aun cuando existen pocas contribuciones académicas sobre el tópico de Justo en Secuencia, con ellas se ha mostrado sustancialmente la relevancia de su implementación como una efectiva estrategia de gestión de operaciones. De hecho, trabajos como los de Werner et al (2003), Boysen et al (2007), y Thun et al (2007) presentan una revisión sobre aportes al campo de Investigación de Operaciones enfocados en exponer las problemáticas asociadas al procedimiento de secuenciado del sector automotriz, (Wagner y Silveira, 2011). En la mayoría de estos estudios se destacan los riesgos y potencialidades del JIS. Particularmente el trabajo de Thun et al (2007) muestra un amplio análisis empírico sobre 20 casos dentro de la industria automotriz alemana, donde expone la síntesis de los riesgos y potenciales del JIS en relación a testimonios vivenciales de esta práctica. Indicando que el mayor potencial, según su análisis, se centran en ahorros asociados a los requerimientos de inventarios y de espacio, seguido de susceptibles ahorros por conceptos de calidad y de costos logísticos. Por su parte, Junghanns (2004) apunta a que el principal potencial de JIS radica en ahorros relacionados a la manipulación del material. Otros trabajos publicados que también presentan casos de estudios con la aplicación de JIS son los de Rosendahl y Radow (2004), Lindner (2008), y Hüttmeier (2009).

En relación a los riesgos de JIS, Wagner y Silveira (2010) exponen una serie de proposiciones relacionadas al estatus actual de JIS. Donde enfatizan que los eventos o acciones que hacen vulnerable la operación JIS se presentan básicamente en los tres eslabones críticos de la cadena de suministro: el abastecimiento, la manufactura y la distribución (Tang, 2006; Wagner y Bode, 2006). En cada una de estas fuentes de riesgo, existen factores generales que determinan el nivel de daño. En el abastecimiento, los factores de vulnerabilidad son la complejidad de la interacción de los proveedores, y su estructura operativa reflejando su capacidad para ajustarse al

JIS. En la manufactura, los factores de vulnerabilidad son la estabilidad operativa que garantiza el cumplimiento de las tareas programadas, y una disciplina organizacional que deriva en una mayor responsabilidad de quienes ejecutan la operación. En la demanda, los factores de vulnerabilidad son la configuración flexible de los recursos operativos que permita modificaciones en beneficio de la cadena de suministro. La oscilación en la demanda, aunque no es un factor de riesgo sino una condición de la operación, debe ser empatada en la configuración de los recursos para contrarrestar las consecuencias negativas por dicha variabilidad en la demanda.

La revisión de estas fuentes de riesgos, muestran que los principales causas de interrupción en la operación JIS son: el incumplimiento del suministro por los proveedores (probablemente por limitantes de parque vehicular), problemas de calidad en las piezas, retrasos en la entrega secuenciada, daños en la manipulación de las piezas, fallas en la manufactura interna, y errores en el secuenciado de la mercancía. De esto, se infiere que la principal área de riesgo, es el proceso de abastecimiento (Wagner y Silveira, 2010).

### **2.3. Sistema de entregas**

Generalmente, el desarrollo de estudios de logística se enfoca en la mejora de la cadena de suministro. Estos estudios tienen el reto de adaptarse al contexto de las nuevas formas de consumo y de los nuevos productos con mayor sofisticación y mayor valor agregado (Galván, 2010).

En este entorno logístico, el abastecimiento se establece como una de las áreas claves de la cadena de suministro. En términos de movilidad, el abastecimiento representa el conjunto de actividades relacionadas al movimiento de la mercancía desde el almacén del proveedor hasta las instalaciones del manufacturero, realizando la entrega de los pedidos de la forma más efectiva y con el menor costo posible. El sistema de aprovisionamiento integra los recursos humanos, materiales y financieros

propios o ajenos a la empresa. Todo ello en función de la toma de decisiones relacionadas con el diseño del sistema de abastecimiento, localización de almacenes, modos de transporte, rutas de traslado, niveles de inventario, y manipulación del material (Cedillo-Campos y Mata, 2011). La toma de decisiones se vuelve crítica al considerar que la empresa enfrenta periódicamente este fenómeno de entrega y/o recolección de mercancías. Ya que mínimas mejoras representa importantes beneficios económicos y de servicio a través del tiempo.

En relación a la búsqueda de soluciones en el proceso de abastecimiento, desde la óptica empresarial diversas estrategias se han implementado en los últimos años, entre las ocho principales se tienen (Galván, 2010):

- Reducción de inventarios mediante un sistema integrado en un solo Centro de Distribución y un conjunto de Centros de Carga de Pedidos mediante “cross-docking”;
- Innovadoras alternativas para el Procesamiento de Pedidos y atención a clientes;
- Procesamiento de pedidos por lotes y limitación a la individualización de las entregas en “e-commerce”;
- Procesos y operaciones en Logística Inversa para satisfacer requerimientos de normas y políticas públicas;
- Innovaciones de Tecnología de la Información en logística;
- Innovación en la Tecnología de Vehículos;
- Implementación de Operadores Logísticos con flotas dedicadas; y
- Preferencia para la localización de soportes logísticos en Centros Logísticos

El escenario deseado por una empresa que practica la filosofía JIS es que todas las empresas involucradas en su cadena de suministro ajusten totalmente sus operaciones a este mismo enfoque secuenciado (Thun et al, 2007). Sin embargo, ello es difícil de

lograr considerando las distintas variantes del JIS. Aun así se exige al menos que la relación proveedor-manufacturero si se rija bajo este enfoque, lo que a su vez demanda un mayor acoplamiento entre sus operaciones al menos en el abastecimiento secuenciado. Considerando también que en el proceso de abastecimiento se presentan los principales eventos de riesgos de la operación JIS (Silveira 2010), entonces se identifica a la eficiencia del proceso de abastecimiento como el principal factor para el efectivo desempeño de la práctica Justo en Secuencia (Liker y Wu, 2000). Hecho que ya ha sido detectado por diversas empresas, por ejemplo, BMW, Daimler Chrysler, y Dell (Hüttmeir, 2009).

La descripción de los factores de riesgo en JIS, infiere que la capacidad del proveedor para ajustar su operación al **proceso de secuenciado** es el componente más significativo para mitigar dichos riesgos. De este modo, ya sea que el proveedor configure su proceso de manufactura a una producción JIS o simplemente realice el abastecimiento secuenciado por módulos (Wagner y Silveira, 2010). En la mayoría de los casos el proveedor no tiene la capacidad de ajustar su proceso de manufactura, por lo que toman la segunda opción. Sin embargo sea cual sea la selección, el proveedor debe cumplir con el proceso de secuenciado, es decir, con la entrega de las piezas necesarias respecto a la secuencia de producción justo en lugar requerido de ensamble y listas para ser ensambladas (Morones et al., 2011b). Este proceso hace susceptible de suprimir la fase de almacenamiento de inventarios y minimizar el mantenimiento de un buffer. Con lo que se aminora para el manufacturero la complejidad logística del manejo del gran número de variantes de mercancías, transfiriendo la responsabilidad al proveedor de servicios logísticos.

Esta complejidad junto con su incapacidad por ajustarse a una producción JIS, ha motivado al proveedor a subcontratar los servicios logísticos de un proveedor especializado (4PL o Fourth Party Logistics) para llevar a cabo el proceso de secuenciado, como explica Morones et al. (2011b) en su trabajo de tesis. Esta acción de transferir tareas relacionadas a la producción o distribución hacia proveedores

especializados (4PL) es conocida como *Outsourcing* o *Terciarización*. Una práctica que inicio entre 1998 y 2007, (Wagner & Silveira, 2010), y que le permite a la empresa una mayor flexibilidad y eficacia operativa, así como mejores niveles de servicio y de rendimiento de la cadena de suministro, para enfocarse en las actividades de su negocio principal, (Soh, 2010). Esta es una práctica utilizada en muchas industrias, proveedores logísticos 3PL o 4PL han mantenido participación en servicios de transportación nacional e internacional, almacenamiento, aduanales, croos-docking, entre otros, (Langley, 2010; Cedillo-Campos et al., 2012). Hoy en día, el *outsourcing* se personaliza en función de las características del servicio logístico que se ofrece. Por ejemplo, para el abastecimiento, un proveedor logístico se responsabiliza de las actividades que garanticen que la mercancía sea entregada bajo los requerimientos de cliente (Morones et al., 2011b).

Ya sea el proveedor logístico quien se encargue del abastecimiento, esta debe mantener un alto nivel de integración en el proceso de producción de la manufacturera, así como mayor coordinación y estándares de evaluación de la calidad del proceso (Wagner y Silveira, 2011). Si bien para el proveedor logístico, el JIS conlleva importantes ventajas económicas y de servicio al cliente, la complejidad logística que absorbe favorece el incremento de interrupciones en la línea de ensamble, (Thun et al., 2007).

#### **2.4. Gestión del sistema Justo en Secuencia**

Si bien importantes oportunidades potenciales se asocian a la implementación de JIS, la presencia de riesgos de paro se vuelve un tema cada vez más relevante. Esto es debido a que las consecuencias económicas y de calidad del servicio por problemas de paros o interrupciones al proceso de secuenciado, afectan considerablemente al desempeño de la operación. Sobre todo porque las interrupciones pueden llevar a toda una cadena de suministro a condiciones críticas de competitividad. Una muestra de

ello, es el caso de un proveedor de servicios logísticos del clúster automotriz analizado, quien alcanzó penalizaciones de cerca de \$500,000 USD como resultado de originar tres interrupciones en la línea de ensamble de uno de sus socios industriales en el año 2005 (Morones, 2011). Según Wagner y Silveira (2010), las principales causas de riesgos en la operación JIS son el incumplimiento del suministro, baja calidad de piezas, retrasos en la entrega secuenciada, y errores en el armado del secuenciado. A fin a mitigar estas causas, y a su vez los riesgos de interrupción, un factor clave de la aplicación de Justo en Secuencia es alcanzar la estabilidad y continuidad del proceso de producción secuenciada, mediante la sincronización del flujo de suministro de materiales y el flujo de producción (Meissner, 2010).

Meissner (2010) apunta que para mantener la estabilidad en el proceso de producción influyen cinco factores claves: i) un control efectivo del proceso; ii) un confiable abastecimiento del material; iii) una alta calidad del proceso; iv) una estable planeación de la producción; y v) un accesible diseño del layout e infraestructura de la planta. Con relación a esto, el mismo autor sugiere un procedimiento sistemático para lograr la estabilidad de un proceso a través de los siguientes cuatro pasos: 1) análisis, 2) diseño, 3) medición, 4) control. Bajo la premisa que las empresas que ya emplean el enfoque JIS sobre su proceso de manufactura, mantienen una satisfactoria ejecución de los dos primeros pasos, estas empresas solo deben centrar sus actividades hacia la medición y control del proceso.

Las contribuciones académicas sobre la medición y control del desempeño del JIS han sido desarrolladas en los últimos años. Así por ejemplo, Weyer (2002) además de clasificar y describir estrategias generales aplicadas para el problema de secuenciado, también expone una serie de indicadores que miden el desempeño de la estabilidad de un JIS. Por su parte, Ding y Sun (2004), proponen un indicador para medir el tamaño del buffer de inventario en almacenes del manufacturero a fin a mantener la estabilidad en la secuencia. También, Meissner (2010) expone otro conjunto de indicadores, estos con relación a conservar la posición de las órdenes en la secuencia demandada; entre



algunos de los índices que propone se encuentran, el desplazamiento secuenciado, el backlog secuenciado, y el tiempo de espera. Mientras que Wagner y Silveira (2011) describen un indicador diferente a los anteriores, pero muchas veces empleado para medir el rendimiento de cualquier proceso, producto o servicio; este indicador es el índice de costos. Aunque el aporte de su trabajo es la propuesta de evaluar y comparar los costos logísticos entre la aplicación de la práctica Justo en Secuencia y la de Justo a Tiempo y con ello seleccionar la práctica que mayor beneficie a la empresa; el adoptar este modelo de medición de costos logísticos que considera siete subfunciones en las que incurre el flujo del material permite hacer una evaluación robusta de la estabilidad del proceso respecto al costo esperado del mismo. En general, manipular la operación con base en el valor de los indicadores que midan y comparen el estatus actual del proceso y el estatus esperado del mismo, representa un enfoque de gestión por desempeño de operaciones (OPM, por sus siglas en inglés).

Siguiendo este mismo enfoque, tras establecer a la estabilidad operativa JIS como el grado de precisión en que un proceso de manufactura se sincroniza para cumplir con los programas de producción en los tiempos establecidos, el trabajo de Meissner (2009), motivó a adoptar el enfoque de análisis costo-confiabilidad para medir el nivel de estabilidad de la operación secuenciada. Esto fue debido a que un análisis de confiabilidad, particularmente para el proceso de entrega de mercancías, permite evaluar el nivel en que se garantiza la calidad del servicio, producto o proceso ofrecido (Tadashi, 2003). Y al mismo tiempo hace referencia a la capacidad del sistema de encontrarse en un estado operativo bajo ciertas circunstancias, generalmente luego variaciones o interrupciones. De hecho, el reporte “Índices e Indicadores de Desempeño Logístico” (“The Logistics Performance Index and Its Indicators”) (Arvis et al, 2010) realizado por el Departamento de Traslado y Transporte Internacional del Banco Mundial (World Bank International Trade and Transport Departments), enfatiza que aunado a factores como tiempo y costo, el desempeño logístico depende cada vez más de la confiabilidad y previsibilidad de las operaciones en la cadena de suministro. Lo que pone al **análisis de la confiabilidad en la administración de la cadena de suministro**

como un aspecto influyente en su desempeño, en la medida en la que las operaciones logísticas se vuelven más complejas.

Por otro lado, para este estudio se consideró el costo logístico de la operación JIS como un factor tangible del rendimiento de un proceso de abastecimiento. Esto al detectar que los costos logísticos están asociados al factor de vulnerabilidad. El cual representa las consecuencias observables por la operación y las fallas o interrupciones (Gradilla, 2010). La interpretación de la relación confiabilidad-vulnerabilidad, se da al establecer la confiabilidad como el nivel de operatividad del sistema y la vulnerabilidad como las consecuencias de la no-operatividad (Susilawai, 2010).

Aunque este índice de confiabilidad hasta hoy no ha sido implementado para evaluar la estabilidad de una operación JIS, si lo ha sido en la evaluación de la estabilidad del proceso de abastecimiento, muestra de ello son los trabajos de Muñoz (2004), Muller & Weber (2007), Jane (2010), y Susilawi (2010). Por lo tanto, de la revisión de la literatura, se identificó que los indicadores de estabilidad del proceso propuestos para el JIS permiten únicamente un enfoque reactivo en la gestión del mismo. Esto nos permitió establecer el área de oportunidad para la definición de indicadores que favorezcan un enfoque proactivo y preventivo de gestión para el caso de interrupciones. Necesidad que fue atendida al desarrollar nuestro análisis desde el enfoque de costo-confiabilidad para la medida de la estabilidad del proceso JIS.

Considerando estas circunstancias para la medición del desempeño del proceso de abastecimiento directo a la línea de ensamble, el cual a su vez mide la estabilidad operativa, el siguiente paso fue proponer su mejora a través del efectivo control de la asignación de recursos. Una efectiva asignación de recursos reflejará una mayor productividad, esto al minimizar los desperdicios por buffering, por manipulación del material, y por tiempos de espera. Con relación a ello se han realizado varias investigaciones, para muestra el trabajo de Inman (2003), en el que propone un sistema automatizado de pedidos restaurando la secuencia de las órdenes respecto a la última orden registrada en la línea de producción. También Boysen et al (2007)

muestran un modelo matemático que representa las interrelaciones entre los principales factores de la operación secuenciada, con una función objetivo de costos de almacenaje a minimizar. De hecho el autor muestra los resultados de usar técnicas exactas como Programación Dinámica y técnicas heurísticas como Colonia de Hormigas (Dorigo et al, 1999). El propósito del modelo fue encontrar la configuración de los factores que además de minimizar los costos, garantizaran que la entrega de mercancías se realice en los tiempos establecidos. Hüttmeir (2009) por su parte mostró una combinación de la estrategia logística Heijunka y la de Justo en Secuencia, donde expuso este modelo para controlar el trabajo en proceso (WIP, por sus siglas en inglés), con el fin de medir el nivel de cumplimiento de la producción en cada ciclo de tiempo. Asimismo, otro importante trabajo asociado al control de la estabilidad de la producción en JIS, es el de Morones et al. (2011b) en el que presentan un algoritmo de control de pedidos desde la perspectiva del proveedor. Ya que la mayoría de los métodos de control mantenían la perspectiva de gestión del manufacturero, la relevancia del trabajo de Morones et al. (2011b) radica en ofrecer a los encargados del abastecimiento una herramienta de gestión para controlar la estabilidad de su operación. El algoritmo genético que propusieron tiene como salida la decisión de envío de material secuenciado a la línea de ensamble en relación al nivel de inventario en buffer de cada clase de piezas. En relación a esta revisión de trabajos y la importancia expuesta del proveedor en la estabilidad del proceso, se puede observar un área de oportunidad acerca de estudios que proporcionen al proveedor una herramienta de gestión de los factores operativos.

La búsqueda por mejorar la gestión de los factores que influyen en el proceso de abastecimiento, mantienen una condición dinámica y de incertidumbre originada por la operación diaria, en consecuencia, la asignación de dichos recursos operativos debe responder a numerosos cambios no planificados y adaptarse dinámicamente a ellos, (Sánchez et al., 2008). En éste sentido, diversos estudios exponen que la configuración de factores debe contemplar aspectos dinámicos y de incertidumbre para cubrir la brecha entre el análisis de una realidad y el potencial para una teoría, (Cedillo y

Sánchez, 2008). De hecho, desde una perspectiva dinámica, la innovación en los procesos que conforman la cadena de suministro y la capacidad para integrar las distintas tareas en un sistema de producción, son la vía para crear nuevas y sofisticadas estrategias logísticas (Cedillo & Pérez, 2010). Pero es importante tener en cuenta que toda ventaja competitiva es temporal, por lo que se debe seguir un constante proceso de mejora. Se debe considerar además de una demanda estocástica, nuevos factores de riesgo y un *clock-speed* cada vez más acelerado, como la norma operativa diaria en la industria actual. Debido a la multiplicidad de factores y sus interrelaciones dinámicas, se ha incrementado el número de técnicas alternativas de análisis que permitan una efectiva representación y gestión de la operación de estudio. Una de estas técnicas es la Modelación de Dinámica de Sistemas, que consiente en el análisis del comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de los factores operativos a través del tiempo (Sterman, 2000; Cedillo y Sánchez, 2008; Morlán, 2010). Esta metodología ha demostrado ser un eficiente medio para la gestión de sistemas complejos caracterizados por un comportamiento dinámico.

## **2.5. Conclusiones**

De lo expuesto en este capítulo se identifica a la práctica Justo en Secuencia como una estrategia logística que mejora la gestión de operaciones, particularmente en industrias buscando la personalización de masa y que por lo tanto, deben responder a un ambiente en donde existe una gran cantidad y variedad de productos, lo que requiere un alto grado de integración en el proceso de producción. En este sentido, el JIS ha mostrado sus ventajas para el impulso a la sincronización entre el flujo de suministro de materiales, el flujo de producción y el flujo de distribución.

De este modo, se pudo verificar a través de una amplia revisión de la literatura que la implementación del JIS conlleva beneficios inmediatos como lo es la disminución de

los niveles de inventarios y de tiempos de operación en las plantas manufactureras, lo que a su vez les ha permitido la reducción de espacios de almacén y del personal que manipula los inventarios. Sin embargo, este sistema presenta la desventaja de incrementar el riesgo de interrupción, debido a que cualquier falla difícilmente puede ser compensada debido a los cortos tiempos de reacción que mantiene la cadena de suministro.

En este sentido, considerando que el enfoque JIS muestra amplias ventajas en su implementación al momento del abastecimiento de mercancías por parte del proveedor, y que es en este proceso donde se presenta las principales causas de riesgo de interrupción, entonces, se identifica como clave el desarrollo de una herramienta de medición de la confiabilidad del proceso. Así, al mejorar el proceso de abastecimiento JIS a través de incrementar su confiabilidad y estabilidad, en realidad se estará mejorando el desempeño global de la cadena de suministros.

En consecuencia, el diseño de una metodología de implementación que coadyuve al desempeño exitoso de un JIS, debe estar constituida por una etapa de medición y una de control y dos enfoques integrados. Un análisis costo-confiabilidad para la medición y un enfoque dinámico para el control. Lo cual representa cubrir al mismo tiempo la necesidad de un análisis proactivo y preventivo para garantizar: 1) sincronización del abastecimiento de material y el flujo de producción, 2) alcanzar los beneficios asociados a JIS, y 3) mitigar el riesgo de interrupción.

# Capítulo 3.

METODOLOGÍA

### 3.1. Introducción

De la necesidad de mejorar la operación de abastecimiento en un proceso secuenciado de producción, se concluyó que alcanzar la estabilidad secuenciada es un factor clave para maximizar el desempeño de la operación. En función de ello, se detectó que una estrategia adecuada se compone de las etapas de medición y de control del desempeño de la operación. Para ello se desarrolló un análisis costo-confiabilidad en la primera etapa, y un enfoque dinámico en la segunda etapa. Ello permitió tanto proponer medidas de evaluación preventivas, como proactivas en la gestión de la estabilidad del abastecimiento secuenciado. Es en este sentido que en este tercer capítulo, se describirá a detalle el procedimiento de aplicación de cada técnica empleada en cada fase de la metodología.

Así, para la medición de los indicadores de confiabilidad, se tomó la teoría de probabilidad, específicamente la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad. Asimismo, debido a que el análisis de desempeño requería de un enfoque con características particulares de la operación JIS se optó por adaptar la función de costos JIS que propuso Wagner y Silveira (2011) a las características de la operación de la empresa de estudio, CEVA Logistics.

Por otro lado, para establecer el control de los factores operativos y de su rendimiento, el siguiente paso de la metodología fue la búsqueda de mejorar dicho desempeño, lo que significó establecer la configuración óptima de las variables operativas que influyen en él. Se optó por definir un modelo dinámico como herramienta de gestión, el cual permitiera analizar diversos escenarios sobre la configuración de los factores y a su vez tomar decisiones sobre el escenario que tenga como resultado el desempeño deseado de la operación. Para establecer el modelo se utilizó la técnica de Modelación por Dinámica de Sistemas, misma que se describe a detalle en la sección de 3.4 de este capítulo. Finalmente, el presente capítulo expone una serie de conclusiones relacionadas a la aplicación de las técnicas utilizadas en esta investigación, específicamente para la problemática de estudio.

### 3.2. Análisis de Confiabilidad

El concepto de confiabilidad fue usado por primera vez para evaluar la seguridad operativa de aviones durante la Primera Guerra Mundial (Muñoz, 2004). Este concepto es descrito como el aseguramiento de la calidad a través del tiempo en función de la ocurrencia de fallas durante la vida útil de un producto, servicio o proceso. En éste sentido, una falla se considera como un fenómeno aleatorio que se presenta en un tiempo indeterminado y que afecta el desempeño esperado del producto, servicio o proceso. Por lo tanto, se establece que un análisis de confiabilidad en términos de probabilidad permite estimar la ocurrencia de las fallas. Para efectuar dicho análisis sobre la operación de abastecimiento se contemplaron tres pasos generales: 1) determinar las fallas del proceso, 2) determinar el tipo de análisis, y 3) estimar el índice de confiabilidad.

Para el primer paso, donde se determina qué eventos son considerados como fallas del proceso, se consideraron tres tipos de fallas: i) primarias; ii) por desgaste; y iii) de oportunidad, esto por dos razones principales. En primer lugar, porque cada tipo de falla sigue una distribución estadística específica y por lo tanto, requiere un tratamiento matemático diferente. Y en segundo lugar, porque diferentes métodos se han utilizado para su eliminación o corrección (Torres, 1990). Para identificar los tipos de fallas se pueden implementar un Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF), el cual determina los modos comunes de falla y el análisis de efectos con la intención de reflejar el comportamiento del sistema. Para confirmar los tipos, se examinan las fallas por medio de un análisis empírico, el cual determina las fallas con base en la experiencia de los operadores y administradores del proceso. Para nuestro caso de estudio, con base en la experiencia, se fijaron a priori los eventos que afectan el desempeño económico y de servicio a la operación JIS.

Para el segundo paso, se estableció el tipo de análisis de confiabilidad. Ya sean éstos confiabilidad de conectividad (o terminal), confiabilidad de capacidad, o confiabilidad de tiempo de traslado. La primera calcula la confiabilidad de enlace entre



dos instalaciones sujeto a la presencia de fallas en la ruta de conexión. La segunda estima la confiabilidad del sistema de transporte de poder entregar una demanda dado un nivel de servicio deseado. Y la tercera calcula la confiabilidad de transportar con éxito en un tiempo determinado, (Rodionov y Choo, 2004; Clark y Watling, 2005; Yim et al, 2011).

Finalmente para el tercer paso, se estima el índice de confiabilidad, éste según el tipo definido en el paso anterior, existe una gran cantidad de técnicas, clasificadas ya sea con un enfoque determinista o con uno estocástico (Edimu, 2011). Desde el enfoque determinista, se utilizan parámetros fijos que describen su comportamiento en función de la frecuencia y duración de eventos que afecten al sistema (Kummar, 2005). Tales como índice de frecuencia de interrupciones del sistema, índice de duración de interrupción del sistema, índice de disponibilidad de servicio, entre otros. Sin embargo, la mayoría de estudios de confiabilidad son frecuentemente reportados con un enfoque estadístico. Con este enfoque, a través de la teoría de probabilidad, se han desarrollado técnicas de predicción que determinan la probabilidad de la operación del sistema (Marek, 2002). Técnicas, que a su vez son clasificadas en métodos analíticos y de simulación.

La aplicación de los métodos analíticos requiere de los conceptos fundamentales de teoría de probabilidad. Básicamente emplean las funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés). Entre algunos de los métodos analíticos que se han utilizado para un análisis de confiabilidad, se tiene: corte mínimo y ruta más corta (Vega, 2001; Robledo, 2009), función generatriz universal (Levitin y Lisnianski, 2003; Levitin, 2008), modelos de Markov (Sánchez, 2004; Yung-Wen y Kailash, 2008), redes bayesianas (Langseth y Portinale, 2007; Jenad, 2007; Yin, 2009; Márquez, 2010), algoritmos genéticos (Cheng, 2007; Xu et al., 2009), redes neuronales (Cheng, 2007; Xu et al., 2009), y lógica difusa (Görkemli & Kapan, 2010; Kavousifard & Samet, 2011). Con respecto a las técnicas de simulación, estas calculan la confiabilidad a través de simulaciones de las condiciones del sistema mediante la generación de

estados aleatorios de falla y reparaciones del sistema, (Marek, 2002). Las técnicas principales de simulación son las de: simulación Monte-Carlo (Cardoso, 2008; Lin, 2010), y algunas heurísticas, tales como, Colonia de Hormigas (Yazmani, 2010), y Enjambre de Partículas (Muñoz, 2004).

Sin embargo, contribuciones específicas que empleen un análisis de confiabilidad aplicado al proceso de abastecimiento de material son pocas. Uno de estos aportes es el trabajo de Muñoz (2004) donde además de proponer un algoritmo de diseño de rutas, incorpora en el factor de confiabilidad en el diseño, sin embargo, no expone la técnica de cálculo de la confiabilidad. Otro trabajo es el de Muller y Weber (2007) donde se expone un método para modelar y analizar la confiabilidad de un sistema basado en la teoría de Redes Bayesianas Dinámicas. Asimismo, Jane (2010) publica un algoritmo híbrido de evaluación de confiabilidad el cual requiere a priori las probabilidades de falla de cada nodo del proceso. En general, dichas contribuciones presentan una falta generalizada de un procedimiento analítico aplicable para evaluar la confiabilidad de los componentes o subprocesos de la operación de abastecimiento.

Como se ha observado, existen diversas técnicas que se pueden utilizar para realizar un análisis de confiabilidad, sin embargo el problema de llevar a cabo este análisis en el proceso de abastecimiento es la complejidad natural de dicha operación. La cual aumenta al considerar un proceso en secuenciado. Infiriendo que ésta ha sido la limitante para la realización de estudios de confiabilidad sobre procesos secuenciados de abastecimiento, y en general sobre toda la cadena de suministro, se decidió atacar esta problemática partiendo de la implementación de los conceptos básicos de la teoría paramétrica de probabilidad. La cual tiene como principal ventaja la realización de diversas inferencias acerca del desempeño del proceso JIS, por ejemplo, la probabilidad de falla, tiempo medio de falla, tasa de riesgo proporcional, etc. La base de esta teoría de probabilidad es la función de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) que se utiliza para calcular la curva de tiempo de vida de fallas y no-fallas en el abastecimiento de mercancías. Su formulación matemática

ha desarrollado diversos modelos probabilísticos, entre los más utilizados se tiene los modelos: Binomial, Poisson, Lognormal, Exponencial, Weibull y Gamma (Luna, 1997; Edimu, 2010). Se puede mencionar que estos modelos en su forma general solo consideran una sola variable, continua o discreta, como variable independiente de la probabilidad de falla.

Pero para realizar una efectiva evaluación de la confiabilidad que conduzca a la elaboración confiable de planes operativos, es indispensable considerar el efecto que presenta el conjunto de las principales variables operativas y su interacción sobre el desempeño de la operación, en este caso, sobre la operación del abastecimiento JIS; ya que de no ser así, se tendrá un análisis poco razonable y en consecuencia, la planeación de la operación mantendrá un alto grado de incertidumbre. A pesar de considerar que además de la variable tiempo existen otras variables operativas del proceso en secuenciado las cuales mantienen un efecto directo sobre la ocurrencia de fallas, y en consecuencia, sobre la evaluación de confiabilidad, es necesario realizar el análisis de confiabilidad sobre este escenario multivariado. Esto representa un análisis más robusto y completo del desempeño del abastecimiento JIS.

### **3.2.1. Análisis Multivariado de Confiabilidad.**

El enfoque multivariado dentro del análisis de confiabilidad ha sido escasamente empleado para la evaluación de desempeño de un sistema en general, principalmente por la complejidad matemática que conlleva la adaptación de la teoría de probabilidad multivariada y las características del sistema. Respecto a ello, en este análisis se tiene que definir una PDF multivariada como aporte de esta tesis se muestra un método para ajustar dicho modelo probabilístico de las variables de la operación JIS. Este método es el de *Modelos Jerárquicos de Probabilidad*, el cual se basa en la propiedad de la función de densidad de probabilidad conjunta.

Para explicar este método, se toma en cuenta el procedimiento estándar para un análisis de confiabilidad que se conforma de tres etapas: 1) la toma de la muestra numérica de datos de las variables operativas definidas, 2) la definición de la PDF correspondiente al modelo probabilístico con el mejor ajuste a los datos, y 3) el cálculo de indicadores de confiabilidad, correspondientes a las inferencias paramétricas factibles. La aplicación de los Modelos Jerárquicos de Probabilidad se realiza en la segunda parte del procedimiento anterior. Para describir la metodología de esta técnica se expone el siguiente algoritmo, el cual tendrá como salida la definición de la PDF multivariada. Para tal algoritmo, considerando que la técnica de Modelos Jerárquicos se basa en la propiedad de la PDF conjunta, se tiene que:

*Sea  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  un conjunto finito de variables aleatorias conjuntas, entonces la función de densidad de probabilidad conjunta es:*

$$f(X) = f(x_1 | x_2, \dots, x_n) f(x_2 | x_3, \dots, x_n) \cdots f(x_{n-1} | x_n) f(x_n) \dots \dots \dots (1)$$

Entonces se toma como datos de entrada del algoritmo a:

1.  $X = \{ \vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_{n-1}, \vec{x}_n \}$ , la muestra observada de las  $n$  variables definidas.
2.  $f(X) = f(x_1 | x_2, \dots, x_n) f(x_2 | x_3, \dots, x_n) \cdots f(x_{n-1} | x_n) f(x_n)$ , la fórmula general de la PDF multivariada en relación al producto de las PDF condicionadas.

Un supuesto para la aplicación de la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad es que exista dependencia lineal entre las variables, esto matemáticamente considera que sea no-nula la covarianza entre las variables exógenas a analizar, es decir:

$$Si \forall Cov(x_i, x_j) = 0, \quad \Rightarrow \exists \text{ independencia lineal entre las variables } (x_i, x_j)$$

$$\therefore f(X) = f(x_1) f(x_2) \cdots f(x_{n-1}) f(x_n) \dots \dots \dots (2)$$

Así, el proceso para definir la PDF multivariada implica ajustar un modelo probabilístico a los datos de cada variable a analizar,  $x_i$ , y realizar el producto de las PDF marginales resultantes, esto considerado un procedimiento sencillo en el área de la estadística. Definido lo anterior y al cumplirse el supuesto de dependencia entre las variables, el algoritmo de la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad es el siguiente:

- I) *Se toma  $X^i = \{x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\} \subset X$ , la muestra de datos de las variables involucradas en la  $i$ -ésima PDF condicional,  $f(x_i | x_{i+1}, \dots, x_n)$*
- II) *Definir el modelo probabilístico que se ajuste a  $X^i$ , para ello se siguen los siguientes pasos:*
  - II. i) *Se forman  $k$  submuestras univariadas de  $X^i$ , cada submuestra es de la forma  $X_j = \{x_i | \{x_{i+1,j}, x_{i+2,j}, \dots, x_{n,j}\}\}$ ,  $j = 1:k$ , donde  $\{x_{i+1,j}, x_{i+2,j}, \dots, x_{n,j}\}$  es la  $j$ -ésima combinación factible de los valores de las variables  $(x_{i+1}, \dots, x_n)$*
  - II. ii) *Para cada  $j$ -ésima submuestra se ajusta un modelo de probabilidad, esto con base en el siguiente procedimiento estandarizado de ajuste de modelos.*
    - a) *Estimación de parámetros de diversos modelos, tales como Lognormal, Exponencial, Weibull, Gamma, etc.*
    - b) *Definición y evaluación de cada modelo probabilístico, respecto a los parámetros estimados*
    - c) *Evaluación de pruebas de bondad de ajuste, tales como  $R^2$ , Prueba de Anderson-Darling, Prueba de Kolmogorov, Prueba AIC.*
    - d) *Selección del modelo mejor modelo ajustado*
  - II. iii) *Como resultado de paso anterior se obtendrá un conjunto de modelos univariados, del cual se toma la forma general del modelo que mejor y más veces se ajuste a los  $k$  subconjuntos  $X_j$ , misma que se toma para definir la PDF condicional*
  - II. iv) *Retomando los parámetros del modelo seleccionado en iii) de cada  $j$ -ésima submuestra definido en i), y los valores de las combinaciones  $\{x_{i+1,*}, x_{i+2,*}, \dots, x_{n,*}\}$ , se realiza un ajuste matemático (ya sea polinomial,*

*logarítmico, spline, etc) entre los valores de las combinaciones y del parámetro de escala, y otro ajuste respecto al parámetro de forma*

- II. v) *Se define la PDF condicional con base en forma general del modelo definido en iii) y tras sustituir las variables de los parámetros del modelo por las formulaciones definidas en iv)*
- III) *Tras repetir los pasos I y II para las  $n - 1$  PDF condicionales de (1), se realiza un ajuste de probabilidad a los valores de la variable  $x_n$ , como el que se describe en el paso ii). Este ajuste es para determinar la PDF marginal.*
- IV) *Finalmente, se define la PDF conjunta mediante el producto de las PDF condicionales y la de la PDF marginal.*

Por lo tanto tras definir la PDF multivariada, con base en la teoría de probabilidad se establece la función de confiabilidad, de la siguiente manera:

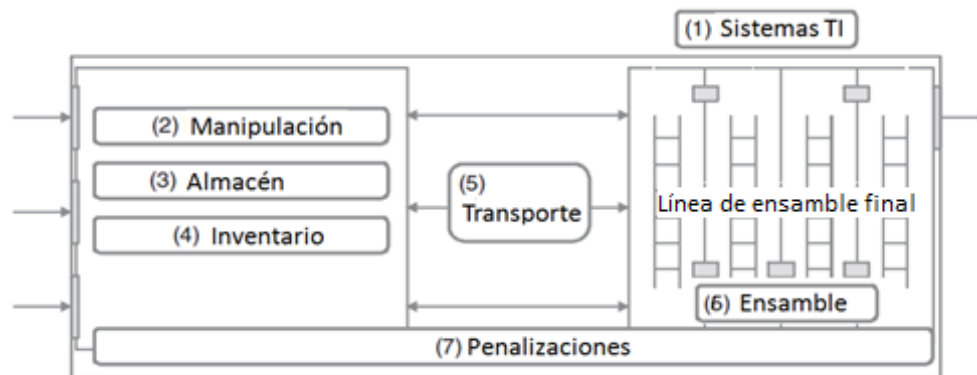
$$R(X) = 1 - \int_{-\infty}^X f(X) dX \dots \dots \dots (3)$$

Con la cual se puede establecer la probabilidad de falla y no-falla para valores definidos de  $X$ . Es posible que se dificulte la formulación de  $R(X)$ , en ese caso se puede emplear métodos numéricos para calcular las probabilidades requeridas. De cualquier forma, el objetivo de evaluar el desempeño del sistema de abastecimiento mediante el factor de confiabilidad se alcanza con el cálculo de  $R(X)$ , el cual representa la probabilidad de alguna disrupción en el proceso con base en la asignación de los recursos a las variables operativas que defina la empresa. Ahora para completar la fase de evaluación de desempeño, se describe a continuación la herramienta para realizar el cálculo de los costos logísticos de la operación.

### **3.3. Análisis de Costos Logísticos**

Al considerar que un análisis de costos logísticos requiere detectar tanto las fuentes de egresos presupuestas como las no presupuestas, es decir, que este análisis además

de evaluar las consecuencias económicas observables de la operación debe también considerar las consecuencias económicas por fallas o interrupciones que puedan presentarse en el proceso. Con ello, el análisis de costo logístico permite comparar el rendimiento esperado de la operación y el rendimiento económico que resulta directamente de la asignación de los factores operativos e indirectamente de las fallas ocurridas por la misma asignación de recursos. Por lo tanto, la diferencia entre ambos rendimientos determina que tan eficiente es la configuración de las variables y parámetros de las funciones de costos. Tomando en cuenta las características de la operación JIS y un enfoque de segmentación de costos, se establecen que las fuentes de egresos se asocian principalmente a los costos de siete subprocesos del lay-out de producción (ver figura 3.1) que siguen diversas empresas manufactureras: i) costo de sistema TI; ii) costo de manipulación; iii) costo de almacén; iv) costo de inventarios; v) costo de transportación; vi) costos de ensamble; y vii) costos por penalizaciones (Cavinato, 1992; Chopra y Meindl, 2010). La suma de estos costos determina el costo total logístico de la operación, así que el reto ahora es definir la función de costos de cada subproceso.



**Figura 3.1.** Segmentación de costos JIS, (Wagner y Silveira, 2011)

### 3.3.1. Función de costos JIS

Con la condicional de que la función de costos para la operación Justo en Secuencia debe considerar los siete subprocesos mencionados, se tomó como base la

formulación que proponen Wagner y Silveira (2011) para la evaluación de costos del proceso de abastecimiento que es la siguiente:

$$CT(JIS) = Sistema\ TI + Almacén + Inventario + Manipulación \\ +Transportación + Ensamble + Penalización \dots \dots \dots (4)$$

El adaptar este enfoque de costos a los egresos diarios que mantiene el proceso de abastecimiento tiene como resultado las siguientes proposiciones:

- **Costos de sistema**,  $C_{Sist}$ , son la proporción de costos diarios asociados a la adquisición y uso de los sistemas de comunicación, de transmisión y monitoreo de la información; que para la operación JIS es indispensable que sean de alta tecnología.
- **Costos de área o almacén**,  $C_{Área}$ , son la proporción de costos diarios relacionados al pago de la compra o renta de las instalaciones, así como de las cuentas de los servicios públicos.
- **Costos de inventario**,  $C_{Inve}$ , están asociados al monto económico que produce el manufacturar y mantener mercancía de respaldo en el área de almacén, sin embargo desde la perspectiva del abastecedor para analizar únicamente el desempeño de su proceso de abastecimiento, este costo es nulo.
- **Costos de manipulación**,  $C_{Man}$ , consideran el sueldo diario del personal de trabajo que participa en todo el flujo del material, desde los almacenes del proveedor hasta las líneas de ensamble del manufacturero.
- **Costos de transporte**,  $C_{Trans}$ , están relacionados al traslado de la mercancía de las instalaciones del proveedor a las del manufacturero, para lo cual se debe considerar el costo de los vehículos de transporte, ya sea la renta o venta, y sus servicios de mantenimiento.
- **Costos de ensamble**,  $C_{Ensa}$ , son los costos en se incurre para la fabricación del producto final, debido a que el proveedor no participa en esta operación estos costos se considera cero para esta evaluación.



- **Costos de penalización**,  $C_{penal}$ , son los costos a los que se hace acreedor el proveedor por producir alguna falla en el proceso de abastecimiento, considerando que la principal falla es el paro de la línea de ensamble por el desabasto de las piezas en el tiempo establecido, entonces consideramos que el costo de penalización es el producido por dicho tiempo de paro en la producción.

Con estas proposiciones se planteó la formulación matemática de la función de costos JIS para el proceso de abastecimiento:

$$CT(JIS) = C_{Sist} + C_{Área} + 0 + k C_{Man} + V_{act} C_{Trans} + T_{paro} C_{Pena} \dots \dots (5)$$

Donde:

- $C_{Sist}$  : Costo de sistema TI
- $C_{Área}$  : Costo de almacén
- $k$  : Personal de trabajo
- $C_{Man}$  : Costo por empleado
- $V_{act}$  : Tamaño de flotilla de transporte
- $C_{Trans}$  : Costo por transporte
- $T_{paro}$  : Tiempo de paro
- $C_{Pena}$  : Costo por minuto de paro.

Con las técnicas expuestas, se calculó los valores de costos y de confiabilidad, a su vez utilizados para determinar la estabilidad del sistema de entregas. Por lo tanto, tras realizar dicho cálculo, el siguiente paso fue la búsqueda de la mejora. Lo que significó definir cuál es la configuración de las variables operativas que propiciara la óptima estabilidad de la operación, con respecto a los índices de costo y confiabilidad. Para ello, debido a la necesidad de un enfoque dinámico en la asignación de recursos, se determinó que una eficiente herramienta era un modelo que simulara el comportamiento real del sistema JIS, el cual considerara la interacción dinámica entre los factores de desempeño mencionados y las variables operativas del mismo. Y

además que permitiera a la empresa conocer y predecir la conducta de escenarios expuestos por la configuración de las variables.

Existen diversas técnicas de modelación, la definición sobre cuál de ella es la ideal para modelar un sistema JIS, depende de una gran cantidad de premisas. Con base en la experiencia previa de los tomadores de decisiones, se determinó a priori la técnica de Modelación de Dinámica de Sistemas, esencialmente con el interés de aprovechar la ventaja que esta herramienta que propone al integrar en los análisis sistémicos, el uso y manejo de sistemas de realimentación continua. Una característica primordial sobre la demanda del abastecimiento JIS.

### **3.4. Dinámica de Sistemas**

Analizar el comportamiento de un sistema a través de la metodología de Dinámica de Sistemas implica establecer que las interrelaciones causales entre las variables son multivariadas y cíclicas y que los parámetros de las mismas varían a través del tiempo. Además de aceptar que algunas variables presentan un comportamiento no lineal (lo cual dificulta una solución analítica) y que las políticas y acciones sobre el sistema muestran diferentes horizontes temporales (Oliva, 1996; Cedillo y Sánchez, 2008). Esto es lo que hace difícil la validación de la estructura del modelo, probar diversas políticas de gestión, y visualizar sus implicaciones sobre el sistema (Morlán, 2010).

El desarrollo de la teoría de Dinámica de Sistema inició con los trabajos de investigación realizados por el Ing. Jay W. Forrester, materializados en tres escritos: “*Industrial Dynamics*” en 1961, “*Urban Dynamics*” en 1969 y “*World Dynamics*” en 1971, (Sterman, 2000; Morlán, 2010). Se trata de un área que se consolidó en los años 90’s con base en los trabajos de John Sterman. La base de esta teoría es la representación matemática (con base en ecuaciones diferenciales), de nuestros complejos modelos mentales para la toma de decisiones.

Dinámica de Sistemas responde a la necesidad del enfoque sistémico para el análisis de operaciones y/o procesos. Este enfoque se centra en dos conceptos: conectividad y realimentación. Es decir, de la definición de “sistema” como el conjunto de elementos conectados entre sí, y de la premisa de que para entender y predecir eficientemente su comportamiento es elemental analizar la totalidad del mismo, entonces la conectividad se vuelve un factor fundamental (Peña, 2003). En este sentido, va en contrasentido de la lógica cartesiana, de hecho argumenta que fraccionar un sistema para su estudio por partes, además de interrumpir las conexiones en él, afecta su análisis.

Por otro lado, el concepto de realimentación debe entenderse como la influencia reciproca directa e indirecta que existe entre las componentes del sistema, es inaceptable ignorar esta característica al tratar de observar su comportamiento y el de sus componentes a través del tiempo, ya que de omitirla se ignora la evolución natural del mismo. Sin embargo, esta visión sistémica escasamente se ha aplicado tanto a las investigaciones académicas como a problemáticas industriales, ya sea por su complejidad o porque estamos envueltos en un método científico en él que intencionalmente se fijan las condiciones experimentales para orientar el análisis en los elementos claves de interés (Morlán, 2010). Con base en esta necesidad por un enfoque global, se desarrolló la disciplina del Pensamiento Sistémico, la cual considera un conjunto de metodologías y técnicas que: 1) reconocen que los sistemas son complejos por las complejas conexiones entre sus componentes; 2) analizan, comprenden y manipulan el sistema en su totalidad; y 3) que su comportamiento dinámico colectivo es consecuencia de su estructura. Por lo tanto, al establecer a la técnica de Modelación de Dinámica de Sistemas como herramienta de análisis de este trabajo, se dejó establecido que se buscaba adoptar un enfoque global de análisis, además de incorporar las bases del modelado matemático.

En general, la Dinámica de Sistemas dispone de un enfoque de modelación que inicia con la definición de un modelo mental establecido a partir de la experiencia

empírica de un operador del proceso y de la experiencia de un analista de sistemas, lo cual considera además las características propias del sistema en estudio. Posteriormente, la estructura de este modelo mental se traduce en un conjunto de ecuaciones matemáticas. En seguida se debe hacer la prueba la validez del modelo de simulación respecto a los datos y/o pruebas de validación, y finalmente a través de la manipulación del modelo de simulación resultante se observan las consecuencias de políticas, decisiones y recomendaciones, ejercidas sobre el sistema (Peña, 2003). Este enfoque heurístico que se le da al modelo tiene como ventaja el comprender fácilmente los resultados de la simulación para cualquier usuario del modelo apoyándose en un diagrama causal. Pero como desventaja, que las relaciones causales mantienen toda la subjetividad que el experto produce sobre el modelo mental.

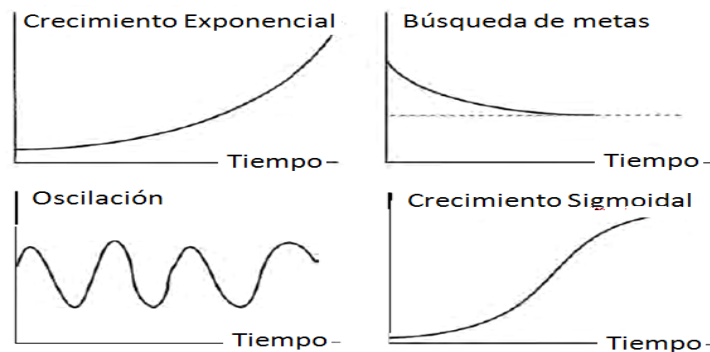
Teniendo en cuenta que no existe un procedimiento exacto que garantice el éxito de una modelación, mucho menos para sistemas complejos caracterizados por un comportamiento dinámico, una condición necesaria de modelos exitosos, es que éstos sigan un proceso riguroso conformado por cinco fases: 1) articulación de la problemática; 2) formulación de la hipótesis dinámica; 3) formulación del modelo matemático de simulación asociado a la hipótesis dinámica; 4) validación del modelo; y 5) diseño y evaluación de políticas de gestión (Sterman, 2000). A continuación se describe a detalle cada una de estas fases.

#### **3.4.1. Articulación del problema**

En esta primera fase se define la problemática a analizar, así como los límites y metas de su análisis. Ello respecto a las características operativas, la información recabada, y las variables claves que intervienen en la problemática. Mismas que se clasifican como exógenas (independientes) o endógenas (dependientes), según su papel en el análisis. Es decir, se entiende por variables exógenas sí su efecto influyen en el desempeño de la operación o endógenas sí describen dicho desempeño. Asimismo se debe definir la

unidad de medida de cada variable, ya sea, tiempo, costo, personas, metros (m, m<sup>2</sup>, m<sup>3</sup>), u otra. Con lo que, en relación a las unidades de medida, los horizontes de tiempo, y su variación a través del tiempo, se definen los patrones de comportamiento que ha seguido el sistema y a los cuales se debe ajustar el modelo dinámico. Estos patrones de comportamiento se conocen como *Modos de Referencia*.

Los modos de referencia son la guía para conocer cómo se espera se comporte una variable o conjunto de ellas a través del tiempo. Cuando se carece de información cuantitativa sobre la variable, se usa la experiencia del operador del sistema para definir los modos de referencia, así como en las referencias de modelos utilizados en problemáticas similares (Morlán, 2010). Diversos patrones se emplean en esta modelación, su aplicación se basa en si tiene una conducta de crecimiento, propiciada por un retroalimentación positiva; una conducta de búsqueda de metas, propiciada por una retroalimentación negativa; una conducta oscilante, propiciada por un efecto negativo con retardo; o una conducta sigmoideal, que surge de la asociación no lineal en la retroalimentación (Sterman, 2000).



**Figura 3.2.** Patrones de comportamiento en Dinámica de Sistemas (Sterman, 2000)

En sí, la importancia de los modos de referencia radica en que son la base para establecer las relaciones principales del modelo, y al mismo tiempo se emplean como criterio de decisión sobre la validez del modelo. La principal características de los

modos de referencias es el *horizonte de tiempo*. Este describe el periodo de tiempo en que se analiza el comportamiento de las variables. Es decir, es el tiempo de análisis en que los modos de referencia exponen las tendencias del comportamiento de las variables y el efecto retardado por variaciones o alteraciones de las mismas.

#### 3.4.2. Definición de hipótesis dinámica.

Ésta se considera la fase crítica que diferencia a la modelación de Dinámica de Sistemas de otras técnicas de modelado. En ella, tras establecer la problemática a analizar, las variables a considerar y sus modos de referencias, se define la estructura del modelo del sistema, apoyándose además en los conocimientos operativos del personal que participa en el mismo.

La hipótesis dinámica representa la visión que se tiene de las relaciones causales entre las variables. Esta hipótesis debe explicar la estructura dinámica del sistema en función de la retroalimentación cíclica y de los potenciales retardos en el flujo, almacén y escape de información. Ella está representada por las unidades de medida de cada variable.

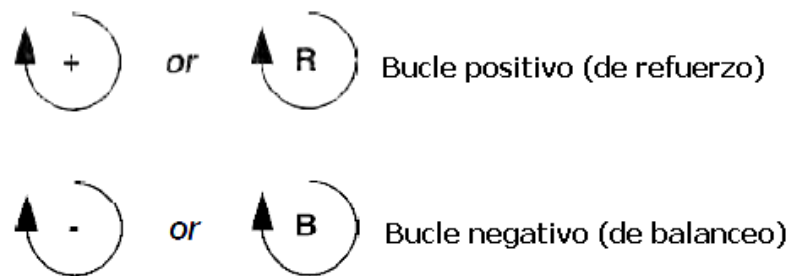
El enunciado de la hipótesis dinámica se puede volver complejo de entender debido al número de variables y de relaciones descritas en el sistema, por ello la manera de facilitar la comunicación de dicha estructura es mediante el uso de un *Diagrama Causal*. Esta es una herramienta que muestra las relaciones causales del sistema en un entorno gráfico para entender sus mecanismos de retroalimentación en una escala temporal (Peña, 2003). Este modelo gráfico se compone de variables y flechas (ver figura 3.3), donde las variables representan los agentes de estudio, y las flechas las relaciones causales.



**Figura 3.3** Elementos del diagrama causal: variables y flechas

Es importante señalar que para establecer la causalidad entre dos variables se debe demostrar la existencia de la asociación entre las variables y definir la dirección de la causalidad, es decir, definir que variable tiene el efecto directo sobre la otra. Las asociaciones se clasifican en positivas y negativas, positivas si existe una relación directa entre las variables o negativas si existe una relación inversa. Encadenando las causalidades entre las variables, cerrando la cadena en la variable inicial se establece el enfoque dinámico, esto permite introducir el concepto de *bucles de retroalimentación*.

Un bucle de retroalimentación es definido como el ciclo de la transferencia de información, ya sea de datos o material; mismo que en función de las causalidades que lo describen se clasifican en bucles de retroalimentación positivos o negativos (ver figura 3.4), también conocidos como bucles de refuerzo o de balanceo, respectivamente (Sterman, 2000). Dicha clasificación se determina en función de la conducta final de la variable con la que inicia el análisis del bucle de retroalimentación, es decir, si se toma una variable y se observa que su valor crece (o decrece), y al concluir la transferencia de información a través del bucle, se observa que el valor de la variable vuelve a crecer (o a decrecer) entonces es cuando se tiene un bucle de refuerzo, mientras que si se observa que el valor de la variable decrece (o crece) entonces se tiene un bucle de balanceo.

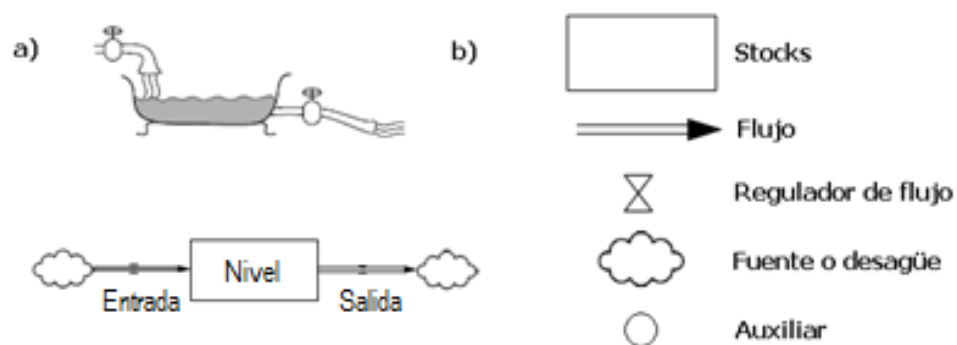


**Figura 3.4.** Tipos de bucles

Todas estas propiedades de la hipótesis dinámica definen el modelo cualitativo. El siguiente paso es el establecimiento del modelo cuantitativo, mismo que permitirá el entendimiento físico del sistema.

### 3.4.3. Modelo de simulación

En esta tercera etapa se obtiene un modelo de simulación, que permite modificar o manipular la estructura del sistema a fin de analizar su comportamiento ante diversos escenarios de operación. El reto es traducir el diagrama causal a un conjunto de ecuaciones matemáticas. Para ello se utiliza un Diagrama de Forrester, que representan al sistema a través de los eslabones de la cadena de suministro, sus flujos de datos y de material. Los diagramas de Forrester caracterizan las variables del sistema según la conducta que experimenta en el entorno dinámico, y las clasifican en tres grupos: i) variables de nivel; ii) variables de flujo; y iii) variables auxiliares, además de los parámetros específicos de la operación. Estos diagramas son otra característica propia de la Dinámica de Sistemas, la cual se basa en la metáfora hidrodinámica del flujo de un líquido en un recipiente (Forrester, 1961). La notación de los diagramas de Forrester se muestra en la figura 3.5 (b).



**Figura 3.5** a) Diagrama de Forrester, b) Notación de diagramas de Forrester.

Inscrito a la implementación de dicha metáfora se tiene asociado los fundamentos matemáticos del cálculo diferencial e integral sobre la conducta de variables de nivel:



$$Nivel(t) = \int_{t_0}^t (Entrada(t) - Salida(t)) dt + Nivel(t_0) \dots \dots \dots (6)$$

y sobre la conducta de las variables de flujo,

$$\text{Cambio neto de flujo}(t) = \frac{\partial(Nivel(t))}{\partial t} = Entrada(t) - Salida(t) \dots \dots (7)$$

Por ello, el siguiente paso para establecer el modelo de simulación es la formulación matemática de las relaciones del diagrama de Forrester y la estimación de sus parámetros. Entendiendo que la formulación matemática debe seguir el principio que también rigen los Modelos de Ecuaciones Estructurales, que indica que el cálculo del nivel de una variable además de depender de las variables endógenas que influyen directamente en ella, también mantienen un efecto indirecto de las variables dependientes de dichas variables endógenas. Y a su vez, el nivel calculado afecta el valor de variables sucesivas. Ya sea que se realice un ajuste matemático sobre los datos de las variables del sistema o que se tome la formulación matemática de los modos comunes de referencia, se debe también considerar la enunciación matemática de condiciones propias del enfoque dinámico, como retardos, pulsos, colapsos, etc.

Considerando la complejidad de traducir la hipótesis dinámica descrita en el diagrama causal a un modelo cuantitativo no lineal, existen diversas herramientas de simulación que realizan dicha transcripción. En particular para este proyecto se utilizó el entorno del software STELLA® de Isse Systems.

#### 3.4.4. Pruebas de validación

Para esta fase se aplican una serie de pruebas y análisis para determinar la validez del comportamiento simulado del modelo respecto al comportamiento real del sistema. De este modo, partiendo del hecho de que una modelación represente un fenómeno de la realidad y que éste es aceptado hasta no ser refutado, los modelos están sujetos a un proceso de validación que los haga más robustos en el entorno que se desarrollan. No existe una prueba única para validar un modelo de dinámica de sistemas. La confianza

en el modelo se acumula conforme se prueban más puntos de correspondencia entre el modelo y la realidad. La naturaleza de dinámica de sistemas permite que se puedan llevar a cabo diversas pruebas, las cuales se emplean para dos cosas, una para comprobar la consistencia de la estructura del modelo y dos para garantizar que la simulación del sistema modelado se ajuste a la conducta esperada, definida por una serie de escenarios operativos. Estas pruebas de validación no serían posibles con otras técnicas de modelación, pero además, pruebas utilizadas en otras disciplinas como la prueba estadística de hipótesis no serían adecuadas para dinámica de sistemas la interrelación dinámica que guardan las variables. En el mejor de los casos sirven como complementos (Barlas, 1996).

Las pruebas utilizadas en Dinámica de Sistemas son: i) adecuación de límites; ii) Evaluación de estructura; iii) consistencia dimensional; iv) evaluación de Parámetros; v) condiciones extremas; vi) reproducción de conducta; vii) predicción de conducta; viii) comportamiento anormal; ix) comportamiento sorpresa; x) políticas extremas; xi) adecuación de límites por comportamiento; xii) análisis de sensibilidad por comportamiento; xiii) mejora del sistema; xiv) cambios en la predicción de conducta; xv) adecuación de fronteras por políticas; y xvi) análisis de sensibilidad de política (Forrester y Senge, 1980; Barlas, 1996, Sterman, 2000; Cedillo y Sánchez, 2008). La aplicación de dichas pruebas de validación se realiza jerárquicamente en tres etapas: 1) verificación estructural, 2) validación del comportamiento, y 3) evaluación de políticas de gestión (Morlán, 2010).

#### **3.4.4.1. Verificación estructural**

Este tipo de pruebas tienen el objetivo de asegurar la consistencia lógica y dimensional de las ecuaciones, variables y parámetros. Aunque todas las pruebas de este tipo influyen en la solidez del modelo, es indispensable que se cumpla la consistencia dimensional.

La **consistencia dimensional** consiste en observar que las ecuaciones definan correctamente la transferencia de información de manera conceptual o numérica en función de las unidades de medida de cada variable involucrada en el bucle de retroalimentación. Esta prueba puede parecer obvia, sin embargo, sorprendentemente muchos modelos no aprueban esta etapa, o lo hacen a través de incluir parámetros de escala.

#### **3.4.4.2. Validación del comportamiento**

Este tipo de pruebas, determinan el grado de ajuste del modelo con el sistema real. Se caracterizan por un criterio de decisión visual, en relación a la forma, escala y sincronización de las tendencias en la conducta de las variables respecto a los modos de referencia que se tiene. Al superar las pruebas de este tipo se tiene mayor confianza sobre el modelo de simulación y entonces puede ser usado como herramienta válida para solucionar la problemática modelada y proponer mejoras. Básicamente, se dice que el modelo valida el comportamiento, cuando se satisfacen las pruebas de reproducción del comportamiento, condiciones extremas y análisis de sensibilidad por comportamiento.

- **Reproducción del comportamiento:** esta prueba sirve para analizar las condiciones de las variables y parámetros que reproducen el comportamiento real del sistema.
- **Análisis de sensibilidad por comportamiento:** esta prueba se enfoca en la sensibilidad del modelo ante el cambio en los valores de los parámetros. A medida que el modelo es menos sensible al cambio de los parámetros, la confianza en el modelo es alcanzada. La prueba consiste en experimentar con diferentes valores de parámetros y analizar el impacto en la conducta del modelo.

#### **3.4.4.3 Evaluación de políticas de gestión**

A fin a completar la validación del modelo y consolidar la confianza sobre el mismo, se requiere comprobar la flexibilidad y robustez del modelo ante variaciones significativas

en los valores de las variables o de los parámetros, por medio del análisis de escenarios alternativos y representativos del sistema.

- **Condiciones extremas:** se trata de una prueba útil para encontrar errores en la estructura del modelo. Además de que explota el desempeño del modelo ante situaciones límites de conducta. El propio hecho de plantear los escenarios apropiados obliga a afrontar suposiciones sobre el futuro; y el acto de ensayar planes y tomas de decisiones sobre un modelo puede facilitar que se desarrollen estrategias robustas incluso si las circunstancias cambian.
- **Análisis de sensibilidad de políticas:** indica la influencia de las recomendaciones en los cambios de políticas sobre el modelo. Se debe verificar que las propuestas y recomendaciones no contradigan otros parámetros o políticas y lleven al modelo a representar un comportamiento erróneo.

Tras validar el modelo de simulación y considerarlo como una herramienta confiable para el análisis y control del sistema, el siguiente paso del proceso de modelado considera el diseño y evaluación de nuevas configuraciones gerenciales sobre el sistema.

#### **3.4.5. Diseño y evaluación de políticas de gestión**

Como parte final de la modelación en Dinámica de Sistemas se tiene esta fase de diseño y evaluación de políticas de gestión, en la cual se considera el posible desarrollo de una nueva perspectiva de gestión del sistema en relación a los resultados asociados a diversas políticas simuladas en el modelo. Considerando que esta nueva visión organizacional provoque cambios en los modelos mentales y en la toma de decisiones sobre el sistema, su éxito depende íntegramente de la motivación de la empresa o institución que experimenta la problemática analizada a implementar los cambios recomendados. En realidad es complicado completar al 100% esta fase del modelado, porque el establecer una nueva visión o los indicios de su inicio es un

proceso lento e imperfecto dentro de cualquier sistema, y aún más crítico en el sector industrial.

En resumen, la metodología de modelación en Dinámica de Sistemas es un procedimiento efectivo para la creación, la formulación y la consolidación de un modelo de simulación, particularmente de un modelo de control del desempeño de un sistema de entrega de mercancía con un enfoque JIS. Considerando que una de las ventajas que el procedimiento de modelación dinámica ofrece, es determinar la configuración de las variables operativas que propicien la óptima estabilidad de la operación con respecto a los índices de costo y confiabilidad, entonces se determinó la implementación de la Dinámica de Sistemas a este proyecto de investigación.

### **3.5. Conclusiones**

Es importante recordar que la motivación para el desarrollo de este proyecto de investigación fue la de solucionar la problemática particular que experimentan las empresa 4PL a ofertar el proceso de secuenciado en sectores industriales tan competitivos como el automotriz.

La meta es la de asegurar políticas para mitigar el riesgo de disrupción en un proceso de abastecimiento secuenciado de material. Fue entonces que tomando en cuenta lo anterior, y las características operativas del caso de estudio, que se estableció un procedimiento sistémico para su solución. De este modo se estableció que el procedimiento de solución se conformara de dos etapas: i) una de medición; y ii) otro de control. Por lo que en este capítulo, tras una revisión de diversas técnicas, métodos y herramientas usualmente aplicadas a los requerimientos de cada fase; se mostró y describió la técnica metodológica específica asociada a cada una de ellas.

Para la fase de medición de desempeño, tras justificar la importancia de la implementación de un análisis de confiabilidad y mostrar el procedimiento estándar

para dicho análisis (determinación de modos de fallas, del tipo de su análisis y de estimación del índice de confiabilidad), se expuso que para el cálculo de confiabilidad, la técnica adecuada fue la de Modelos Jerárquicos de Probabilidad. Esta porque considera un análisis multivariado de la confiabilidad, el cual se exige por las características del sistema de entrega de mercancía. Asimismo, otro índice de desempeño para medir la estabilidad del proceso es el nivel de costos JIS, para el cual se realizó la adaptación del importante aporte hecho por Wagner y Silveira (2011).

Respecto a la fase de control, considerando la necesidad del enfoque dinámico para el análisis de un sistema caracterizado por un escenario en el que la demanda mantiene una conducta estocástica e incierta, y que ésta provoca una serie de cambios constantes sobre las demás variables o factores operativos, se propuso y justificó el uso de la dinámica de sistemas. Un modelo dinámico de simulación para el manejo del proceso de abastecimiento secuenciado de material desarrollado mediante la metodología de Dinámica de Sistemas permitirá examinar y validar mediante simulaciones el comportamiento del proceso ante diversas configuraciones de las variables, y con ello determinar la configuración que optimice la estabilidad operativa de dicho proceso considerando el valor de los indicadores de desempeño; costo y confiabilidad. En realidad se buscó aprovechar una característica muy particular de la metodología de modelado en Dinámica de Sistemas, la cual es el enfoque dinámico-cíclico y multivariante en la estructuración de las relaciones del modelo, lo que propicia un análisis más robusto de sistemas complejos.

# Capítulo 4.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

## **4.1. Introducción**

Es importante recordar que esta investigación inició con el objetivo de dar solución al problema de mitigar el riesgo de interrupción del proceso de entregas de mercancías de para empresas utilizando un proceso de abastecimiento JIS. Para ello, una vez realizada la revisión de la literatura y definición de la metodología para el análisis, se buscó un caso de estudio para la valoración. La empresa que nos permitió desarrollar el caso de estudio fue CEVA Logistics, un 4PL de clase mundial.

La metodología propuesta se basa en los pasos del proceso de modelación de Dinámica de Sistemas. Es decir, tras observar y documentar la operación a analizar, se formuló el modelo cualitativo del sistema (diagrama causal), para posteriormente incorporar las ecuaciones correspondientes de los análisis de confiabilidad y costos para la medición del desempeño del sistema. Para llevar a cabo el análisis de confiabilidad se utilizó la herramienta computacional MatLab®, la cual facilitó los cálculos numéricos de dicho análisis. Para el control del desempeño a través de la evaluación de políticas de gestión, se elaboró una interface en el software STELLA®.

En el presente capítulo, se muestran conjuntamente tanto los resultados de la implementación de esta metodología a la problemática de CEVA Logistics, como las características y requerimientos particulares del proceso de secuenciado que ésta ejecuta para la empresa ensambladora automotriz General-Motors localizada en Ramos Arizpe, Coahuila, México. Particularmente en lo relacionado al abastecimiento de autopartes a los puntos de usos de la línea de ensamble de vestiduras para la Línea 2 del complejo automotriz. Del mismo modo, se presentan las conclusiones del desarrollo y de los resultados de la aplicación de la metodología al caso de estudio.

## **4.2. Caso CEVA Logistics**

La ventaja de emplear la Dinámica de Sistemas en esta problemática, radica en la construcción de un modelo de simulación para observar el comportamiento del proceso



de entrega de mercancía de la empresa CEVA Logistics ante diversos escenarios. Lo que además permitió una mayor comprensión de las relaciones cíclicas dinámicas que existen entre las variables del sistema. El modelo aumentó la habilidad de los responsables del proceso de abastecimiento para evaluar diferentes políticas de gestión factibles sobre el sistema, tomar de decisiones y establecer planes de contingencia que maximizaran la confiabilidad del sistema y con ello, el desempeño de la cadena de suministro.

Como se ha mencionado, esta primera fase del modelado en Dinámica de Sistemas consideró la observación y documentación de las características operativas del proceso. En este caso, el proceso de abastecimiento en la empresa CEVA Logistics. Identificando que las actividades de CEVA Logistics se centran el abastecimiento secuenciado de mercancías a la automotriz General Motors (GM), se detectó que la operación de CEVA, se basa en la estrategia Built-To-Order (BTO). Es decir, responde solo a las órdenes de suministro que recibe por parte de GM (descrito en el capítulo 1, sección 1.3.1), las cuales se presentan continuamente durante todo el periodo laboral diario. Es decir, CEVA ejecuta solo los envíos de mercancías correspondientes a dichas órdenes de demanda. Para ello, CEVA requiere garantizar que podrá cubrir dichas órdenes en los tiempos establecidos para evitar alguna interrupción de la línea de ensamble, donde la principal causa de paro dependiente de CEVA es el desabasto de las autopartes en las estaciones de ensamble.

El proceso de valor, como secuencia de tareas que lleva a cabo CEVA para el cumplimiento de una orden es el siguiente: CEVA recibe la orden de demanda secuenciada por parte de GM (con una anticipación de 4 a 6 hrs. para la entrega de la mercancía correspondiente), con ella programa el proceso de carga de los componentes en los camiones. Respetando la secuencia, se cargan los camiones (se llenan a una capacidad máxima de confort, es decir, se cargan los camiones lo más posible sin dañar la mercancía en tránsito) y luego se trasladan hasta la línea de ensamble correspondiente en GM. El tiempo de viaje se compone tanto del tiempo de

traslado entre cada dos nodos de la ruta y el tiempo de estancia en cada uno de ellos. Al llegar a la línea de ensamble correspondiente en GM, se realiza la descarga de la mercancía. Una vez finalizada la descarga, el vehículo es llenado con contenedores vacíos. Después, el vehículo inicia su regreso hacia las instalaciones de CEVA, donde se registra su entrada, se descarga los contenedores vacíos, y finalmente toma lugar en la fila para repetir el proceso de traslado, mismo que siguen todos los vehículos. Respecto al seguimiento de la mercancía, GM le permite a CEVA mantener un inventario de seguridad (buffer) para cada tipo de autoparte, el cual no debe ser mayor a dos horas de producción. La orden se considera cumplida hasta que se suministra el material correcto, en la estación de ensamble correcta, en el momento correcto.

CEVA realiza los envíos constantemente desde sus instalaciones hacia los correspondientes puntos de ensamble de la mercancía enviada. El periodo de tiempo con el que cuenta CEVA para realizar la entrega de la mercancía demandada se conforma del tiempo que pasa en el área de pintura (donde a la entrada de la unidad vehicular a esta área se registra la orden de demanda), y del tiempo entre la salida del área de pintura y la llegada a la estación de ensamble correspondiente. Debido a los cortos tiempos que se tienen para ejecutar la orden de pedido, ésta se considera entregada desde que deja el almacén de CEVA, esto resulta en el establecimiento del inventario de seguridad como la suma del inventario en buffer y el inventario en tránsito.

Así, la decisión de cuándo enviar se basa en el nivel de inventario de seguridad y el tiempo de respuesta que tiene CEVA de cada tipo de autoparte. Esta decisión es compleja considerando la gran variedad de mercancías que se emite en cada orden y la continua petición de material. Esto complica la programación y ejecución de los envíos. Bajo el supuesto de que CEVA realiza la programación de las cargas en los envíos de manera óptima, se requiere que el abastecimiento secuenciado cumpla con la demanda de autopartes respecto a horarios compromiso. Esto consecuentemente

incrementará las ganancias económicas y el nivel de servicio al cliente. Siendo el principal objetivo, evitar paros de línea en GM.

En este sentido, los miembros de la cadena de suministro estudiada consideran que la adecuada asignación de los recursos operativos es la vía para lograrlos. Si bien, la configuración actual de los factores operativos en CEVA Logistics logra el funcionamiento demandado, los tomadores de decisión desconocen realmente si esta configuración es la correcta para el óptimo rendimiento respecto a las metas mencionadas. Particularmente, CEVA está interesada en conocer si tiene el número de vehículos de transporte adecuado para responder a la demanda de viajes requeridos para enviar las autopartes demandadas. Además, la empresa requiere que el proceso de entrega sea confiable y menos vulnerable ante variaciones de la demanda.

La estrategia que se siguió para la solución de estos requerimientos tiene como primer paso evaluar el rendimiento asociado a la actual flotilla de vehículos, respecto a indicadores de costos y de tiempos, sin embargo basado en el problema de garantizar la no-disrupción del suministro, añadir al índice de confiabilidad permitió estimar la probabilidad con la que se asegura la estabilidad operativa para la no-disrupción. Con base en dicha evaluación, se toma la decisión de aumentar, disminuir o mantener el tamaño de la flotilla.

Es importante establecer que el tiempo de recorrido que tiene un vehículo para cumplir con la orden de mercancía fue establecido por CEVA en 80 minutos. Ello considerando que el camión debe estar estacionado y preparado para su llenado tras la recepción y programación de secuenciado, empleándose 15 min para inspección, movimiento de almacén a plataformas de llenado, y carga de vehículos; 20 min para traslado entre las instalaciones de CEVA y las de GM, 6 min para descarga de mercancía, 10 min para la carga de dollies vacíos, 20 min de traslado entre GM y CEVA, y 6 min para descarga de dollies vacíos, así como 3 de min de seguridad. Considerando estos 80 minutos por recorrido y una jornada de trabajo de 20 horas, entonces se establecieron 15 periodos de análisis sobre la demanda de viajes.

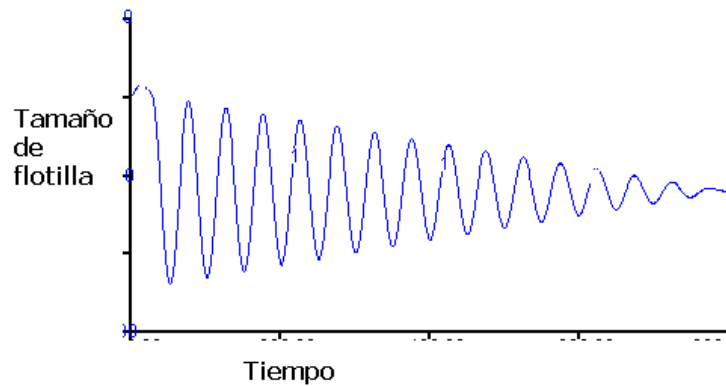
Otro punto importante, es considerar la condición estocástica de la demanda, la cual además de producir gran incertidumbre en el comportamiento de la misma, también lo hace sobre los ingresos percibidos por el envío de mercancía (estableciendo que CEVA recibe un pago por cada mercancía suministrada a GM), y sobre el tiempo de operación que se requiere para el traslado de las autopartes. Debido a que CEVA tiene la posibilidad de subcontratar diariamente la flotilla de vehículos, se pretende que con base en la comparación del desempeño de la flotilla actual y del desempeño deseado de la misma, con base en un efectivo pronóstico de la demanda de viajes para el siguiente día de trabajo, se tome la decisión sobre el tamaño de la flotilla.

Considerando todas estas características de la operación de CEVA, de su problemática y de la solución esperada, se identificó a las variables operativas a utilizar en el modelo de simulación y que son las siguientes:

- Tamaño de flotilla
- Demanda de viajes
- Tiempo demandado de operación
- Tiempo estimado de operación
- Tiempo de retardo
- Costo JIS
- Ingreso
- Ganancias
- Confiabilidad

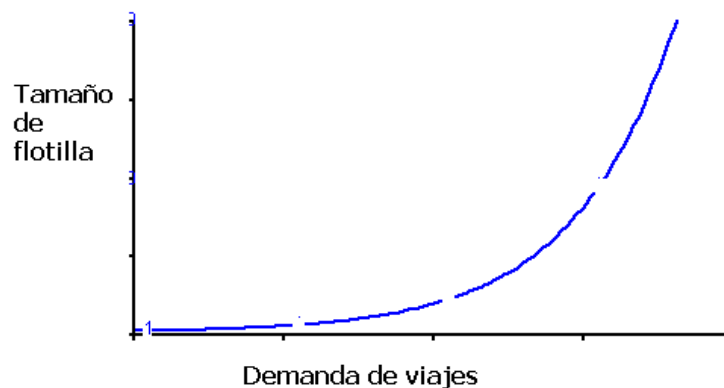
La interacción entre estas variables permitió establecer los modos de referencia asociados a la operación analizada. El principal modo de referencia al que se compara el modelo de simulación es el correspondiente al comportamiento esperado de *tamaño de flotilla* respecto al tiempo. Éste se espera que sea una mezcla de los patrones de conducta oscilatoria con una tendencia de búsqueda de metas dependiente del objetivo

de estabilizar la asignación de flotilla a un tamaño que permita responder a la demanda de viajes (ver figura 4.1).



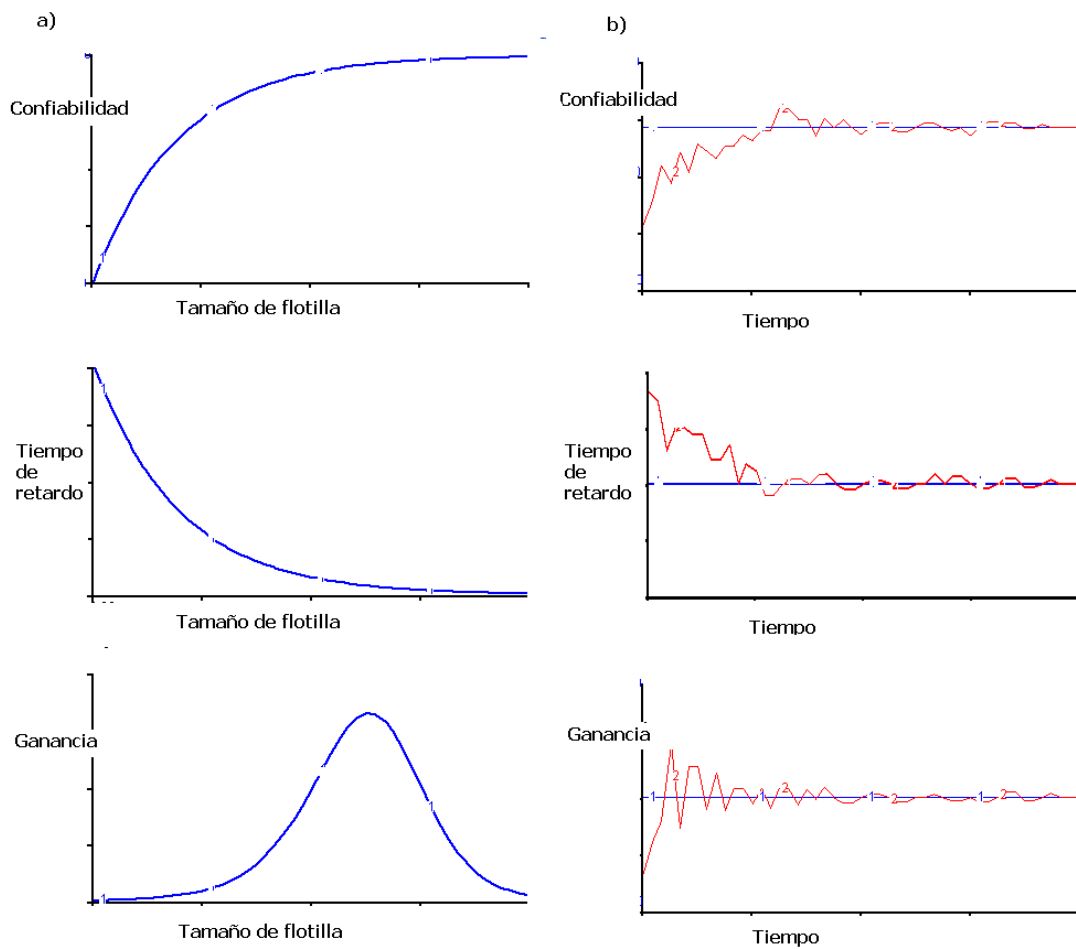
**Figura 4.1.** Tiempo vs tamaño de flotilla

Este modo de referencia es el esperado al implementar las propuestas de modificaciones dinámicas al tamaño de flotilla con relación a los índices de desempeño. Mientras que el modo de referencia que asemeja el comportamiento actual del sistema sin implementar propuestas de ajuste dinámico responde a una línea constante igual a 25, que es el constante parque vehicular que subcontrata la CEVA. Por otro lado, si se considera solo la demanda para definir el tamaño de flotilla, se puede obtener un comportamiento del sistema como el observado en la figura 4.2.



**Figura 4.2.** Demanda de viajes vs flotilla de vehículos

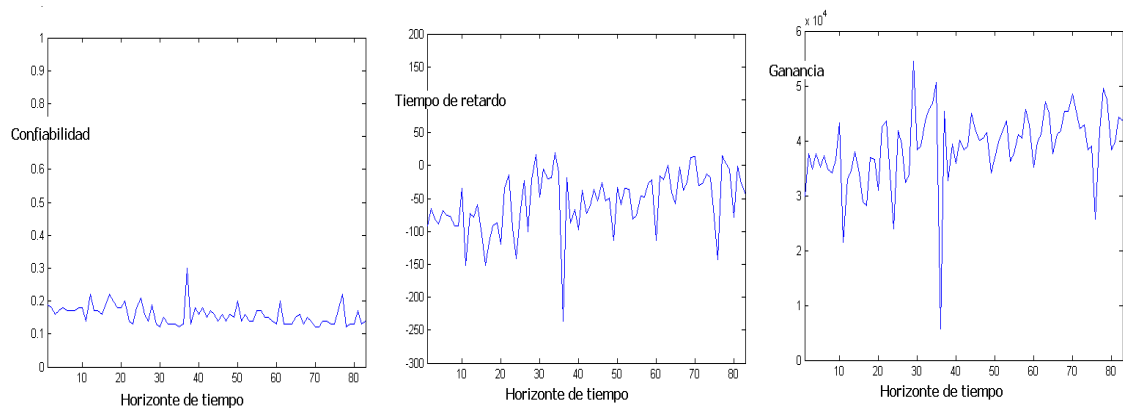
Asimismo, otros tres modos de referencia importantes son los que representa la conducta de las relaciones de la variable *tamaño de flotilla* con los variables *tiempo de retardo*, *ganancia*, y *confiabilidad*. Estos modos de referencia muestran un comportamiento de búsqueda de metas, decreciente para *tiempo de retardo* y creciente para *confiabilidad*, mientras que para *ganancia* experimenta un comportamiento de madurez y caducidad, es decir, en forma de campana (ver figura 4.3).



**Figura 4.3.** a) Variables de desempeño vs flotilla, b) Tiempo vs variables de desempeño

Los horizontes de tiempo de los modos de referencia en los que participa el tiempo contra una de las variables del sistema, depende del propósito de uso del modelo de simulación, es decir, para una etapa de validación será del tiempo de análisis de la demanda histórica de viajes que corresponde al primer semestre del presente año, mientras que para una etapa de simulación será del tiempo de análisis de la demanda del día actual.

Respecto al horizonte de tiempo de los demás modos de referencia, éste depende del dominio de la variable independiente de la relación causal. Otro modo referencia relacionado a cada uno de estos índices de desempeño son los que representan su comportamiento observado respecto a la información histórica del sistema, considerando que estos no han sido influidos por los criterios de decisión sobre la flotilla. Dicha información es la correspondiente a la demanda de viajes del primer semestre de operaciones del presente año. Tales modos de referencia pueden ser visualizados en la figura 4.3.c.



**Figura 4.3 c) Tiempo vs desempeño actual**

Ahora, tras establecer las variables del sistema y los modos de referencia correspondientes, se requirió definir la hipótesis dinámica que determinó la interpretación que se tiene de la estructura del sistema.

### 4.3. Hipótesis dinámica

El conocimiento adquirido sobre el sistema de abastecimiento de CEVA Logistics, se basa en la documentación que se tuvo sobre el mismo, junto con la experiencia práctica de los expertos consultados. Este conocimiento permitió definir la hipótesis dinámica (descrita a continuación) que explica la relación existente entre las variables principales del sistema. Ello permitió definir el modelo cualitativo, el cual se puede comprender de una mejor manera a través del diagrama causal expuesto en la figura 4.4. Destacando que este modelo cualitativo es el resultante de una iteración de mejoras sobre un modelo inicial. De este modo para la hipótesis dinámica se estableció lo siguiente.

Con el propósito del modelo de comparar el desempeño que tiene el tamaño de flotilla con el desempeño exigido por la empresa, asociado a la demanda de viajes para el suministro de las autopartes demandadas, se fijaron tres indicadores del desempeño: ganancia económica, tiempo de retardo, y probabilidad de éxito (confiabilidad). Consecuentemente se constituyen cuatro bucles sobre las relaciones entre estas variables, con los cuales se describe la estructura del sistema en general.

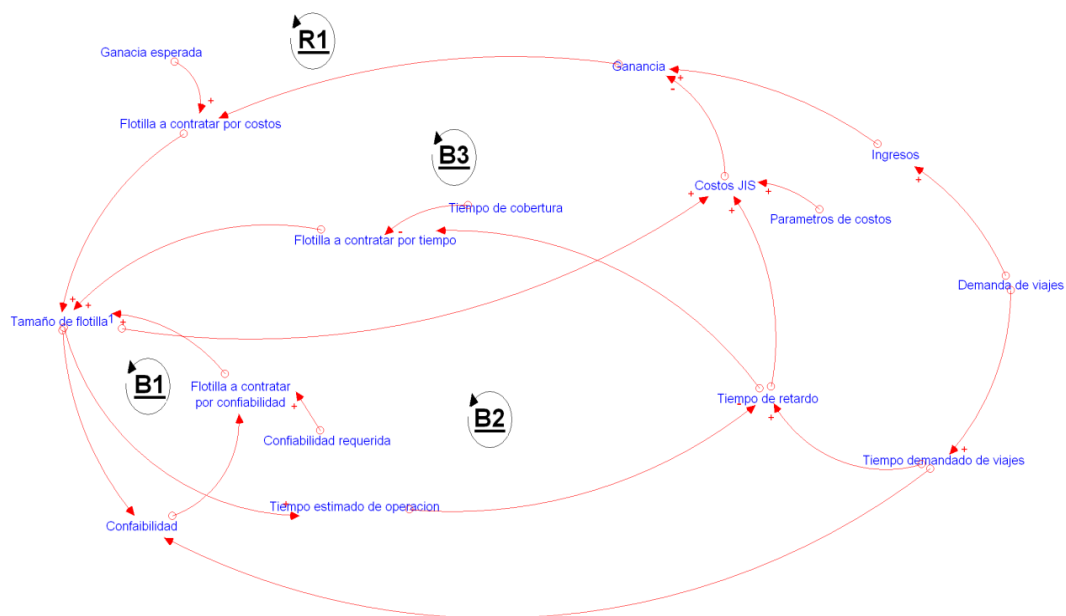


Figura 4.4. Diagrama causal del proceso de suministro CEVA Logistics



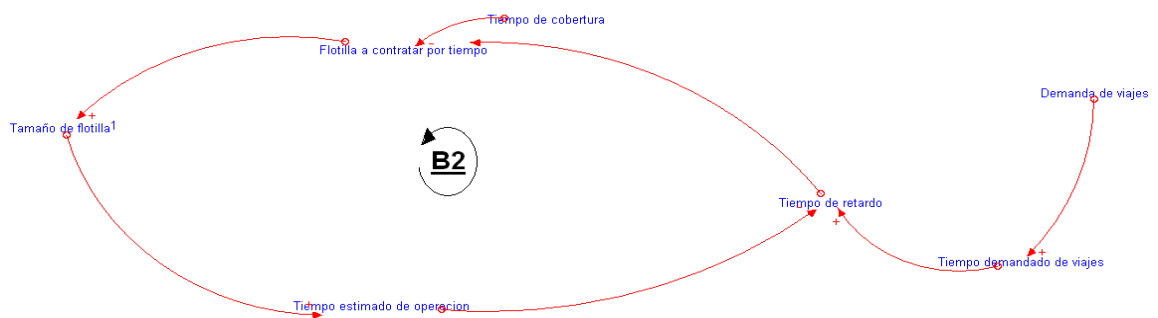
El primer bucle **B1** (ver figura 4.5), considera las relaciones causa-efecto entre las variables tamaño de flotilla, demanda de viajes, tiempo de operación, confiabilidad y flotilla a contratar tienen como parámetro de base la confiabilidad requerida. Este bucle es de balanceo debido a que, como variable principal del sistema, un aumento en el tamaño de flotilla en combinación bivariada con una disminución del tiempo demandado para cumplir con la demanda de viajes, producen un aumento en la confiabilidad del sistema para cumplir con dicha demanda de viajes. Entonces, a medida que aumenta la confiabilidad y se alcanza la meta de la confiabilidad exigida por la empresa, se tendrá necesidad de menos vehículos a contratar que los que actualmente subcontrata, esto con base en el criterio de subcontratación asociado al nivel de confiabilidad. Sí la empresa toma la decisión de subcontratar menos vehículos, entonces se tendrá una disminución del tamaño de la flotilla para la operación del siguiente día. Esto cierra el bucle de balanceo B1.



**Figura 4.5 Bucle B1**

El segundo bucle **B2** (ver figura 4.6) también es un bucle de balanceo, el cual considera las relaciones entre las variables: tamaño de flotilla, tiempo estimado de operación, demanda de viajes, tiempo demandado de operación, tiempo de retardo, tiempo de cobertura y flotilla a contratar. La transferencia de información en este bucle, se inicia al considerar que con un incremento en el tamaño de flotilla se tiene un

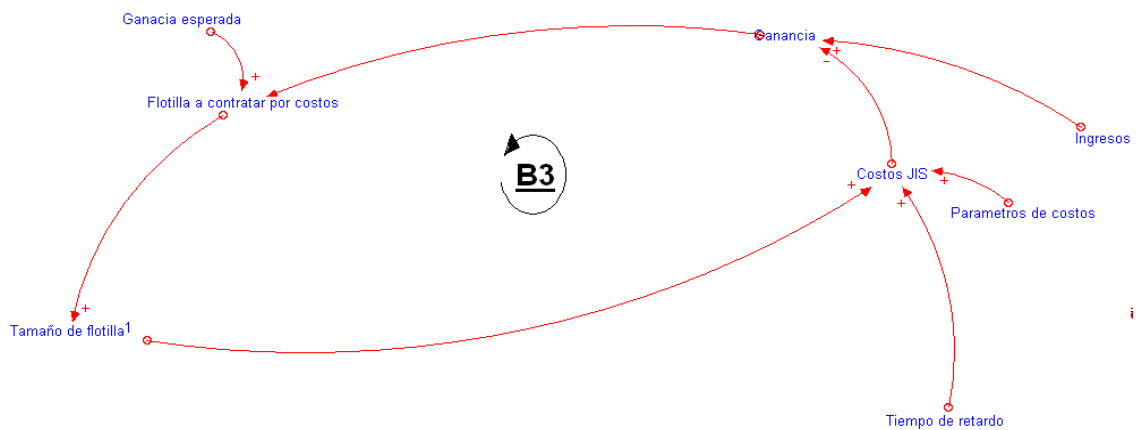
aumento del tiempo estimado de operación entre el uso de un mismo vehículo. Este aumento del tiempo de operación comparado con el tiempo que demanda los viajes requeridos para cumplir con la demanda de mercancía se traduce en un decremento en el tiempo de retardo sobre los horarios establecidos de entrega. Con lo que una disminución de dicho tiempo de retardo aunado a una mayor diferencia con el tiempo de cobertura permitido por la planta manufacturera para mantener un buffer en sus instalaciones, se tiene nuevamente una necesidad de menos vehículos a contratar que los que normalmente se subcontratan. Y como se comentó, si el operador toma la decisión de subcontratar menos vehículos habrá una disminución del tamaño de flotilla y con ello, aumenta el riesgo para cumplir con la demanda futura.



**Figura 4.6** Bucle B2

El tercer bucle **B3** (ver figura 4.7) es también un bucle de balanceo (ver figura 4.7) contempla el conjunto de causalidades entre las variables: tamaño de flotilla, costos JIS, parámetros de costos, demanda de viajes, ingreso, ganancia, y flotilla a contratar por costos. El cual considera que un crecimiento en la cantidad de vehículos subcontratados para la operación tiene un efecto positivo sobre los costos JIS, es decir, a medida que uno crece el otro también crece, considerando además los parámetros estimados referentes a los costos de almacén, sistema, manipulación, y principalmente los costos de transporte. El aumento del costo JIS, tras diferenciarlo con los ingresos adquiridos por la empresa por el pago que recibe por la mercancía abastecida en cada viaje, causa una reducción en la ganancia económica por la

operación. Lo cual a su vez, comparada con la ganancia esperada por la empresa y en función del criterio de subcontratación por el nivel de costos aplicada a dicha comparación, provoca de igual forma que los bucles anteriores, la necesidad de reducir la cantidad de vehículos subcontratados actualmente. Sí el tomador de decisiones elige reducir los vehículos contratados, entonces al siguiente día de labores se tendrá un tamaño de flotilla menor. Dicho comportamiento nos permite definir al bucle como de balanceo.

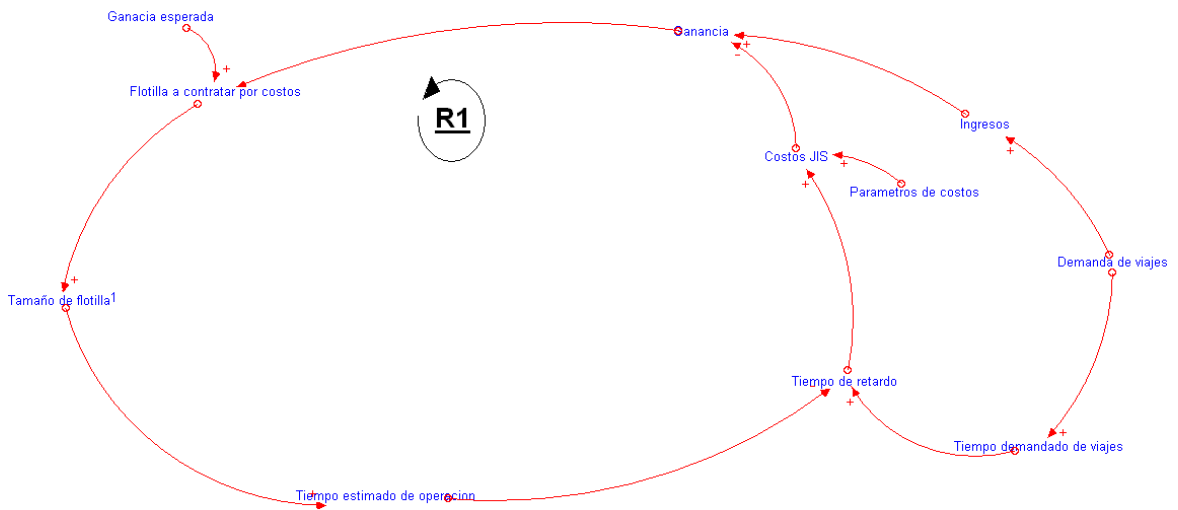


**Figura 4.7** Bucle B3

El cuarto bucle **B4** (ver figura 4.8) es un bucle de reforzamiento. A través de las interrelaciones entre las variables: tamaño de flotilla, tiempo de operación, tiempo de retardo, tiempo demandado de operación, costos JIS, ingresos, ganancia, y flotilla a contratar por costos; se explica cómo un aumento en el tamaño de flotilla producirá un efecto crecimiento sobre el mismo tamaño de flotilla al transcurrir la información por el bucle definido. Considerando que el aumento en el tamaño de flotilla propicia el aumento del lapso de operación de dicho parque vehicular. Y que como se comentó, este aumento del tiempo de operación comparado con el tiempo demandado por los viajes requeridos, provoca un decremento del tiempo de retardo, el cual al no exceder el tiempo de cobertura definido no produce penalización económica alguna que afecte

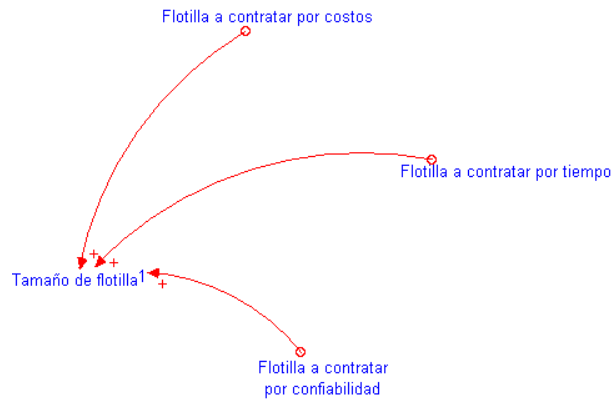
el costo JIS, es decir, que se disminuyen los costos JIS en función de la disminución del tiempo de retardo.

Al tener menos costos JIS y mayor ingreso por el cumplimiento de la demanda habrá un efecto inverso sobre la ganancia, esto es, que como decrece el costo entonces la ganancia crece. Con un mayor rango de ganancia, tras alcanzar o superar la ganancia esperada por empresa, consecuentemente la empresa tiene la posibilidad de contratar más vehículos de los que en la actualidad contrata, esto basado por un criterio de costos. Finalmente, si la empresa decide contratar más vehículos entonces aumenta el tamaño de flotilla factible a usar en la operación del abastecimiento en secuenciado.



**Figura 4.8** Bucle B4

Como se explica en los bucles del sistema, la decisión de subcontratar más o menos vehículos se basa en tres criterios: por confiabilidad, por tiempo y por costos. Por lo que la decisión, para el caso de estudio, estableció un promedio ponderado de las tres recomendaciones de subcontratación (ver figura 4.9). Dicha ponderación fue determinada por la empresa, según sus propios intereses.



**Figura 4.9** Criterios de decisión

Un punto importante sobre el modelo, es que además de realizar el cálculo de los índices de confiabilidad, tiempo y costos, en función de la demanda de viajes del actual día de trabajo, permitió evaluar el desempeño que tuvo la flotilla frente a dicha demanda real. Sin embargo, para introducir el enfoque preventivo y proactivo sobre dicha decisión del tamaño de flotilla, un efectivo pronóstico de la demanda de viajes permitió mitigar la incertidumbre sobre el sistema.

Después de establecer la hipótesis dinámica, se buscó cumplir con el objetivo principal de la modelación en Dinámica de Sistemas, que es el de la comprobación de que la estructura propuesta sobre el sistema descrito por su hipótesis dinámica, simule el comportamiento real del sistema de abastecimiento. Aspecto fundamental para exponer y evaluar diversos escenarios o políticas de gestión del sistema JIS, que permitieran la toma de decisiones idóneas con base al comportamiento variable de la operación. Así el siguiente paso del proceso de modelado fue la traducción del modelo cualitativo a un modelo cuantitativo.

#### **4.4. Modelo de simulación**

Para establecer el modelo de simulación un importante apoyo son los Diagramas de Forrester. De este modo, aunque la adaptación del modelo cualitativo al modelo de

simulación no es una traducción explícita del conjunto de variables y relaciones, si se conserva su estructura y propósitos. Esto se logra a través de clasificar las variables operativas del sistema en variables de nivel, variables de flujo, o variables auxiliares. Tales interacciones del modelo son las que se representan mediante ecuaciones matemáticas. La formulación básica de estas variables en Dinámica de Sistemas considera una ecuación integral para calcular el valor de las variables de nivel y una ecuación diferencial para el cálculo del valor de las variables flujo. En este sentido, es importante señalar la clasificación de variables utilizadas para el desarrollo de nuestro modelo (ver tabla 4.1).

V. nivel	V. flujo	V, auxiliares
Tamaño de flotilla	Flotilla a contratar	Demanda de viajes por periodo
Confiabilidad esperada	Tiempo estimado por periodo	Decisión por confiabilidad
Tiempo estimado acumulado	Tiempo demandado por periodo	Decisión por tiempo
Tiempo demandado acumulado	Costo por periodo	Decisión por costos
Costo JIS	Costo fijo diario	Confiabilidad operativa por periodo
Ingreso diario	Ingreso por periodo	Tiempo de retardo
		Ganancia
		Tiempo medio de operación

**Tabla 4.1** Clasificación de variables

Además, se identificaron otras variables definidas como parámetros del modelo, las cuales son:

- Flotilla inicial
- Confiabilidad requerida
- Costos de sistema, de almacén, de manipulación, de traslado, de penalización

- Tiempo de cobertura
- Ingreso neto por mercancía
- Ganancia esperada
- Jerarquía de criterios
- Ponderación de criterios

Particularmente debido al enfoque dado a esta investigación, la definición de las ecuaciones relacionadas al índice de confiabilidad y de tiempo es resultado del análisis de confiabilidad practicado sobre los tiempos observados de la operación del abastecimiento. Esto implementando la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad. Mientras que las ecuaciones relacionadas al índice de costo son el resultado del análisis de costos logísticos aplicando la función de costos JIS. Antes de exponer dichas ecuaciones, se presentan el análisis de confiabilidad correspondiente a la operación de CEVA Logistics.

#### **4.4.1. Evaluación de confiabilidad**

A continuación se presenta los resultados particulares a la operación de la empresa, siguiendo el procedimiento de tres pasos para el análisis de confiabilidad: 1) identificación de fallas, 2) definición de enfoque de análisis, y 3) estimación del índice de confiabilidad.

Para el primer paso, debido a la exigencia de la empresa por garantizar la no-disrupción del proceso de entrega, se identificó como la principal falla que afecta su nivel de servicio, el retraso del abasto de autopartes a la línea de ensamble de GM respecto a los tiempos establecidos por el programa de producción de GM. Así, el análisis de confiabilidad se centró en analizar los tiempos de operación para evitar que se excediera el tiempo de cobertura asociado a los inventarios en buffer de CEVA en GM.

Para el segundo paso, con los tiempos de operación como objeto de estudio en este análisis, se estableció que el enfoque correcto es el de análisis de probabilidad de tiempos de traslado. Para la operación de CEVA, se consideró no sólo el tiempo de traslado entre sus instalaciones y las de GM, sino todo el tiempo de las actividades en que participan los vehículos y que conforman la secuencia del proceso de abastecimiento.

Por lo que, para el tercer paso se estimó el correspondiente índice de confiabilidad respecto al análisis de los tiempos de operación y los actuales factores operativos. Considerando que existen dos factores que influyen en la estimación de la probabilidad de falla en el sistema, tamaño de flotilla y tiempo demanda de operación, se aplicó la teoría de Modelos Jerárquicos de Probabilidad para formular la función de densidad bivariada de probabilidad que determina mediante su integral el índice de probabilidad de no-falla (confiabilidad). Para ello, en primera instancia, se definió la PDF bivariada conjunta a estimar;

$$f(t, v) = f(t | v)f(v) \dots \dots \dots (4.1)$$

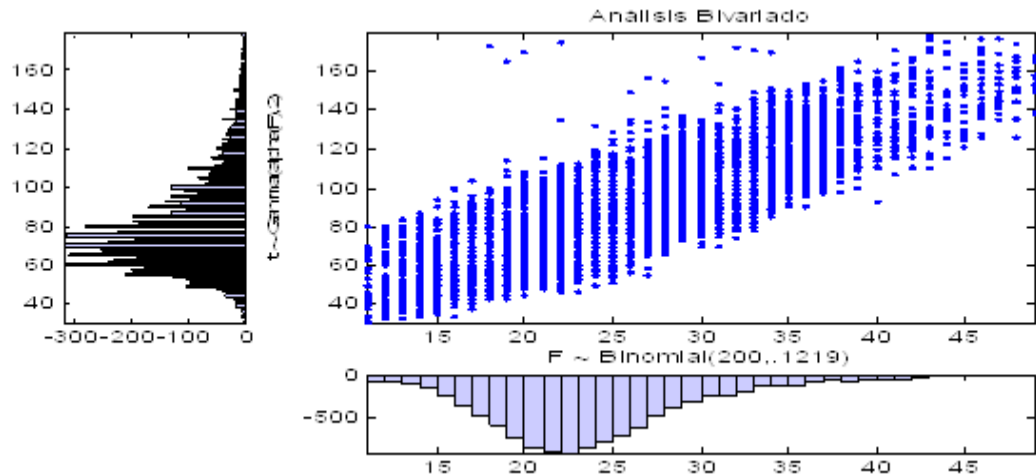
Dónde:

$v$  : Tamaño de flotilla.

$t$  : Tiempo de operación

Los datos bivariados  $(t, v)$  se obtuvieron de obtener muestras de la información durante el primer semestre del presente año. Dado que se cumple el supuesto de dependencia entre las variables  $v$  y  $t$ , entonces fue justificado la aplicación de los Modelos Jerárquicos para definición de la PDF bivariada. Dicha dependencia se validó gráficamente mediante la dispersión de los datos bivariados (ver figura 4.10); y numéricamente con el cálculo de la covarianza entre  $v$  y  $t$ , el cual es igual a 0.7976, lo cual es diferente de cero.





**Figura 4.10.** Relación dependiente entre  $v$  y  $t$

Es entonces que se describe el resultado de la aplicación del algoritmo de la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad. Para facilitar los cálculos de este análisis se utilizó el software MatLab®.

I Se tomó la muestra  $X = \{t, v\}$

II A fin a formular la PDF condicional,  $f(t | v)$ :

II.i Se formaron 27 submuestras univariadas de los datos de  $t$ . Los datos de cada submuestra de  $t$  son los asociados a uno de los 27 tamaños de flotilla, el rango del tamaño de flotilla es que 10 a 36 vehículos.

II.ii Para cada muestras se realizó un análisis de ajuste a diversos modelos de probabilidad. Considerando que la variable  $t$  es continúa, el ajuste se hizo a los modelos: Exponencial, Valor Extremo, Gamma, Lognormal, y Weibull. Tras estimar los parámetros para cada modelo (ver figura 4.11), se muestran los ajustes entre dichos modelos y los datos muestrados. Con dichos ajustes se observa que el modelo probabilístico que mejor se ajusta a la mayoría de las submuestras es el modelo Lognormal. Esto es validado analíticamente con las pruebas de bondad de ajuste  $R^2$ ,  $R^2$  ajustada, Prueba de Kolmogorov-Smirnov. Prueba de Anderson-Darling, y Prueba AIC. Una muestra de dicha validación, se observa en las siguientes tablas, en las que se muestra los índices de ajuste para la muestra asociada a  $v=20$  y  $v=25$ .

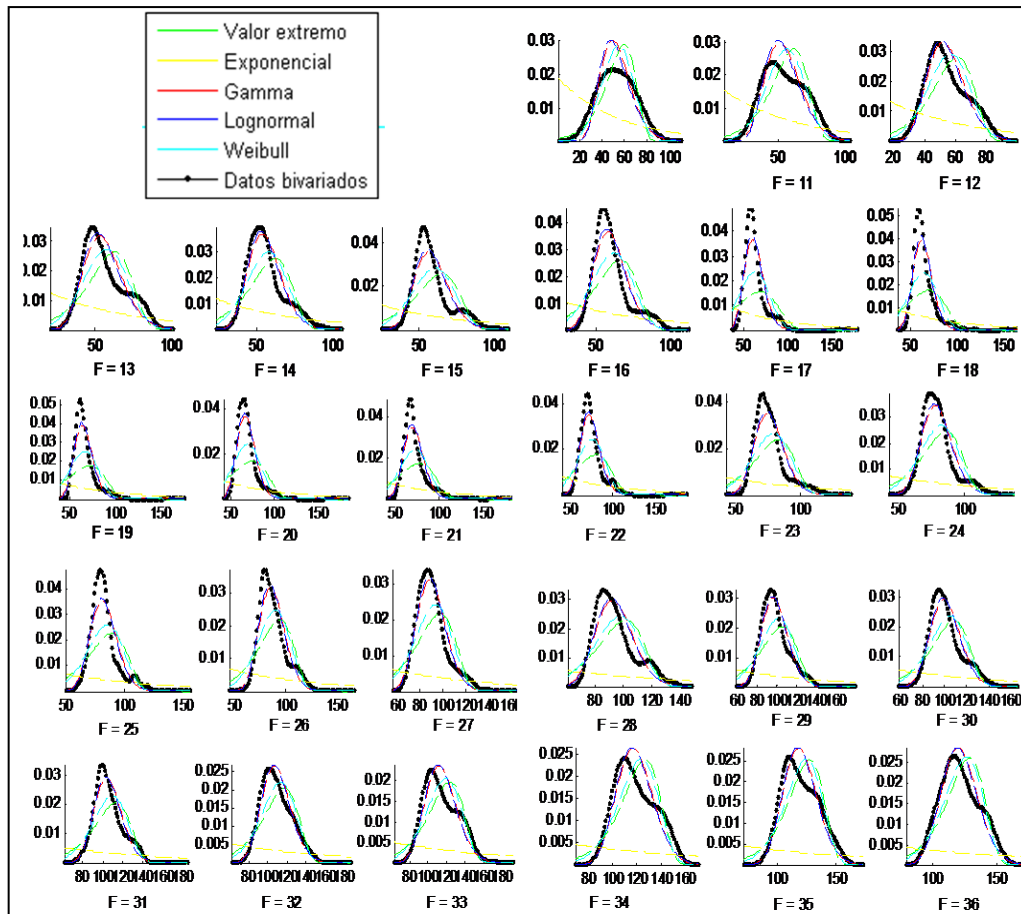


Figura 4.11 Ajuste probabilístico a la PDF condicional

$v=20$	Anderson-Darling				
	R2	R2 adj	Kolgomorov	Darling	AIC
Valor extremo	0.86841	0.86826	0.17733	NaN	15172
Exponencial	0.47144	0.47113	1.71E-08	22.738	17931
Gamma	0.98311	0.98309	0.47059	43.799	13390
Lognormal	<b>0.98704</b>	<b>0.98702</b>	<b>0.6072</b>	<b>42.291</b>	<b>13282</b>
Weibull	0.94686	0.94679	0.47059	NaN	14129

$v=25$	Anderson-Darling				
	R2	R2 adj	Kolgomorov	Darling	AIC
Valor extremo	0.9169	0.91681	0.098262	NaN	16225
Exponencial	0.42647	0.42616	2.85E-09	23.83	20181
Gamma	0.98519	0.98517	0.65	31.376	14936
Lognormal	<b>0.98844</b>	<b>0.98843</b>	<b>0.78481</b>	<b>30.607</b>	<b>14848</b>
Weibull	0.95587	0.95582	0.39258	26.373	15581

Tabla 4.2 Pruebas de ajuste para  $v=20$  y  $v=25$

II.iii Al observar que el modelo que mejor y más veces se ajustó a las submuestras de  $t$ , es el modelo Lognormal entonces se toma la forma general de su PDF asociada, esta es:

$$f(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad 0 < t < \infty, \quad \mu, \sigma > 0$$

II.iv Dado que el propósito fue establecer la relación,

$$f(t, v) = f(t, \mu, \sigma)$$

Así, la tarea fue establecer la relación entre los parámetros del modelo Lognormal,  $\mu, \sigma$ , y los valores del tamaño de flotilla asociados a cada submuestra, de la que se obtuvo los valores  $\mu, \sigma$ , correspondientes. Para ello se realizó un ajuste polinomial para el conjunto de parámetros de escala y otro ajuste polinomial para el conjunto de parámetros de forma versus  $t$ . De donde resultó, los polinomios:

- Polinomio de orden 4 de  $\mu$  vs  $v$ , (ver figura 4.12)

$$\mu = (7.683e - 7)v^4 - (1.207e - 4)v^3 + (6.236e - 3)v^2 - (0.09231)v + 4.377$$

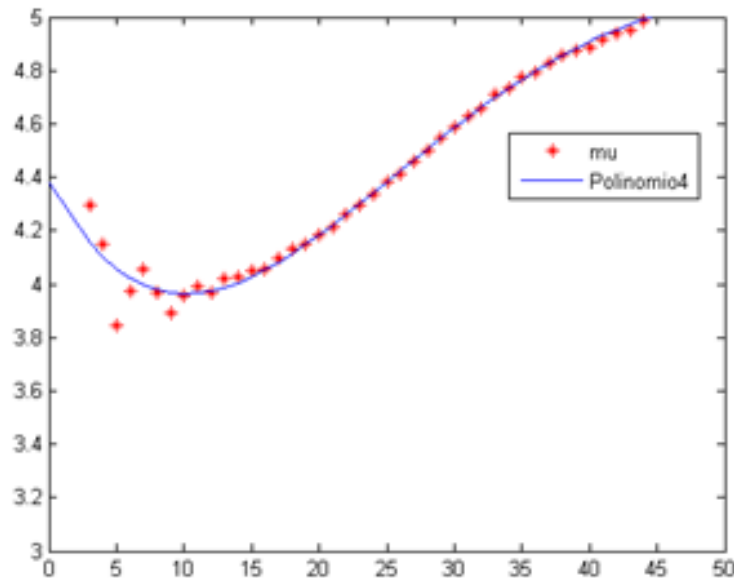


Figura 4.12  $\mu$  vs  $v$

- Polinomio de orden 3 de  $\sigma$  vs  $v$ , (ver figura 4.13):

$$\sigma = -(5.017e - 7)v^3 + (5.813e - 4)v^2 - (0.02497)v + .5050$$

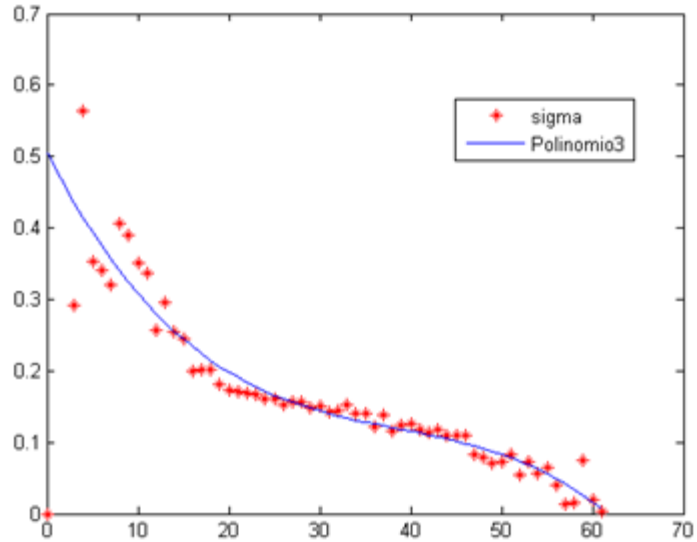


Figura 4.13  $\sigma$  vs  $v$

Con estas funciones se pudo entonces definir la PDF condicional.

II.v Dicha PDF condicional se definió de la siguiente manera:

$$f(t, \mu, \sigma) = f(t|v) =$$

$$\frac{e^{-\frac{(\ln t - ((7.683e-7)v^4 - (1.207e-4)v^3 + (6.236e-3)v^2 - (0.09231)v + 4.377))^2}{2(-5.017e-7)v^3 + (5.813e-4)v^2 - (0.02497)v + .5050)}}}{(-5.017e-7)v^3 + (5.813e-4)v^2 - (0.02497)v + .5050)} \frac{1}{t\sqrt{2\pi}} \dots .4.2$$

III Dado que sólo es una PDF condicional a formular, entonces el algoritmo indica que el siguiente paso fue determinar la PDF marginal respecto a los datos del tamaño de flotilla. Así, se tomó la muestra de tamaños de flotilla empleados en los periodos de operación. Dado que estos datos indican que la variable  $f$  es una variable discreta, entonces se realizó el ajuste a los modelos probabilísticos: Poisson, Binomial, y Binomial Negativa. De igual forma, se utilizó el software MatLab para efectuar el análisis probabilístico. Donde en base a las pruebas de bondad, resultó que el mejor modelo es el de Binomial Negativa. Esto dio como función de la PDF marginal la siguiente fórmula:

$$f(v) = \frac{\Gamma(m+v)}{\Gamma(m)\Gamma(v)} p^m(1-p)^v, \quad v = 1:\infty, \quad 0 < p < 1.$$

En la que,  $m = 36.092$  y  $p = 0.5944$ . Por lo que, numéricamente la PDF marginal es:

$$f(v) = \frac{\Gamma(36.092 + v)}{\Gamma(36.092) \Gamma(v)} 0.5944^{36.092} (1 - 0.5944)^v \dots\dots\dots 4.3$$

IV Finalmente, se definió la PDF conjunta mediante el producto de la ecuación 4.2 y la ecuación 4.3.

$$f(t, v) = f(t | v)f(v)$$

$$= \left[ \frac{e^{-\left(\ln t - \left(7.683e-7\right)v^4 - \left(1.207e-4\right)v^3 + \left(6.236e-3\right)v^2 - \left(0.09231\right)v + 4.377\right)\right)^2}}{2\left(-\left(5.017e-7\right)v^3 + \left(5.813e-4\right)v^2 - \left(0.02497\right)v + .5050\right)^2}} \right]$$

$$\frac{(-\left(5.017e-7\right)v^3 + \left(5.813e-4\right)v^2 - \left(0.02497\right)v + .5050)}{t \sqrt{2\pi}}$$

$$* \left[ \frac{\Gamma(36.092 + v)}{\Gamma(36.092) \Gamma(v)} 0.5944^{36.092} (1 - 0.5944)^v \right] \dots\dots\dots 4.4$$

Además de las pruebas de bondad practicadas a la PDF condicional y a la PDF marginal, en la figura 4.14 se observó la semejanza entre la gráfica de la PDF bivariada obtenida y la gráfica del análisis empírico de probabilidad (Método de Kaplan-Meyer) realizado a los datos bivariados, por lo en relación a esta comparación nos permite validar gráficamente la PDF bivariada.

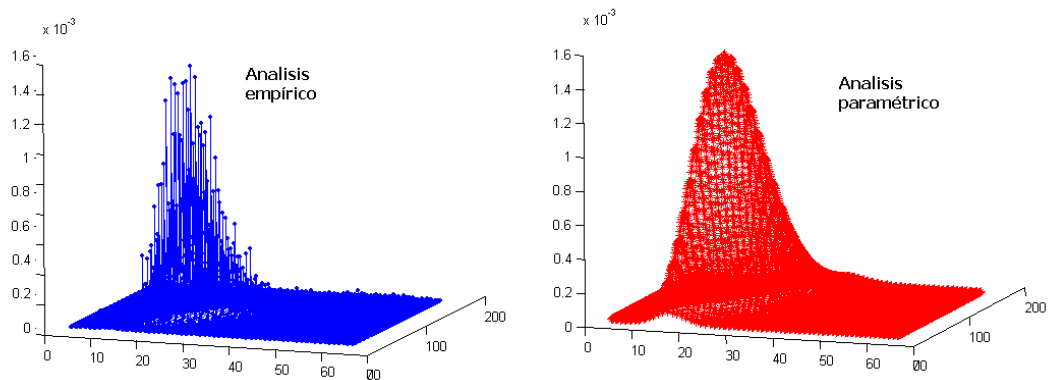


Figura 4.14 Validación gráfica de la PDF bivariada

Una vez, definida la PDF bivariada respecto a las variables tamaño de flotilla ( $v$ ) y la variable tiempo de operación, el objetivo fue determinar la confiabilidad del sistema de cumplir con el tiempo de operación demandado por la CEVA en relación con el tamaño de flotilla que se tiene subcontratado. Aunque la teoría indica que para determinar dicho índice, se debe realizar la integral de la ecuación 4.4,

$$R(t_0, v_0) = 1 - \int_{-\infty}^{v_0} \int_{-\infty}^{t_0} f(t, v) \partial t \partial v \quad \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots 4.5$$

Debido a la complejidad de realizar dicha integral, nuevamente se utilizó MatLab para realizar la integración numérica.

De este modo, la conclusión del análisis de confiabilidad dio como resultado la evaluación de confiabilidad del sistema de abastecimiento de CEVA Logistics, en donde con base en el tamaño de flotilla de 25 vehículos actualmente subcontratados y un tiempo promedio requerido para cumplir con la demanda de viajes de 76 minutos, se tuvo una confiabilidad de  $R(19, 25) \approx 0.20 = 20\%$  de probabilidad de que con los 25 vehículos se pueda cubrir toda la demanda de viajes de un lapso igual o mayor de 76 minutos. Siempre considerando que el tiempo establecido para cada ciclo de operación de cada vehículo es de 80 minutos.

**4.4.2. Ecuaciones del modelo dinámico**

Para la exposición de las ecuaciones del modelo de simulación nos apoyaremos en los diagramas de Forrester. Éstos se estructuran a partir de los bucles definidos sobre la conducta del sistema, así que en relación a la explicación de los bucles B1, B2 y B4, es que se formularon las ecuaciones del modelo.

Para iniciar, se tiene que el bucle **B1** se traduce en el siguiente diagrama de Forrester (ver figura 4.14).

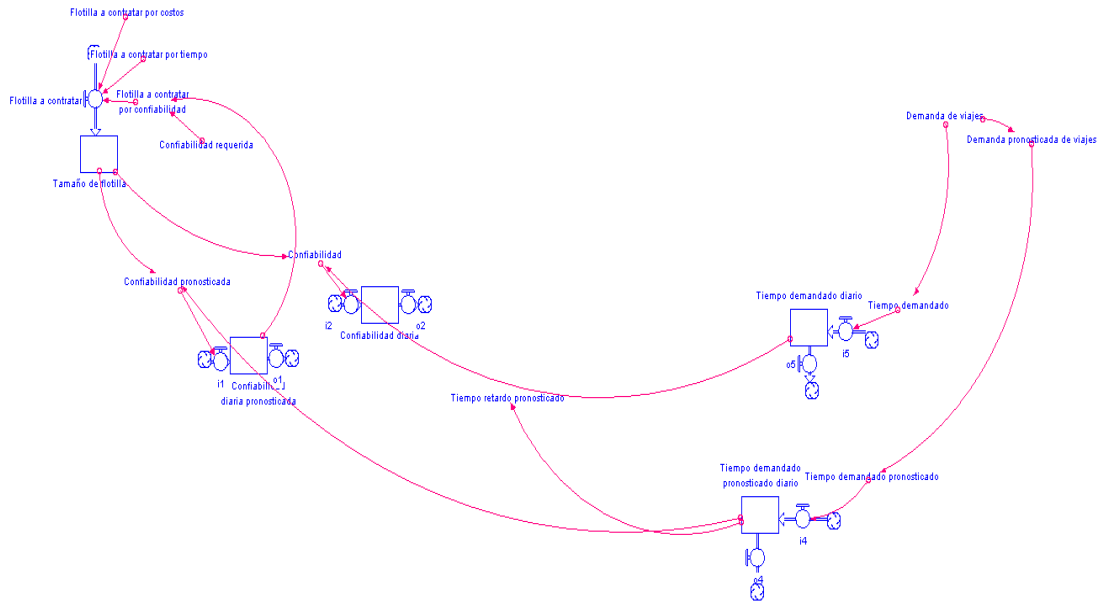


Figura 4.15 Diagrama de Forrester sobre el bucle B1

En este diagrama se definen las ecuaciones respectivas para cada tipo de variable, según se especifica a continuación:

- Variables de nivel
- Variables flujo
- Variables auxiliares o parámetros

Para la variable principal del modelo, *tamaño de flotilla* de la fórmula fue la siguiente:

$$\square \text{ Tamaño\_de\_flotilla}(t) = \text{Tamaño\_de\_flotilla}(t - dt) + (\text{Flotilla\_a\_contratar}) * dt$$

$$\text{INIT Tamaño\_de\_flotilla} = \text{Flotilla\_inicial}$$

Esta consideró que *tamaño de flotilla* solo cambiaba en función de su valor actual y del número vehículos a contratar recomendado para el siguiente periodo, considerando que el valor inicial de la variable es el tamaño de flotilla que actualmente emplea, el cual es de 25. Para el cálculo de *flotilla a contratar* la ecuación definida fue:

$$\square \text{ INFLOWS: Flotilla\_a\_contratar} =$$

$$\begin{aligned}
 & (\text{Criterio}_1) * \text{Decision}_{\text{por\_confiabilidad}} + & (\text{Criterio}_2) * \text{Decision}_{\text{por\_tiempo}} \\
 & + (\text{Criterio}_3) * \text{Decision}_{\text{por\_costo}}
 \end{aligned}$$

Esta consideró un promedio ponderado de las flotillas a contratar por los tres criterios, el valor de esta ponderación debió ser asignada por la empresa. A partir del valor de *tamaño de flotilla*, por un lado junto con el de *tiempo demandado diario* se estima el índice de *confiabilidad operativa* del sistema de entregas que permite evaluar el rendimiento actual del parque vehicular frente a la demanda real de viajes; mientras que por otro lado, junto con el tiempo demandado pronosticado diario se estima el índice de *confiabilidad pronosticada* que permitirá establecer el porcentaje de garantía de que con el actual tamaño de flotilla se cumpla con la demanda esperada para el día de operación siguiente. Antes de mostrar la ecuación de confiabilidad (la cual es la misma para *confiabilidad operativa* y *confiabilidad pronosticada*, sólo variando el resultado por el valor del tiempo) se establecen las ecuaciones que permiten definir el valor de las variables *tiempo demandado diario* y *tiempo demandado pronosticado diario*.

En primera instancia, se sabe que la variable *demanda de viajes* debe ser considerada como una variable exógena, por lo que su valor es introducido a priori. A partir del número de viajes requeridos para cada periodo de operación se realizó un pronóstico sobre la misma demanda de viajes para el mismo periodo de operación pero para el día siguiente de operaciones. Particularmente, el método que se empleó para realizar un efectivo pronóstico es el método de Winter, el cual no se explicará en este documento pero que puede revisado en el libro de Chopra y Meindl (2008). El valor de este pronóstico es adoptado en la variable *demanda pronosticada de viajes*. Una vez determinados los valores de las demandas, éstos son empleado para estimar el *tiempo demandado* y el *tiempo demandado pronosticado*, respectivamente. Dichos valores se estiman por medio de la función de valor esperado obtenida del análisis de confiabilidad, esta es expresada analíticamente de la siguiente forma:



$$E(t|v) = \int_{-\infty}^{\infty} tf(t, v)dt$$

Debido a la complejidad de dicha integral, se realizaron los cálculos en MatLab y su resultado numérico fue adaptado en tablas de asignación, arrojando lo siguiente:

○ Tiempo\_demandado = GRAPH(Demanda\_de\_viajes)

Tiempo de mandado	GRAPH(Demanda de viajes)	Tiempo de mandado	GRAPH(Demanda de viajes)	Tiempo de mandado	GRAPH(Demanda de viajes)
10	55	19	65	28	93
11	55	20	68	29	97
12	55	21	70	30	100
13	56	22	73	31	102
14	57	23	76	32	104
15	58	24	79	33	106
16	60	25	83	34	106
17	61	26	86	35	105
18	63	27	90	36	105

**Figura 4.3** Relación: demanda de viajes vs tiempo demandado

Esta misma asignación se emplea para el cálculo de *tiempo demandado pronosticado* en función de *demanda pronosticada de viajes*. A su vez, el valor resultante del tiempo demandado determina el *tiempo de operación diario*, este representa el tiempo total del día de operaciones que exige cubrir la *demanda de viajes*, y que se reinicia cada día, la ecuación que representa esta relación es:

□ Tiempo\_demandado\_diario(t) = Tiempo\_demandado\_diario(t - dt) + (input - output) \* dt

INIT Tiempo\_demandado\_diario = 0

⚙ INFLOWS: input = IF MOD(TIME,15)=0 THEN 0 ELSE Tiempo\_demandado

⚙ OUTFLOWS: output = pulse(Tiempo\_demandado\_diario,15,15)

Considerando que la entrada de información es constante (*tiempo demandado*) y la salida (*tiempo demandado diario*) es solo al final de cada día de operaciones. La ecuación de tiempo demandado pronosticado diario es igual, solo se modificó el *tiempo*

*demandado por tiempo demandado pronosticado*. Tras el cálculo de estas variables, es entonces que se pudo estimar el valor de *confiabilidad operativa* y *confiabilidad pronosticada*. Para ello se utilizó la PDF bivariada obtenida del análisis de confiabilidad, expresado como sigue:

$$R(t, v) = 1 - \int_{-\infty}^v \int_{-\infty}^t f(t, v) \partial t \partial v$$

Ello con  $t$  como *tiempo medio demandado diario* y  $v$  como *tamaño de flotilla*. Pero como ya se ha comentado, el resultado numérico de esta integral fue establecido en una tabla de asignación, tanto para el valor de *confiabilidad operativa* y de *confiabilidad pronostica*. El resultado de confiabilidad operativa evalúa el desempeño que tuvo el actual tamaño de flotilla a cubrir la demanda real promedio de viajes respecto al tiempo medio requerido. Los valores de ambas confiabilidades se registran para asignar la confiabilidad diaria y la confiabilidad pronosticada diaria, respectivamente al actualizarse *tiempo demandado diario* y *tiempo demandado pronosticado diario*, matemáticamente esto se representa con las ecuaciones siguientes:

□ Confiabilidad\_diaria(t) = (input - output) \* dt

INIT Confiabilidad diaria = 0.19

↻ INFLOWS: input = pulse(Confiabilidad\_operativa,15,15)

↻ OUTFLOWS: output = pulse(Confiabilidad\_operativa,15,15)

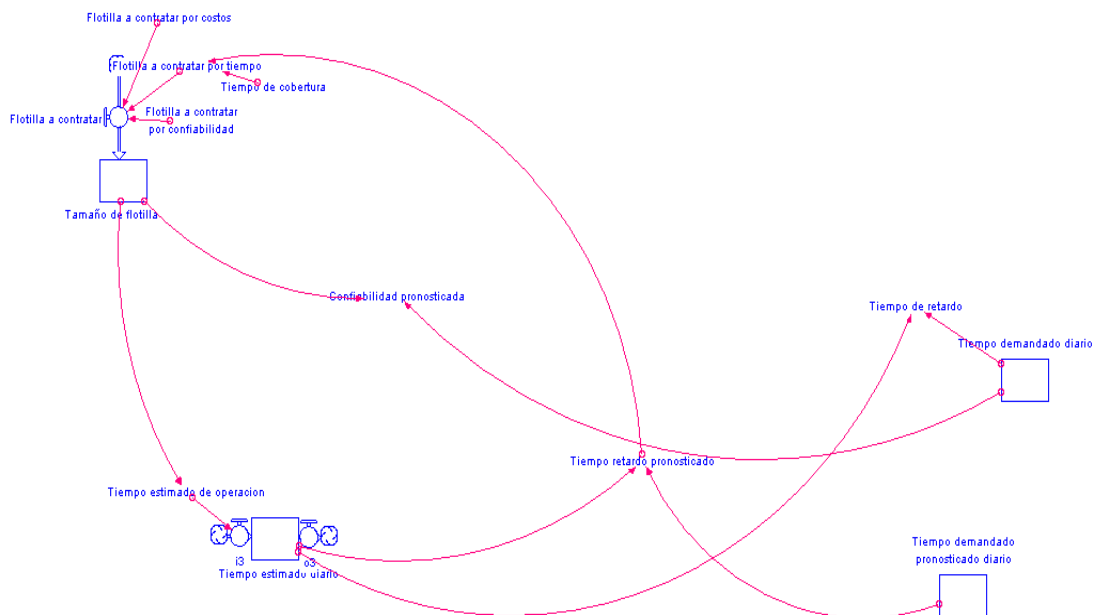
Esta misma ecuación se empleó para evaluar *confiabilidad diaria pronosticada* solo modificándola por la variable *confiabilidad\_pronosticada*. Finalmente, la ecuación que cierra el bucle es la relacionada con el cálculo de la decisión de flotilla a contratar por el criterio de confiabilidad, esta es la siguiente:

○ Flotilla\_contratar\_por\_confiabilidad = pulse(Flotilla\_requerida-Flotilla\_para\_pronostico,15,15)

Esta ecuación indica que al final de los periodos de operación diarios (cada 15 periodos) se recomienda contratar o dejar de contratar la diferencia entre la flotilla actual asociada a la confiabilidad esperada del siguiente día, y la flotilla adecuada para cumplir con el nivel de confiabilidad requerida por la empresa. Siendo el parámetro de confiabilidad requerida:

○  $\text{Confiabilidad\_requerida} = 0.50$

Respecto al bucle B2, las ecuaciones que lo describen se establecen con el siguiente diagrama de Forrester.



**Figura 4.16** Diagrama de Forrester sobre el bucle B2

Además de las descritas previamente, se agregó la ecuación para determinar el valor de *tiempo estimado de operación*, para esta variable se emplea los mismos valores de la tabla de asignación expuesta para *tiempo demandado*, en función del valor de *tamaño de flotilla*.

○  $\text{Tiempo\_estimado} = \text{GRAPH}(\text{Tamaño\_de\_Flotilla})$

Que a su vez establece el valor del *tiempo estimado diario*, mediante la ecuación:

$$\square \text{Tiempo\_estimado\_diario}(t) = \text{Tiempo\_estimado\_diario}(t - dt) + (\text{input} - \text{output}) * dt$$

$$\text{INIT Tiempo\_estimado\_diario} = 0$$

$$\text{INFLOWS: input} = \text{IF MOD}(\text{TIME}, 15) = 0 \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } \text{Tiempo\_estimado\_de\_operacion}$$

$$\text{OUTFLOWS: output} = \text{pulse}(\text{Tiempo\_estimado\_diario}, 15, 15)$$

En la que se observa que el valor del *tiempo estimado de operación* de cada periodo se acumula a través del tiempo y se reinicia al final de cada día de operaciones. El objetivo de calcular su valor es para diferenciarlo, primero con el *tiempo demandado diario* para evaluar el *tiempo de retardo*, y segundo con el *tiempo demandado pronosticado diario* para evaluar el *tiempo de retardo pronosticado*, de esto resultan las siguientes ecuaciones:

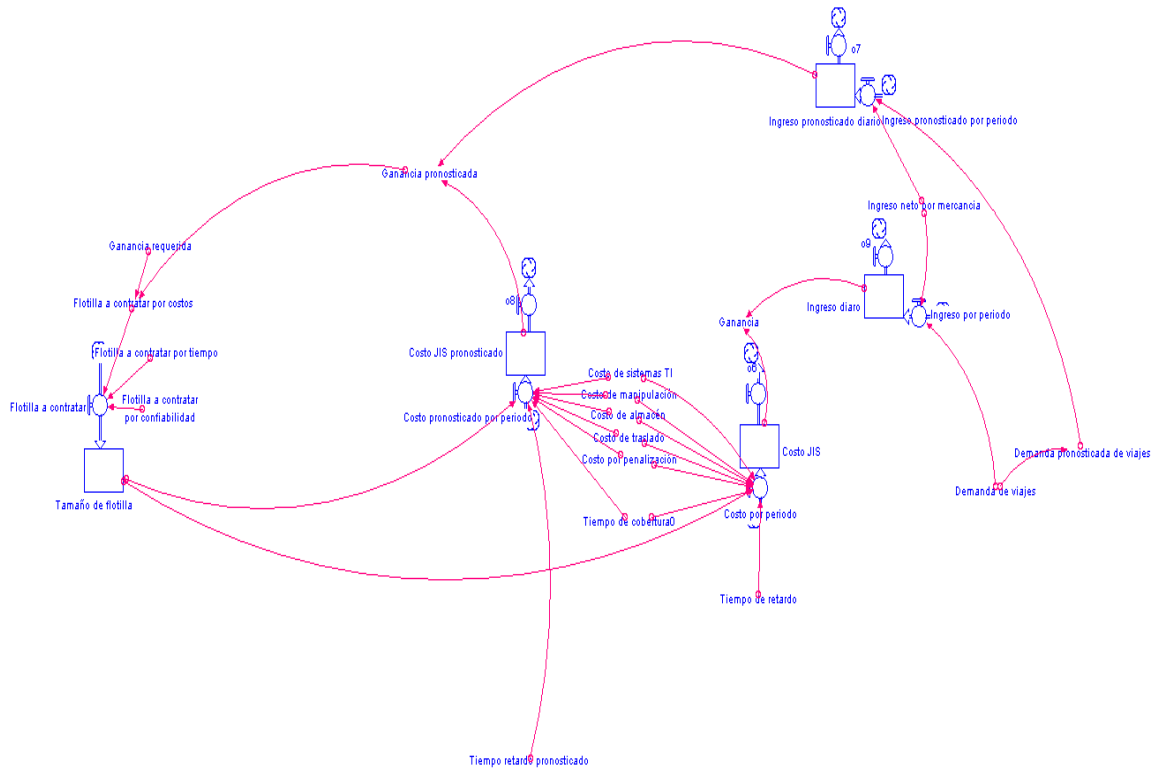
$$\circ \text{Tiempo\_de\_retardo} = \text{Tiempo\_demandado\_diario} - \text{Tiempo\_estimado\_diario}$$

$$\circ \text{Tiempo\_de\_retardo\_pronosticado} = \text{Tiempo\_demandado\_pronosticado\_diario} - \text{Tiempo\_estimado\_diario}$$

El propósito del valor *tiempo de retardo* sirve para evaluar el comportamiento que tiene el tamaño de flotilla a través del factor tiempo, frente a la demanda de viajes para el abastecimiento de las autopartes de CEVA a GM con la misma unidad de medida, el factor tiempo. Mientras que el propósito del valor de *tiempo de retardo pronosticado* sigue la misma idea, solo que en relación a la demanda pronosticada. Además que este último es utilizado para establecer el valor de *flotilla a contratar por tiempo*, esto mediante la ecuación:

$$\circ \text{Flotilla\_a\_contratar\_por\_tiempo} = \text{pulse}(\text{round}(\text{Tiempo\_de\_retardo\_pronosticado}/15/\text{Razon\_de\_tiempo}), 15, 15)$$

En donde el parámetro *razón de tiempo* indica la razón de cambio de minutos a número de vehículos en función del tiempo promedio de retardo por periodo, el valor de este parámetro es manipulable según los intereses de la empresa. Finalmente, el resto de las ecuaciones del modelo cuantitativo están asociadas al siguiente diagrama de Forrester, el cual a su vez se asocia al bucle B4:



**Figura 4.17** Diagrama de Forrester sobre el bucle B4

La ecuación que determina el cálculo del costo de la operación es la definida en el análisis de costos logísticos JIS, se expresa como sigue:

$$CT(JIS) = C_{Sist} + C_{Área} + k C_{Man} + V_{act} C_{Trans} + T_{paro} C_{Pena}$$

La adaptación de esta ecuación para incorporarla en el modelo de simulación dio como resultado el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\square \text{ Costo\_JIS}(t) = \text{Costo\_JIS}(t - dt) + (\text{Costo\_por\_periodo} + \text{Costo\_fijo} - \text{output}) * dt$$

INIT Costo\_JIS = 0

INFLOWS: Costo\_por\_periodo = IF Tiempo\_de\_retardo\_actual > Tiempo\_de\_cobertura  
THEN (Tiempo\_de\_retardo\_actual - Tiempo\_de\_cobertura) \*  
Costo\_penalizacion\_por\_unidad  
ELSE 0

INFLOWS: Costo\_por\_periodo = pulse(Tamaño\_de\_Flotilla \* Costos\_de\_traslado +  
Costos\_del\_sistema + Costos\_de\_almacen +  
Costos\_de\_manipulacion ,0,15)

OUTFLOWS: output4 = pulse(Costo\_JIS,15,15)

En la ecuación de la variable de nivel *costo JIS* se observó que el flujo de información de costos varía en relación a la entrada del costo fijo y del costo por periodo, así como la salida de costos JIS, que se activa al final de cada día de operaciones. El *costo fijo* es el costo adyacente de la operación de abastecimiento sin considerar cual sea su comportamiento, para su estimación se empleó el valor del actual tamaño de flotilla y de los demás parámetros de costos. Mientras que la variable *costo por periodo* representó los egresos resultantes por algún retraso superior al tiempo de cobertura. Este mismo sistema de ecuaciones se empleó para calcular el *costo JIS pronosticado*, solo que *tiempo de retardo pronosticado* toma las veces de *tiempo de retardo*. El evaluar *costo JIS* y *costo JIS pronosticado* permitió medir *ganancia* y *ganancia pronosticada*, que representaron la diferencia entre ingresos y egresos económicos, las ecuaciones relacionadas con ello son:

○  $Ganancia = Ingreso\_diario - Costo\_JIS$

○  $Ganancia\_pronosticada = Ingreso\_pronosticado\_diario - Costo\_JIS\_pronosticado$

Como se observa, se requiere el valor de *ingreso diario* para diferenciarlo con *costo JIS*. Dicho valor de *ingreso diario* representa el ingreso acumulado a través del día de operaciones, el cual es obtenido por la entrada constante de ingreso de cada periodo y que se reinicia al final de día de operaciones. Matemáticamente esto se representa de la siguiente manera:

$$\square \text{ Ingreso\_diario} = \text{Ingreso\_diario}(t - dt) + (\text{ingreso\_por\_periodo} - \text{output}) * dt$$

$$\text{INIT Ingreso\_pronosticado\_acumulado} = 0$$

$$\text{INFLOWS: ingreso\_pronosticado\_por\_periodo} =$$

$$\text{Demanda\_de\_viajes} * \text{Ingreso\_neto\_por\_mercancia}$$

$$\text{OUTFLOWS: output} = \text{pulse}(\text{Ingreso\_pronosticado\_acumulado}, 15, 15)$$

Este ingreso por periodo es el adquirido por la empresa resultado de cumplir con los viajes demandados para abastecer el material multiplicado por el ingreso neto que percibe por cada viaje efectuado. Esta misma secuencia de relaciones entre las variables *demanda de viajes pronosticada*, *ingreso por periodo pronosticado*, e *ingreso pronosticado diario*, permiten estimar el valor de *ganancia pronosticada*.

Una vez establecido el valor de *ganancia*, éste es utilizado para valorar el desempeño del tamaño de flotilla que tendrá frente al cumplimiento de la demanda de viajes, esto a través del factor costo. Por su parte, la estimación de *ganancia pronosticada* influye en la determinación de la flotilla a contratar por el criterio de costos, ello mediante la siguiente ecuación:

$$\circ \text{ Flotilla\_a\_contratar\_por\_costos} =$$

$$\text{pulse}(\text{round}((\text{Ganancia\_pronosticada} - \text{Ganancia\_esperada}) / 15 / \text{Razon\_de\_costos}), 15, 15)$$

La cual considera que en relación a la diferencia entre la ganancia pronosticada y la ganancia esperada por la empresa, dividida por la razón de costos se define el

número de vehículos adecuados para compensar dicha diferencia. La asignación de los parámetros ganancia esperada y razón de costos es representada por:

- Ganancia\_esperada = 50000
- Razon\_de\_costos = 400

El conjunto de ecuaciones descritas en esta sección definen el modelo de simulación, el cual fue programado en el software STELLA® y en donde se diseñó un interface para facilitar su manejo. Esto, en primera instancia permitió validar la hipótesis dinámica del sistema de entrega de mercancía de CEVA y segundo, evaluar diversas políticas de gestión sobre el tamaño de flotilla y criterios de decisión.

En la siguiente sección del capítulo se expone la fase de validación de la hipótesis dinámica mediante la comprobación de que el modelo de simulación permite replicar el comportamiento observado y esperado de los modos de referencia del proceso de secuenciado.

#### **4.5. Validación del modelo**

Para esta fase de validación del modelo de simulación, se emplearon cuatro pruebas de validez: i) consistencia dimensional; ii) reproducción del comportamiento; iii) condiciones extremas; y iv) análisis de sensibilidad. Cabe destacar que estas pruebas son particulares del modelado en Dinámica de Sistemas.

##### **4.5.1 Consistencia dimensional**

Para los cuatro bucles que estructuran el modelo del sistema, la transferencia de los efectos entre las variables correspondientes garantiza que cada variable mantenga su unidad dimensional asociada. Esto se observa en la siguiente tabla:



Variable	Unidad dimensional	Variable endógenas
Tamaño de flotilla	$unidades\ vehiculares = unidades\ vehiculares + unidades\ vehiculares$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño de flotilla</li> <li>• Flotilla a contratar por costo</li> <li>• Flotilla a contratar por tiempo</li> <li>• Flotilla a contratar por confiabilidad</li> </ul>
Demanda de viajes	$unidades\ vehiculares$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variable exógena</li> </ul>
Flotilla a contratar por costo	$unidades\ vehiculares = \frac{\frac{pesos}{pesos}}{unidades\ vehiculares}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ganancia</li> <li>• Criterio por costos</li> </ul>
Flotilla a contratar por tiempo	$unidades\ vehiculares = \frac{\frac{minutos}{minutos}}{unidades\ vehiculares}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de retardo</li> <li>• Criterio por tiempo</li> </ul>
Flotilla a contratar por confiabilidad	$unidades\ vehiculares = \frac{\frac{adimensional}{adimensional}}{unidades\ vehiculares}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confiabilidad requerida</li> <li>• Criterio de confiabilidad</li> </ul>
Confiabilidad	$adimensional = (unidades\ vehiculares, minutos)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño de flotilla</li> <li>• Tiempo demandado</li> </ul>
Tiempo estimado de operación	$minutos = f(unidades\ vehiculares)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño de flotilla</li> </ul>
Tiempo demandado	$minutos = f(unidades\ vehiculares)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de viajes</li> </ul>

**Tabla 4.4** Consistencia dimensional

Variable	Unidad dimensional	Variable endógenas
Tiempo de retardo	$minutos = minutos - minutos$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo estimado de operación</li> <li>• Tiempo demandado</li> </ul>
Costo JIS	$pesos =$ $\sum pesos + minutos \left( \frac{pesos}{minutos} \right) +$ $unidades\ vehiculares \left( \frac{pesos}{unidades\ vehiculares} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de sistemas</li> <li>• Costo de manipulación</li> <li>• Costo de almacén</li> <li>• Costos de traslado</li> <li>• Tamaño de flotilla</li> <li>• Costo de penalización</li> <li>• Tiempo de retardo</li> </ul>
Parámetros de costos	$pesos$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variables exógenas</li> </ul>
Ingresos	$pesos = f(unidades\ vehiculares)$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de viajes</li> </ul>
Ganancia	$pesos = pesos - pesos$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingresos</li> <li>• Costos JIS</li> </ul>

**Tabla 4.4** Consistencia dimensional (continuación)

Con lo que podemos validar que el modelo es consistente dimensionalmente en relación a las ecuaciones definidas sobre el mismo.

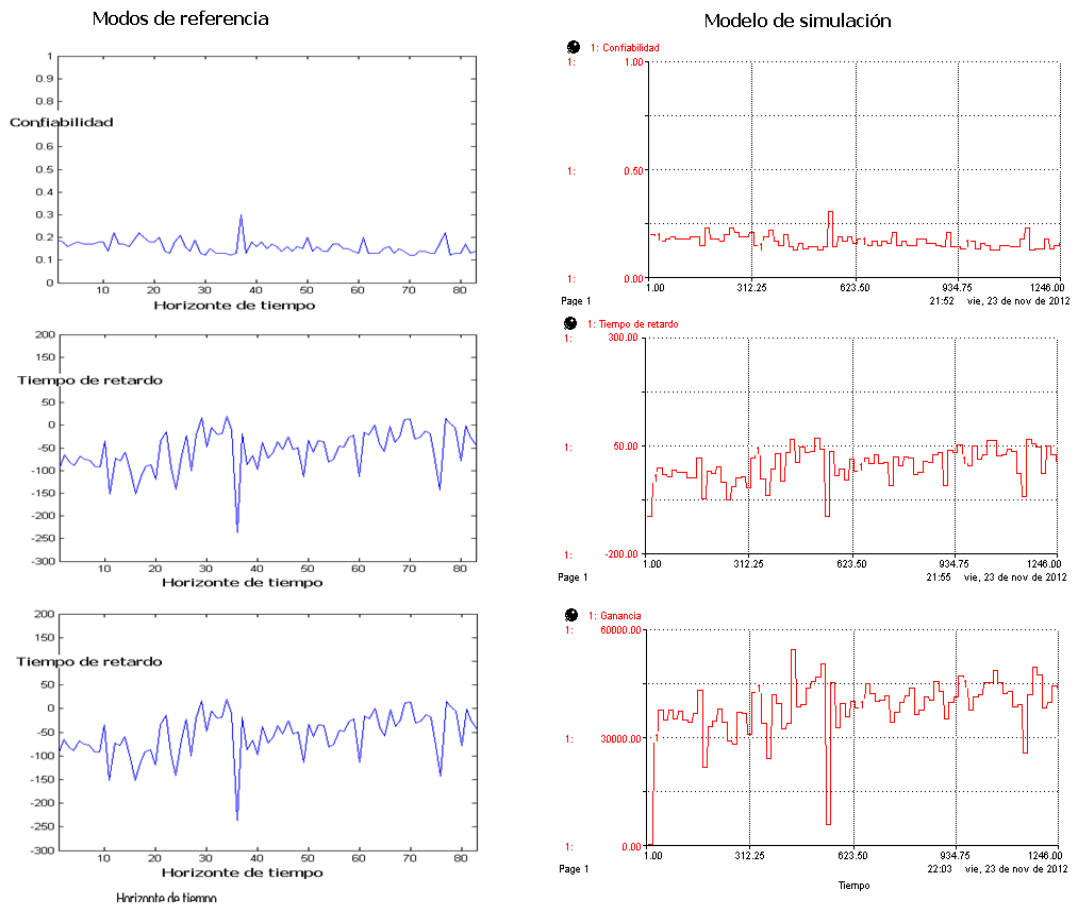
#### 4.5.2 Reproducción del comportamiento

Con esta prueba se corroboró que el modelo reproducía la conducta observada del sistema, ello al compararlo con los modos de referencia preestablecidos. Para esta prueba se emplearon los datos referentes a la actual configuración de los factores del proceso de secuenciado, tales como:

- Flotilla inicial = 25 vehículos
- Confiabilidad requerida = 0.50
- Tiempo de cobertura = 120 min
- Ganancia esperada = \$50,000

- Criterio de confiabilidad = Activo
- Criterio de tiempo = Activo
- Criterio de costo = Activo

Además, los datos de *demanda de viajes* es la correspondiente a los viajes registrados por CEVA hacia GM del primer semestre del presente año. Por lo tanto, el análisis de esta prueba de validación desplegó los siguientes resultados. En primer lugar se tomaron los modos de referencia de los índices de confiabilidad, tiempo de retardo y ganancia económica, para compararlos con las gráficas de los valores de estas mismas variables obtenidos de la ejecución del modelo de simulación, esto en el escenario de no tomar en cuenta las propuestas sobre la flotilla a contratar. En dicha comparación se observa la semejanza entre ambos grupos de gráficas (ver figura 4.18).



**Figura 4.18** Índices de desempeño del modelo de simulación

También se tomó el modo de referencia de la relación entre *tamaño de flotilla* y tiempo para observar y validar que el modelo de simulación reproduce la conducta esperada de la variable *tamaño de flotilla*, en este caso si adoptando las propuestas sobre el número adicional de vehículos a contratar. En la gráfica 4.19 vemos que efectivamente el modelo replica el comportamiento oscilatorio con la tendencia que se esperaba, pero que debido a la ponderación de los criterios dicha tendencia se alcanza en corto tiempo.

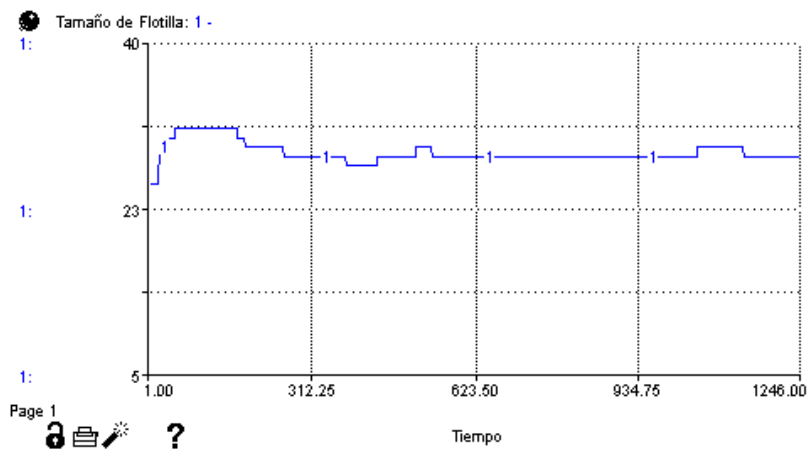


Figura 4.19 Comportamiento de *Tamaño de flotilla* en el modelo de simulación

### 4.5.3 Condiciones extremas

Con relación a la prueba de condiciones extremas, se corroboró que el modelo se comportaba racionalmente frente a escenarios límites del sistema. Particularmente, para la operación de abastecimiento de CEVA, se observa la condición de baja o nula demanda de viajes, a la que el modelo responde planteado la propuesta de que el tamaño de flotilla siga dicha demanda baja, esto se observa en la figura 4.20.

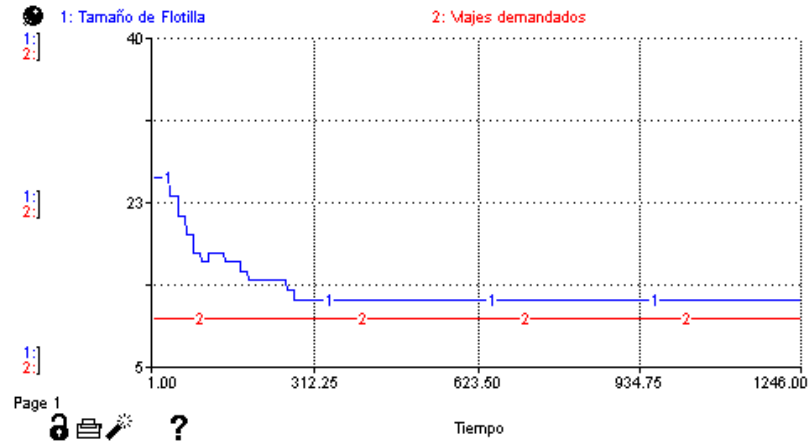


Figura 4.20 Tamaño de flotilla ante baja demanda de viajes

Una serie de condiciones extremas se relacionaron con los índices de desempeño, específicamente de los valores requeridos o esperados de estas variables. Forzando al modelo a tener un comportamiento específico, se fijaron los valores extremos de dichos parámetros. Un ejemplo de ello, es fijar la confiabilidad requerida del sistema en garantizar con un porcentaje de 0% y de 100% para el cumplimiento de la demanda de viajes. Esta conducta se replicó en el modelo de simulación al asignar dichos valores a la variable *confiabilidad requerida*, lo cual se puede validar en la figura 4.21.

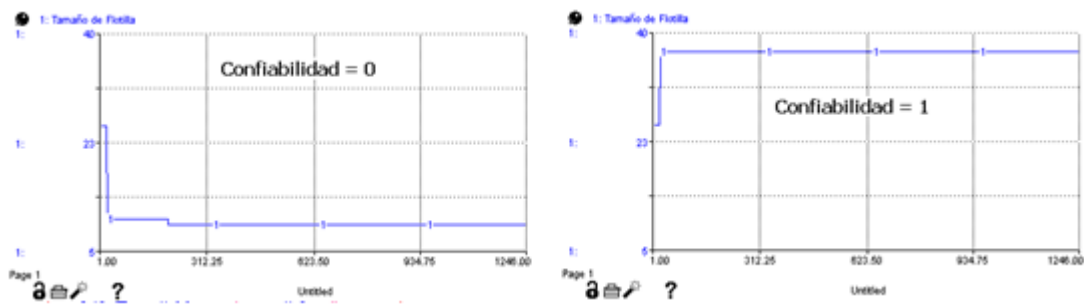
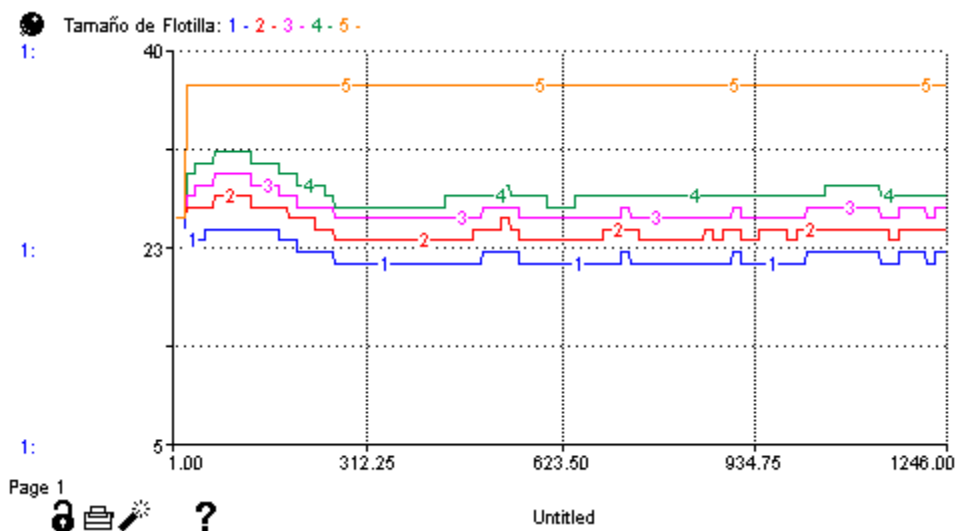


Figura 4.21 Conducta extrema de confiabilidad requerida

#### 4.5.4 Análisis de sensibilidad

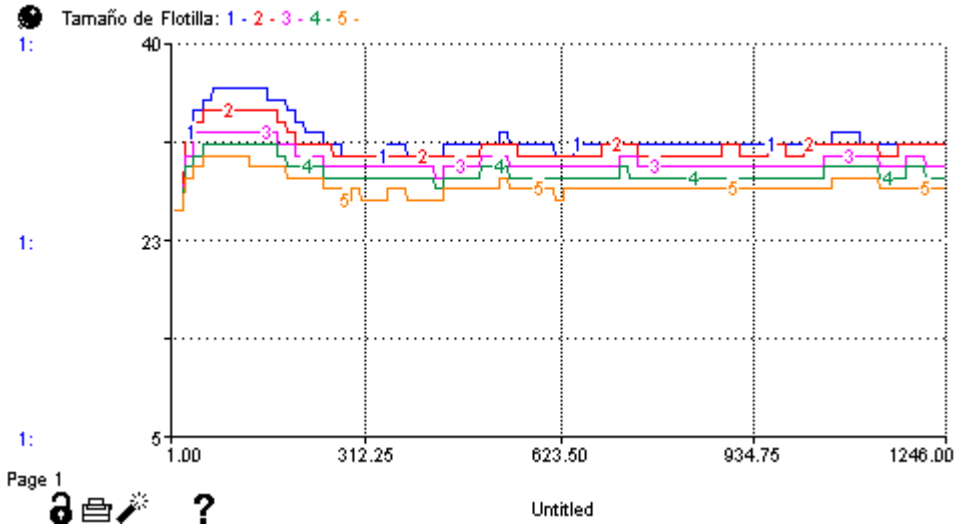
Esta última prueba de validación consideró la comprobación de que el modelo mantenía una consistencia en sus resultados ante pequeñas variaciones en las variables. Esta prueba se llevó a cabo sobre variaciones en los valores esperados

sobre los índices de desempeño con el objetivo de analizar la sensibilidad del tamaño de flotilla, ya que son en base a estos índices que se especifican la flotilla adicional a contratar. Primero, se expusieron cinco valores para la confiabilidad requerida, éstos fueron: 0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.80. A partir de su evaluación en el modelo de simulación, se observó (ver figura 4.22) que el comportamiento de la flotilla de vehículos era lógica con respecto al incremento de la confiabilidad que la empresa desea sobre el proceso de secuenciado, por lo que se estableció que el tamaño de flotilla tenía un sensible crecimiento respecto al aumento de la confiabilidad que demanda.



**Figura 4.22** Sensibilidad de tamaño de flotilla respecto a confiabilidad requerida

Asimismo frente al incremento de la ganancia esperada por empresa por la operación diaria, se observó un comportamiento de tamaño de flotilla respecto a los valores de ganancia esperada de: \$0, \$10,000, \$20,000, \$50,000, y \$70,000. En la figura 4.23 es posible observar un sensible decrecimiento sobre el tamaño de flotilla, por lo que podemos aseverar que a medida que la empresa obtiene más ganancias puede utilizar los excedentes de ingresos para subcontratar un mayor número de vehículos.



**Figura 4.23** Sensibilidad de tamaño de flotilla respecto a ganancia esperada

La sensibilidad analizada sobre el tamaño de flotilla se transmite directamente a los indicadores de confiabilidad operativa, de costos JIS y de tiempo estimado de operación. En resumen, la aplicación de estas cuatro pruebas de validación para comprobar que el modelo de simulación, nos permitió tomar este modelo como una efectiva herramienta para evaluar diversos escenarios de gestión. Para la empresa resultó en un importante apoyo para la toma de decisiones sobre la óptima configuración de los factores: tamaño de flotilla, costos de manipulación, tiempo de cobertura, y demás factores.

#### 4.6. Diseño y evaluación de políticas de gestión

Finalmente, esta fase además de describir y evaluar una serie de políticas de gestión sobre el sistema de abastecimiento JIS, nos permitió establecer los resultados de la implementación del modelo como herramienta de medición y control del desempeño del sistema.

Las políticas de gestión que se diseñaron para este problemática se asocian a los criterios para la toma de decisión sobre modificaciones al tamaño de los camiones. Aunque actualmente CEVA Logistics cuenta con 25 vehículos de carga subcontratados

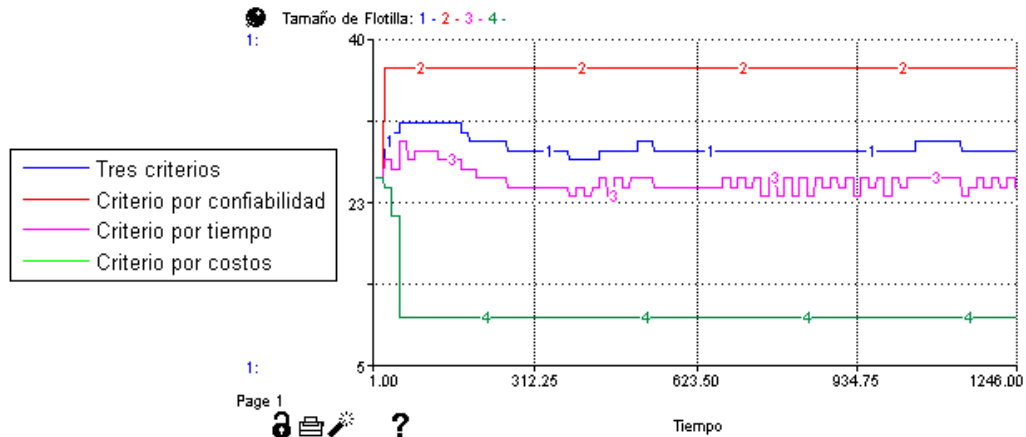
y cumple con la operación demandada por GM, en realidad desconoce si estos son los adecuados para maximizar el rendimiento de su proceso de entrega en secuenciado. Debido a que la demanda de viajes mantiene un continuo y estocástico comportamiento, fijar un número de vehículos constante para responder a los requerimientos de la demanda resulta riesgoso por el alto grado de incertidumbre en la demanda. Es por ello que se optó por desarrollar este modelo que considera los criterios de confiabilidad, de costos y de tiempos de operación, para que en base a su evaluación actual e histórica determinen el adecuado tamaño de flota para responder a la demanda de los siguientes periodos.

Tras establecer un modelo válido del sistema, se determinaron las siguientes políticas a evaluar:

- (a) Considerar los tres criterios para la toma de decisiones sobre el tamaño de flota.
- (b) Considerar solo el criterio de confiabilidad para la toma de decisiones sobre el tamaño de flota.
- (c) Considerar solo el criterio de tiempo para la toma de decisiones sobre el tamaño de flota.
- (d) Considerar solo el criterio de costos para la toma de decisiones sobre el tamaño de flota.

La configuración de los demás parámetros son resultado de la actual operación de CEVA Logistics, haciendo referencia a los costos logísticos de las diversas fuentes de egresos (sistema, transporte, penalización, etc.), al ingreso neto por el traslado de autopartes, al tiempo de cobertura que tiene sobre el buffer en las instalaciones de su cliente GM, etcétera. El escenario resultante de cada política de decisión se observa en la figura 4.24. En donde se despliega el comportamiento que tendría el tamaño de flota con respecto a cada política.





**Figura 4.24** Conducta de políticas de gestión

Para la primera política (considerando los tres criterios de decisión), el tamaño de flotilla tenderá a una asignación promedio de 28 vehículos con rango de 27 a 30 vehículos, en promedio este número de vehículos habría tenido como consecuencias una confiabilidad diaria para asegurar el cumplimiento con los tiempos de entregas de la demanda de 29%, así como un tiempo medio de retardo de 237 minutos diarios, es decir, que no solo no se tendría tiempo de retardo sino que CEVA tendría la posibilidad de mantener el inventario de seguridad con un tiempo de cobertura mayor de los actuales 120 minutos. Respecto a la ganancia promedio, ésta sería de \$36,600 MXN diarios. Notable que ninguna de estas consecuencias se empata con el valor esperado de cada una de ellas, ya que solo se toma en cuenta el promedio de los tres criterios para la asignación del óptimo tamaño de flotilla.

Por su parte, para la segunda política (considerar solo el factor confiabilidad) se propone un tamaño promedio de 37 unidades de transporte, con este número el proceso mantendrá el 99% de probabilidad de cubrir la totalidad de la demanda de viajes de cada periodo de 80 minutos. Pero que al observar las consecuencias económicas y de tiempo de retardo, vemos que el proceso de secuenciado propiciaría un menor tiempo medio de retardo debido a que se tiene un mayor número de vehículos, éste sería de -380 minutos; también se observaría una ganancia promedio de \$21,250 MXN.

Si la empresa decide implementar la tercer política (considerar solo el factor de tiempo), el modelo de simulación indica que la mejor respuesta a la demanda observada se obtendría con un promedio del tamaño de flotilla de 25 unidades con variaciones en un rango de 24 a 27 vehículos, se tendría un tiempo de retardo muy cercano al que represente la estabilidad operativa, es decir, se tendría un tiempo de retardo de -48 minutos. Y una ganancia diaria de \$38,700 MXN. Mientras que el índice de confiabilidad de responder a la demanda de viajes es del 16% de probabilidades.

Finalmente, para la cuarta política (considerar solo el factor costo) se subraya el enfoque dinámico que se presenta en el sistema de abastecimiento. Es decir, considerar que el único factor de decisión es la ganancia resultante de la operación diaria, entonces se tendría que el tamaño promedio para responder a la demanda de viajes es de 10 vehículos. Esto resulta de analizar que el modelo con el propósito de alcanzar la ganancia esperada de \$50,000 empieza a proponer reducciones del parque vehicular subcontratado, estas reducciones llevarían a tener un nulo porcentaje de probabilidad de cumplir con demanda. Lo que a largo plazo produciría penalizaciones económicas por paros en la línea de ensamble debido a que el tiempo medio de retardo sería de 350 minutos, superior al permitido de 120 minutos. Así que con esta política en lugar de alcanzar la ganancia exigida por CEVA, al contrario se tendría mayores costos de ingresos en la operación, lo que sería un detonante para el inicio de una crisis económica.

Dichas consecuencias descritas para cada política de cada índice de rendimiento se visualizan gráficamente en la figura 4.25. Además en la tabla 4.5, se muestra el efecto directo que tendría cada una de estas políticas en relación a la actual política de gestión, la cual considera emplear ninguno de estos criterios y solo mantiene constante el tamaño de flotilla en 25 vehículos.

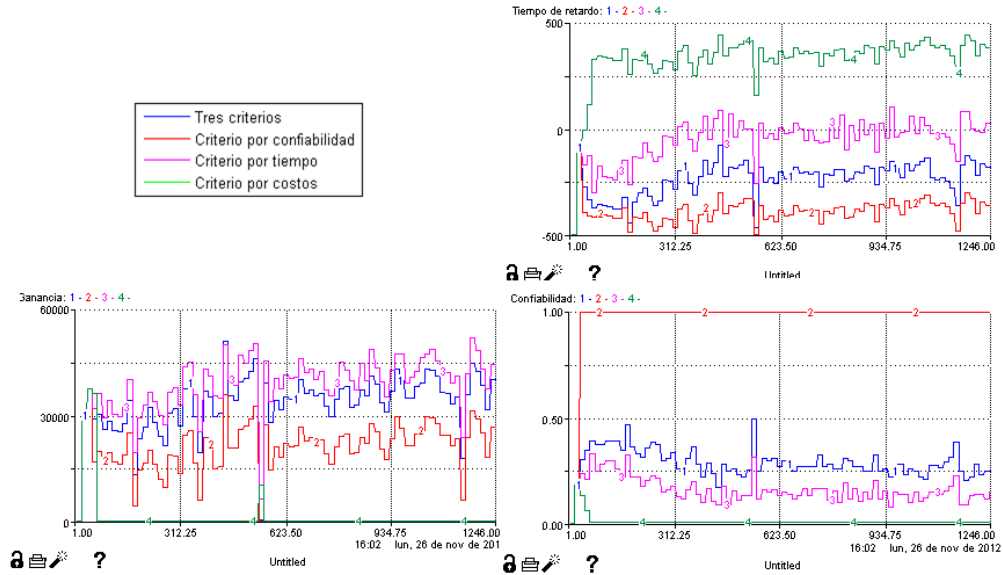


Figura 4.25 Índices de desempeño bajo políticas de gestión

	Política Actual	Política 1	Política 2	Política 3	Política 4
Confiabilidad	0,16	0,29	0,99	0,16	0,00
Tiempo de retardo	-55	-237	-380	-48	350
Ganancia	38800	36600	21250	38700	0

Tabla 4.5 Resultados de índices de desempeño bajo políticas de gestión

A partir de los resultados de esta tabla, se establece que la política de gestión que ofrece mayores ventajas para CEVA Logistics, de acuerdo su requerimiento principal de garantizar la no-disrupción de la línea de ensamble, es la Política 1. En la que la CEVA, aunque tendría una mínima reducción en sus ganancias económicas de \$38,800 a \$36,600 MXN diarios respecto a la actual política; la probabilidad de cumplir con la demanda de viajes para el abastecimiento casi se duplicaría. Esto en relación a los 28 vehículos de carga a subcontratar, los cuales tienen asociado un tiempo mayor para cubrir la demanda de GM.

Los resultados de la simulación de las políticas expuestas fueron mostrados a la empresa CEVA Logistics, la implementación de alguna de ellas es una decisión que solo les compete a ellos. Por lo que, la conclusión del proyecto se alcanzó al mostrar la evaluación de su desempeño en relación a los indicadores mencionados: confiabilidad, tiempo de retardo y costo. Así como, al explicar las consecuencias económicas y de

nivel de servicio de la implementación de alguna de las políticas de gestión establecidas.

#### **4.7. Conclusiones**

La estrategia definida para alcanzar el propósito de este proyecto de investigación, consideró desarrollar una propuesta para el aseguramiento de la no-disrupción en el proceso de entrega secuenciada de autopartes, y a su vez, el maximizar el eficiente desempeño de dicho proceso. En el primer paso para lograr tal propósito, fue medir el desempeño operativo, y en función de dicha evaluación establecer la configuración de los factores de la operación que maximice su desempeño.

Así, el proyecto se centró en desarrollar un modelo del sistema que permitiera a través de una herramienta de simulación el controlar la asignación de recursos, y también el establecer la configuración que mayores beneficios ofrezca en pro de la estabilidad operativa del abastecimiento JIS que practica CEVA Logistics.

La implementación del enfoque de Dinámica de Sistemas para el desarrollo del modelo de simulación, la adaptación de la teoría de confiabilidad para la evaluación de este factor y del factor tiempo, así como la adaptación de una función de costos logísticos de una operación JIS para la evaluación del factor costo, permitieron establecer la herramienta computacional de apoyo al operador del sistema y a la cadena de suministro en general a obtener una efectiva solución a la problemática que experimenta.

Específicamente, para la evaluación de confiabilidad se empleó la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad. Para su implementación en este proyecto se apoyó en el software MatLab, en donde se crearon tres aplicaciones computacionales para la realización de los cálculos numéricos. Por otra parte, para la creación de la

herramienta de simulación se apoyó en el software STELLA, el cual facilita en gran medida dicha tarea.

Así que considerando lo anterior, el desarrollo e implementación del modelo de simulación en la problemática de este caso de estudio permiten establecer las siguientes conclusiones. En primera instancia, se determina que la operación de CEVA del primer semestre de este año tuvo asociada una ganancia promedio de \$38,800 MXN diarios y un alto nivel de servicio hacia su cliente GM, considerando que en ninguna ocasiones el retardo en la entrega de autopartes afecto directamente sobre algún paro a la línea de ensamble de GM. Todo ello con un nivel de confiabilidad en promedio del 16% de probabilidad de que con el parque vehicular de 25 unidades para el traslado de la mercancía podía cubrir la totalidad de los viajes requeridos hacia GM de un periodo de 80 minutos.

Asimismo, con respecto a las políticas de gestión que puede emplear CEVA para la toma de decisiones sobre la asignación de un eficiente tamaño de flotilla, se concluye que la política de considerar los tres criterios mencionados es la que presenta mejores resultados sobre los indicadores de desempeño. Es decir, que con esta política se tendría una mayor garantía de cumplir con la demanda de mercancía a entregar en los tiempos establecidos y no producir interrupción alguna a la línea de manufactura de General Motors.

Finalmente, con la exposición de estas conclusiones sobre el caso de estudio, así como con la investigación académica realizada acerca de las técnicas y herramientas que facilitarían la solución de la problemática industrial que presentó la empresa CEVA Logistics, este proyecto se sustenta como un efectivo ejercicio de investigación científica, así como de solución tecnológica.

# Capítulo 5.

CONCLUSIONES

## **5.1. Introducción**

El presente proyecto de investigación surgió con el interés de analizar de forma dinámica la confiabilidad en sistemas justo en secuencia. La amplia revisión de la literatura y la aplicación al caso de una empresa 4PL de clase mundial permitió alcanzar los objetivos planteados al inicio. La importancia de esta investigación estriba en que este problema se replica en diversos sectores industriales. Debido a lo anterior se estableció un detallado proceso de análisis y definición de la metodología propuesta. Así como de la herramienta informática concebida como apoyo a la toma de decisiones de los encargados de gestionar el sistema de entregas secuenciadas del caso de estudio.

El presente capítulo presenta las principales conclusiones, así como las futuras líneas de investigación, resaltando los resultados obtenidos.

## **5.2. Conclusiones**

La validación del desarrollo del proyecto se enfoca en los resultados mostrados por su implementación en las operaciones de una empresa 4PL de clase mundial. Así que con el reto de estabilizar el proceso de entregas de autopartes garantizando la no-disrupción a línea de ensamble de la empresa automotriz, se llegó a las siguientes conclusiones.

Primero, es importante destacar las ventajas que implica el implementar la práctica Justo en Secuencia a un proceso industrial, estas son mayor reactividad de la cadena de suministro, reducción de inventarios y tiempos de operación en la planta manufacturera, reducción de espacios de almacén y del equipo de trabajo operando la mercancía. Aunque de igual manera mantiene un alto riesgo de disrupción al proceso, debido a que algún paro o falla difícilmente puede ser compensada por los cortos tiempos de reacción. Estas ventajas y desventajas deben ser consideradas antes de

implementar un JIS. En cualquier caso, no todas las empresas pueden implementar este tipo de práctica, ya que se pudo identificar que es una práctica ideal para empresas operando en un entorno de producción en masa con una gran cantidad y variedad de productos, y que demanda un alto grado de integración en el proceso de producción. Se detectó también que el principal factor para que el proceso de abastecimiento JIS sea efectivo, es el factor de estabilidad operativa, el cual representa la sincronización de la entrega de las piezas con el programa de producción de la empresa manufacturera.

Se debe resaltar que una efectiva estrategia para lograr la estabilidad operativa se compone de dos etapas: medición y control. El análisis de confiabilidad y de costos para la medición del desempeño del proceso y la creación de un modelo dinámico para el control de dicho rendimiento, permiten obtener los resultados esperados de cada una de estas etapas.

Es así como a través de la metodología de Dinámica de Sistemas e incorporando la teoría de Modelos Jerárquicos de Probabilidad y de costos logísticos JIS, se modeló el comportamiento del proceso de abastecimiento de la empresa 4PL. El soporte de este modelo de simulación se centró en las pruebas de validación de Dinámica de Sistemas, las cuales validan desde la estructura y consistencia el modelo hasta el ajuste matemático entre el comportamiento real del sistema y el comportamiento simulado. Asimismo, el modelo de simulación permitió evaluar diversas políticas de gestión sobre el proceso de suministro del 4PL. El resultado muestra que la política de considerar los tres criterios de decisión: *Confiabilidad*, *Tiempo de retardo* y *Ganancia*, es la que mejores consecuencias respecto a estos tres mismos factores individuales tendría para la empresa. Por lo tanto, con los resultados sobre el caso de estudio se sustenta el modelo como una efectiva representación del sistema de secuenciado, con lo que se concluye que el modelo es una útil herramienta para la toma de decisiones en pro de la estabilidad operativa del proceso de abastecimiento.



Es así como a partir de estas conclusiones, se pudo comprobar positivamente la hipótesis general planteada al inicio del proyecto de investigación, y la cual fue enunciada como sigue:

*Si se realiza el análisis dinámico del desempeño de un sistema JIS incorporando indicadores de confiabilidad en su evaluación, entonces, será posible identificar áreas de oportunidad para la mejora y establecer políticas operativas que mejoren el desempeño logístico del sistema de suministro, aumentando el rendimiento económico de la cadena de suministro.*

Lo cual se comprobó con la metodología de modelado de Dinámica de Sistemas en la que se incorporó un análisis de confiabilidad-costos, creandose un modelo que se ajusta dinámicamente los parámetros para la asignación del tamaño de flotilla y de los criterios de decisión sobre la flotilla a contratar, misma que responde a la demanda pronosticada. De hecho, en la fase de validación del modelo se observa que dichos ajustes dinámicos producen la ganancia esperada, el tiempo de retardo permitido y el nivel de confiabilidad requerido.

Respecto a las dos hipótesis secundarias, donde la primera expone que:

*Si se implementa un enfoque dinámico para la evaluación de confiabilidad, entonces, se será posible medir pertinentemente el comportamiento de la variabilidad del sistema JIS, como elemento de soporte para reducir la incertidumbre en la toma de decisiones para el abastecimiento.*

A partir de los resultados de incorporar el análisis de confiabilidad en el modelado del sistema de abastecimiento es que se comprueba esta hipótesis secundaria. Es decir, teniendo en cuenta que el modelo dinámico realiza la medición de confiabilidad para evaluar diariamente el desempeño del sistema respecto a la demanda del día actual y que en función de dicha evaluación se fija la postura del sistema para responder a la demanda pronosticada del siguiente día de operaciones. Es entonces

que la toma de decisiones sobre dicha postura mitiga parcialmente la incertidumbre de la demanda.

Mientras que para la segunda hipótesis secundaria, la cual expone que:

*Si se incorpora el índice de confiabilidad como variable en las funciones de costos de un proceso JIS, entonces el índice de costos logísticos del sistema permitirá una predicción robusta de su valor.*

Al considerar que en el modelo dinámico se toma en cuenta la diferencia entre el tiempo requerido para cumplir con la demanda y el tiempo estimado en que la flotilla actual cubre la totalidad de una demanda de viajes, que en el caso de que esta diferencia sea mayor al tiempo de cobertura permitido en el inventario de seguridad entonces habría un costo de penalización, el cual es parte de los costos logísticos de la operación JIS. La conexión del índice de confiabilidad con la evaluación de costos se establece al considerar que dicho tiempo estimado asociado al tamaño de flotilla se calcula con la función del valor esperado,  $\int t PDF(t, v) \partial t$ , la cual se resulta del análisis de confiabilidad. Por lo tanto, con la conexión descrita se determina la comprobación de la segunda hipótesis secundaria.

Con relación al alcance de los objetivos planteados del proyecto de investigación, el principal se definió como:

*Desarrollar un análisis dinámico para evaluar el desempeño de un sistema Justo en Secuencia, en su etapa de abastecimiento de mercancías, incorporando índices de confiabilidad y costos logísticos.*

Este se alcanzó con el modelo dinámico establecido del sistema. La efectiva representación del sistema de abastecimiento Justo en Secuencia de la empresa CEVA Logistics a través del modelo dinámico permitió dar alcance a este objetivo. El modelo además de evaluar el rendimiento actual del sistema respecto a los indicadores costo, tiempo y confiabilidad, emplea también el enfoque dinámico para la toma de

decisiones sobre la gestión del sistema. A su vez, el establecimiento de este modelo resultó del alcance de los objetivos particulares. Los resultados de los objetivos particulares son los siguientes:

❖ *Detectar las variables y características del proceso de abastecimiento de mercancía dentro de un sistema JIS*

Las variables principales son: el tamaño de flotilla, la demanda de viajes, los índices de costos, de tiempo y de confiabilidad.

❖ *Adaptar el factor de confiabilidad en la evaluación de costos logísticos del sistema, a través de los costos de un sistema Justo en Secuencia.*

Tras establecer la aplicación de la teoría de probabilidad de Modelos Jerárquicos de Probabilidad, la cual se seleccionó con base en la necesidad del enfoque multivariado sobre el análisis de confiabilidad del sistema. Y tras adaptar la función de costos JIS que propone Wagner y Silveira (2011), con la que se evaluó los costos logísticos de cinco fuentes de egresos: sistemas TI, almacén, manejo de material, traslado de mercancía, y penalizaciones por fallas. Es entonces que se estableció la asociación entre el factor de confiabilidad y la evaluación de costos logísticos.

Es decir, el índice de confiabilidad como resultado del análisis de confiabilidad permite estimar el tiempo medio de operación del proceso de entrega de material en que incurre CEVA Logistics, con él se determina el tiempo de retardo en la operación. Mismo que a su vez, influye en el cálculo del costo de penalización en una operación JIS.

- ❖ *Realizar la modelación con un enfoque dinámico de los factores que determinan el desempeño del sistema de abastecimiento.*

El uso del software STELLA para programar el modelo dinámico del sistema JIS de CEVA permite obtener este objetivo particular. Este software es especializado para adoptar la metodología de Dinámica de Sistemas. Con la implementación del modelo obtenido en la operación de CEVA Logistics se concluyó que la política con mayores beneficios es la de considerar los tres criterios de decisión sobre el tamaño de flotilla. Esta política permitirá alcanzar la contribución regional planteada del proyecto de investigación, la de aumentar la seguridad del cumplimiento de la demanda y de la no-disrupción del sistema de secuenciado, ya que de emplear CEVA esta política se tendrá un aumento del 16% al 29% de probabilidad de estos puntos.

- ❖ *Establecer una metodología integral de modelación del sistema de entrega de mercancías que contemple las fases de modelación dinámica y evaluación de índices de confiabilidad y vulnerabilidad.*

En relación a la estrategia de análisis del problema general conformada por una etapa de medición y una control, se planteó la metodología de Dinámica de Sistemas para el modelado del sistema. Destacar que en la fase de definición del modelo cuantitativo se adoptó los resultados de la implementación de la técnica de Modelos Jerárquicos de Probabilidad para el análisis de confiabilidad.

- ❖ *Adaptar la metodología y modelación a un ejecutable para la facilidad del rediseño dinámico.*

Finalmente, para conseguir este último objetivo, con el mismo software STELLA se creó una interface gráfica que se le entregó a la empresa CEVA Logistics para apoyar

a los tomadores de decisión en la gestión de su sistema de abastecimiento JIS. A continuación se muestran algunas ventanas de la interface.

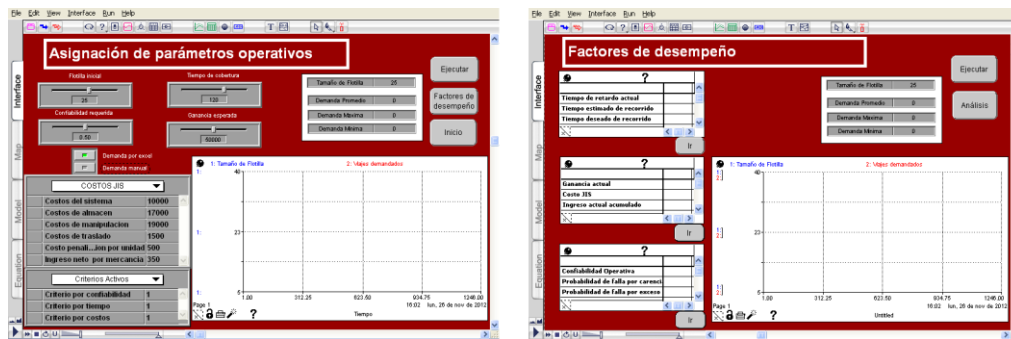


Figura 5.1 Interface gráfica: Modelo de Gestión

### 5.3. Medios de transferencia

Además de la tesis como reporte del proyecto de investigación y de la interface gráfica del modelo dinámico resultante, se obtuvo otros productos que dan mayor soporte académico al proyecto. Estos son:

- ✓ Artículo “Confiabilidad y vulnerabilidad en redes de distribución urbana” publicado en la revista ÉNFASIS LOGÍSTICO, No. 131, Págs. 70-72, Julio 2012
- ✓ Artículo y ponencia “Evaluación de confiabilidad en redes de distribución de mercancías mediante modelos de Markov”, con la coautoría del Dr. M. Gastón Cedillo C. y el Dr. Mauricio A. Garza C., en el IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2011), celebrado en la Cd. de Cuernavaca Morelos, México, noviembre 2011.
- ✓ Participación en el proyecto “Generation of Dynamic Distribution Routing” dirigido por el Dr. René Villalobos Cano, durante una estadia escolar de dos meses en el Laboratorio de Logística Internacional y Mejora de Productividad (ILPIL, por sus siglas en inglés) de la Universidad Estatal de Arizona, EE. UU, en el año 2012.
- ✓ Artículo y ponencia “Analysis of Multivariable Reliability for Designing Just-In-Sequence Systems” con la coautoría del Dr. M. Gastón Cedillo Campos y del Dr. David S. Gonzalez G., en el 1<sup>st</sup> Industrial and Systems Engineering World Conference en Washington, D.C, EE. UU., celebrado del 16 al 18 de septiembre del 2012
- ✓ Artículo y ponencia “Reliability of a Goods Supply System under a Just-in-sequence Context: A Stochastic Approach” con la coautoría del Dr. M. Gastón Cedillo Campos, en el INFORMS ANNUAL MEETING 2012 en Phoenix EE. UU. celebrado del 14 al 17 de octubre del 2012.

#### **5.4. Investigación futura**

Como trabajo futuro de investigación se contemplan varias tareas, entre ellas la de añadir una fase de programación de envíos de las autopartes de CEVA a GM en el modelo de gestión resultante. Ya que con ello se garantiza el cumplimiento de dicho supuesto establecido como delimitación del proyecto. La efectiva programación de envíos en relación a los *lead-times* y a los niveles de inventarios en la operación de

CEVA Logistics permitirá una mejor asignación del tamaño de flota y de las demás variables del modelo.

Además, otra línea de acción sería la de analizar el sistema de abastecimiento en secuenciado de esta misma empresa especializada (4PL o Fourth Party Logistics) o alguna otra proveedora de mercancía con este mismo enfoque de solución pero con un mayor número variables e interacciones a analizar, considerando aspectos clave como el factor humano.

Del mismo modo, al considerar que este proyecto se centró en el análisis de un sistema de abastecimiento, se plantea replicar este mismo procedimiento de investigación en otros procesos logísticos, tales como: la producción-ensamble y/o la distribución de mercancía.

Otra vertiente de actividad, puede ser el estudio e integración de otras técnicas para el análisis robusto de la confiabilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen Julian, et al. (2000). A framework for considering policies to encourage sustainable urban freight traffic and goods/service flows. Report 2: Current goods and service operations in urban areas. Pág. 137
- Al-Asaad Hussain (2003). A novel markov model for the reliability prediction of fault tolerant non-homogenous multipipelines Computer Engineering Research Laboratory.
- Andreas Huttmeir, et al (2009). Trading off between heijunka and just-in-sequence. Int. J. Production Economics 118 (2009) 501–507
- Arellano C. Daniel (2004). Alcanzar una mayor flexibilidad y generación de ventajas competitivas en las áreas productivas de acería y laminación de Hylsa DAV Puebla S.A. de C.V. -división alambión y varilla-, a través de la planeación de la producción usando el sistema APO/SAP (Advanced Planner Optimizer / System administration Plant) - del área de planeación y control. Tesis doctoral. Universidad de las Américas Puebla. En línea:  
<[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/mepi/arellano\\_c\\_d/portada.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mepi/arellano_c_d/portada.html)
- Arvis Jean-François, et al (2010). The Logistics Performance Index and Its Indicators. World Bank's International Trade Department. En línea  
<[http://siteresources.worldbank.org/INTTLF/Resources/LPI2010\\_for\\_web.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTTLF/Resources/LPI2010_for_web.pdf) >
- Arya L. D., Choube S. C. & Arya, R. (2011). Differential evolution applied for reliability optimization of radial distribution systems. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 33(2), 271-277. Elsevier Ltd.
- Boysen N., Fliedner, M. & Scholl, A. (2008). "Sequencing mixed-model assembly lines to minimize part inventory cost". OR Spectrum, 30 (3), 611–633.
- Brunelle R. D., & Kapur K. C. (1999). Review and classification of reliability measures for multistate and continuum models. Continuum.
- Calderón Karla (2011). Se encarece costo de productos por fallas en distribución urbana. En línea:  
<[http://www.t21.com.mx/news/news\\_display.php?story\\_id=14164](http://www.t21.com.mx/news/news_display.php?story_id=14164)>
- Cardoso J., De-Almeida J., Dias J., & Coelho, P. (2008). Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks. Advances in Engineering Software, 39(6), 505-513.



- Cavinato, J.L., 1992. A total cost/value model for supply chain competitiveness. *Journal of Business Logistics*, 13 (2), 285–301.
- Cedillo-Campos, M., (2012). Designing supply chains under security threat: the first national exploratory survey in Mexico. In Spanish. Technical report to the Secretariat of Commerce and National Council of Science and Technology. México. [Internet]. En línea:  
 <[http://www.elogistica.economia.gob.mx/swb/work/models/elogistica/Resource/3/1/images/2011\\_Evaluacion\\_del\\_Riesgo\\_en\\_las\\_Cadenas\\_de\\_Suministro.pdf](http://www.elogistica.economia.gob.mx/swb/work/models/elogistica/Resource/3/1/images/2011_Evaluacion_del_Riesgo_en_las_Cadenas_de_Suministro.pdf)>
- Cedillo-Campos, M., Mata, M. (2011). Uncertainty on crossing times at U.S.–Mexican border: impacts on safety stocks of NAFTA supply chains, International Transportation Economic Development Conference, Committee of the Transportation Research Board (TRB). [Internet]. Available online <[http://www.ited2011.org/downloads/presentations/SessionC2\\_Cedillo-Campos.pdf](http://www.ited2011.org/downloads/presentations/SessionC2_Cedillo-Campos.pdf)> [Consulted 02-24-2012].
- Cedillo-Campos M., Pérez-Araos A. (2010). Hybrid supply chains in emerging markets: the case of the Mexican auto industry. *South African Journal of Industrial Engineering*, Vol. 21(1), pp. 193-206.
- Cedillo-Campos, M., Sánchez, C. (2008). Análisis dinámico de sistemas industriales. Editorial Trillas, México.
- Cedillo-Campos, M., Sánchez, C., Sharada, V. (2012). Reverse globalization and near-sourcing strategies: impacts of crossing times at U.S. – Mexican border on cross-border supply chains, Working Paper, COMIMSA (National Council of Science and Technology, MIT-Zaragoza Logistics Center, Texas A&M Transportation Institute.
- Chamoso V. y Raúl F. (2003) sistema de control y distribución de ventas. Canales de distribución y administración logística. En línea  
 <<http://www.gestiopolis.com/recursos/documentos/fulldocs/mar/sisctrlventas.htm>>
- Cheng J. (2007). Hybrid genetic algorithms for structural reliability analysis. *Computers & Structures*, 85(19-20), 1524-1533.
- Cheng J., & Li, Q. (2008). Reliability analysis of structures using artificial neural network based genetic algorithms. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 197(45-48), 3742-3750.

- Cheng J., Li, Q., & Xiao, R. (2008). A new artificial neural network-based response surface method for structural reliability analysis. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 23(1), 51-63.
- Chopra Sunil & Meindl Peter: (2008). Administración de la cadena de suministro. Estrategia, Planeación y Operación. Tercera Edición. ISBN 978-970-26-1192-9.
- Ciufudean Calin, Satco Bianca, Filote Constantin (2007). Reliability Markov Chains for Security Data Transmitter Analysis. Second International Conference on Availability, Reliability and Security.
- CSCMP – Council of Supply Chain Management Professionals (2012). Supply Chain Management Definition. En Línea: < <http://cscmp.org/digital/glossary/glossary.asp>>
- Clark, S., & Watling, D. (2005). Modelling Network Travel Time Reliability Under Stochastic Demand. *Transportation*, 39, 119-140.
- Dasilva M. et al (2007). An application of predictive reliability analysis techniques in Brazil's northeast distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(2), 155-162.
- Ding Y & Lisnianski A. (2008). Fuzzy universal generating functions for multi-state system reliability assessment. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(3), 307-324.
- Ding Y. et al (2007). Reliability assessment of restructured power systems using reliability network equivalent and pseudo-sequential simulation techniques. *Electric Power Systems Research*, 77(12), 1665-1671.
- Edimu M., Gaunt C. T. & Herman R. (2011). Using probability distribution functions in reliability analyses. *Electric Power Systems Research*, 81(4), 915-921. Elsevier B.V.
- Estrada R., Miquel À. (2007). ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS EFICIENTES EN LA LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN DE PAQUETERÍA. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona,
- Feitó C. Michael y Cespón C. Roberto (2009). SELECCIÓN DE RUTAS DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS. Vector, Volumen 4. págs. 59– 66
- Forrester J.W., & Senge P.M. (1980). "Tests for building confidence in System Dynamics models". *System Dynamics*. New York: Elsevier North-Holland, pp. 209-228.

- Fuqua Norman (2003). The Applicability of Marvok Analysis Methods to Reliability, Maintainability and Safety. Selected Topic in Assurance Related Technologies (START)
- Galván Dante, Martínez L., Clara, Antún Juan Pablo (2010). Prácticas en distribución y su efecto sobre la optimización de la logística urbana. XVI congreso panamericano de transporte, tráfico y logística.
- García C. Irma (2010). Un enfoque metaheurístico para un problema de ruteo con flexibilidad en las fechas de entrega. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. División de Estudios de Posgrado. Págs. 247.
- Görkemli L., & Kapan S. (2010). Fuzzy Bayesian reliability and availability analysis of production systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(4), 690-696.
- Gradilla Luz A. y Jenelius Eric. (2010). Análisis de vulnerabilidad de redes carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. NOTAS núm. 124. En línea: <http://www.imt.mx/SitioIMT/Boletines/frmResumenBoletin.aspx?IdArticulo=341&IdBoletin=12>
- Golhar D. Y. & Stamm C. L. (1991). "The just-in-time philosophy: A literature review," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 29, no. 4, pp. 657–676.
- Hernández M. Eduardo. (1999). Comparación de métodos de analisis de confiabilidad aplicados a sistemas eléctricos de industriales. Instituto de Investigaciones Eléctricas
- Husdal J. (2004). Reliability and vulnerability versus cost and benefits. Proceedings of the Second International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR 2004). A. Nicholson and A. Dantas, Christchurch, New Zealand.
- Inman R. (2003) "ASRS sizing for recreating automotive assembly sequences" *Int. J Prod Res* 41(5):847–863
- Jane C.-C: (2010). Performance evaluation of logistics systems under cost and reliability considerations. *Transport. Res. Part E* (2010), doi:10.1016/j.tre.2010.09.012
- Jane C.-C., & Laih, Y.-W. (2004). Algorithms to determine the threshold reliability of flow networks. *IIE Transactions*, 36(5), 469-479.
- Jenab K., Seyedhosseini S. & Dhillon, B. (2007). Dynamic reliability networks with self-healing units. *Reliability Engineering & System Safety*, 93, 595-603.

- Jenelius Erik, Peterson Tom & Lars-Göran M.(2005). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. TRANSPORTATION RESEARCH part A.
- Jozefowicz N., Semet F. & Talbi E-G.: (2008). Multi-objective vehicle routing problems. European Journal of Operations Research, (189) 293–30.
- Kavousifard A., & Samet H. (2011). Consideration effect of uncertainty in power system reliability indices using radial basis function network and fuzzy logic theory. Neurocomputing, 1-8. Elsevier
- Langley J. (2010). “2010 Third Party Logistics, the state of logistics outsourcing, results and findings of the 15th annual study”. En línea:  
< <http://www.scl.gatech.edu/research/supply-chain/20103PLReport.pdf> >
- Langseth H & Portinale L. (2007). Bayesian networks in reliability. Reliability Engineering & System Safety, 92(1), 92-108.
- Lee, Hau L.; Padmanabhan V. & Whang, Seungjin: (1997). The Bullwhip Effect in Supply Chains. SLOAN MANAGEMEN. Pág. 10.
- Levitin G., et al (n.d.). A Universal Generating Function in the Analysis of Multi-state Systems.
- Liker J.K. & Wu Y. (2000). “Japanese automakers, US suppliers and supply-chain superiority. Sloan Management” Review, 81–93.
- Lisnianski Anatoly et al. (2008). Multistate System Reliability Assessment by Using the Markov Reward Model
- Lisnianski A. & Levitin G. (2003). Multi-state system reliability: assessment, optimization and applications. Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics, London, World Scientific.
- Marín D., Juan M. (2005) Cadenas de Markov. Apuntes de Estadística Actuarial II. Depto. de Estadística, Univ. Carlos III de Madrid. En línea:  
<<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/PEst/tema4pe.pdf>>
- Marquez, D., Neil, M., & Fenton, N. (2010). Improved reliability modeling using Bayesian networks and dynamic discretization. Reliability Engineering & System Safety, 95(4), 412-425. Elsevier.
- Meissner Sebastian (2010), Controlling just-in-sequence flow-production Logist. Res. 2:45–53 DOI 10.1007/s12159-010-0026-5
- MIT Center for Transportation & Logistics (2010). Los pequeños minoristas son un negocio. Supply Chain Frontiers. En línea:

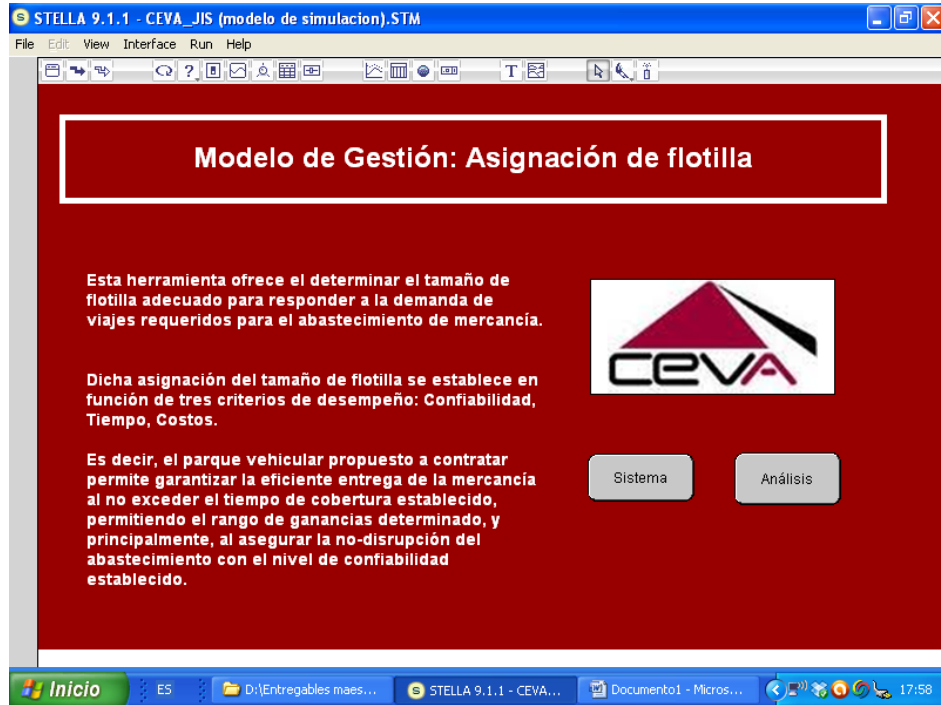
- <[http://ctl.mit.edu/library/supply\\_chain\\_frontiers\\_en\\_espa%C3%B1ol\\_37\\_los\\_peque%C3%B1os\\_minoristas\\_son\\_un\\_negocio](http://ctl.mit.edu/library/supply_chain_frontiers_en_espa%C3%B1ol_37_los_peque%C3%B1os_minoristas_son_un_negocio)>
- Möller O., et al (2009). Seismic structural reliability using different nonlinear dynamic response surface approximations. *Structural Safety*, 31(5), 432-442. Elsevier Ltd.
- Morlán S.C. Iñaki, (2010). Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria. Tesis Doctorado. Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
- Morones Darío R. (2011a). Modelo de escenarios de decisión para envíos de lotes fijos en inventarios con revisión periódica: El Caso de Secuenciado en CEVA Logistics. Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología, Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, COMIMSA-CONACYT, Saltillo, Coahuila, México.
- Morones, D., Cedillo-Campos, M., Lizarraga, G. y Moncayo, L. (2011b). Escenarios de decisión para el secuenciado de componentes en la industria automotriz, Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, Instituto Tecnológico de Orizaba, Octubre 27 y 28, Orizaba, Veracruz, México.
- Muñoz Z. Angel E. (2004). Multi-State System Reliability Design via Particle Evolutionary Swarm Optimization. M. SC., Centro de Investigación en Matemáticas A.C. Págs. 161.
- Ng M., Szeto W. Y. & Travis Waller S. (2011). Distribution-free travel time reliability assessment with probability inequalities. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(6), 852-866. Elsevier Ltd.
- Patiño Dainzu (2011). Capacitación a trabajadores agrega valor a la cadena de suministro. *Revista T21*. En línea  
< [http://www.t21.com.mx/news/news\\_display.php?story\\_id=14836](http://www.t21.com.mx/news/news_display.php?story_id=14836) >
- Pereira Jorge E. (2006) “Distribución Física de Mercancías.” *Canales de Distribución y Administración Logística*. En línea:  
<<http://gestionalmacenamiento.blogspot.com/2006/10/distribucion-fsica-de-mercancas.htm> >
- Ros Lluís y Hayes Simon: (2009). La distribución urbana de Mercancías. “Economistas” No. 2. Consultores ALTRAN Technologies. Págs. 12
- Rodionov O. K., Rodionov A. S. & Choo H. (2004). Network Probabilistic Connectivity: Optimal Structures, 431-440.

- Rubio T. Carlos y Echeverría Amaya (2006). Modelos de Markov: Una herramienta útil para el análisis fármaco-económico. *Pharmaco-economics Spanish Research*. Vol. 3, Suppl. 2: 71-78.
- Sanchez-Silva M., Daniels M., Lleras G. & Patino, D. (2005). A transport network reliability model for the efficient assignment of resources. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(1), 47-63.
- Sanchez, C., Cedillo-Campos, M., Perez, P., Martinez, J. (2011). Global economic crisis and Mexican automotive suppliers: Impacts on labor capital. *Simulation: transactions of the society for modeling and simulation international* 0(00) pp. 1-15.
- Santos J., Wysk R. & Torres J. (2006). "Improving production with lean thinking". Editorial John Wiley y Sons. New Jersey.
- Shinde R. L. & Khadse K. G. (2009). Multivariate Process Capability Using Principal Component Analysis. Online, (August 2008), 69-77.
- Soh S. (2009). "A decision model for evaluating third party logistics providers using fuzzy analytic hierarchy process". *African Journal of Business Management*, Vol. 4, No.3, pp. 339-349.
- Sree Rama Kumar Yeddanapudi (2005) Risk based allocation of distribution system maintenance resources, Thesis to Master of Science on Electrical Engineering. Iowa State University
- Srinivas K. & Satyanarayana R.V.S. (2009). Markov method based reliability assessment of eht transmission system in chittoor district of andhra pradesh state in india. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*.
- Sterman, J. (2000). *Business dynamics*. Irwin McGraw-Hill, Boston, MA.
- Suárez A. Anisley y Felipe Pilar. (2008). Enfoque cuantitativo para decisiones de distribución. (Ponencia) *Canales de distribución y administración logística*. (En línea:  
<<http://www.gestiopolis.com/marketing/decisiones-de-distribucion-y-logistica.htm>>
- Sumper A., et al, (2004). Índices de continuidad en redes de distribución y su mejora. 9º Congreso HISPANO LUSO Ingeniería Eléctrica.
- Susilawai Susilawati, Taylor Michael A.P. (2010). Travel Time Reliability Measurement for Selected Corridors in the Adelaide Metropolitan Area. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.8.

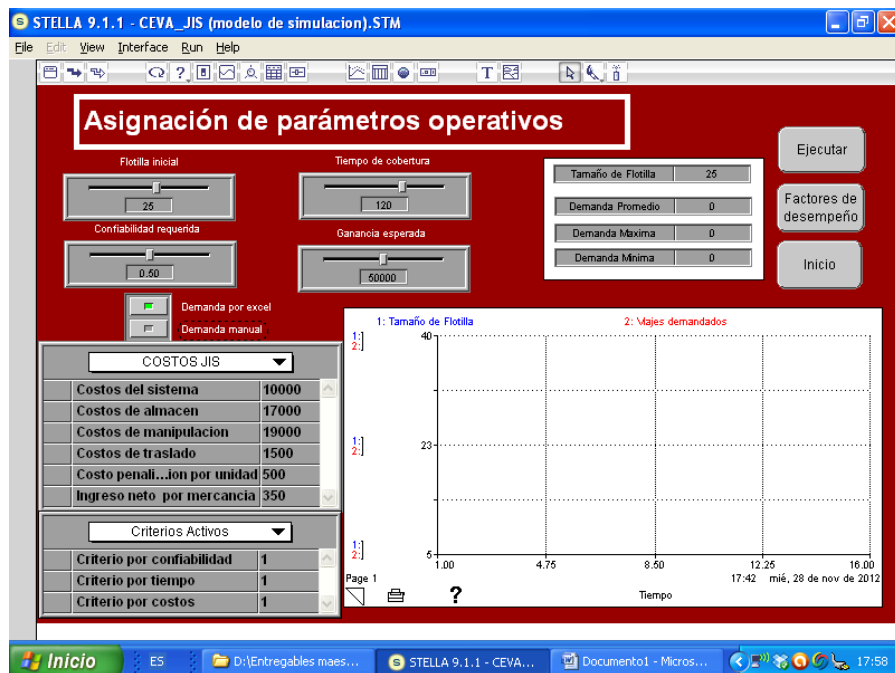
- SE, Secretaria de Economía: (2009). Evaluación del Desempeño de las Cadenas de Suministro en México. Generación de Indicadores Nacionales. Council of Supply Chain Management Profesionales Pág., 71
- Szeto W. Y. (2011). Cooperative game approaches to measuring network reliability considering paradoxes. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(2), 229-241. Elsevier Ltd.
- Tadashi Yamada, Yoshimura Y. & Mori K. (2004) Road network reliability analysis using vehicle routing and scheduling procedures. In Taniguchi, E., and Thompson, R. G. (eds.), *Logistics systems for sustainable cities, proceedings of the 3rd international conference on city logistics*, 111-122, Elsevier, UK.
- Thun Jörn-Henrik, Marble R. P. & Silvera-Camargos, V. (2006). A conceptual framework and empirical results of the risk and potential of just in sequence – A Study of the German Automotive Industry. *Journal of Operations and Logistics* Volume 1, Issue 2, 2007.
- Wagner. S. M., Bode C. (2006). “An empirical investigation into supply chain vulnerability,” *J. Purch. Supply Manage.* vol. 12, no. 6, pp. 301–312.
- Wagner S.M., Silveira C. Victor (2011). “Decision model for the application of Just-in-sequence” *International Journal of Production Research*. Taylor&Francis. Pgs. 1-24.
- Wallace J. Hopp (2007). *Supply Chain Science*. McGraw-Hill/Irwin series operations and decision sciences. ISBN 0073403326, 9780073403328. Pág.240
- Weick. E., Sutcliffe K. & Obstfeld D. (2008). “Organizing for high reliability: Processes of collective mindfulness,” in *Crisis Management*, A. Boin Ed. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2008, pp. 31–66.
- Wilson A., et al (2006). *Advances in System Reliability Assessment Integrating Multiple Data Sources to Assess Component Reliability*. Differences, 1-35.
- Wu W. (2008). Evaluation of the reliability of transport networks based on the stochastic flow of moving objects. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(6), 838-844.
- Xu W., et al (2009). Reliability based assignment in stochastic-flow freight network. *Applied Mathematics and Computation*, 211(1), 85-94. Elsevier Inc.

ANEXO A. Interface gráfica del modelo de simulación.

Portada

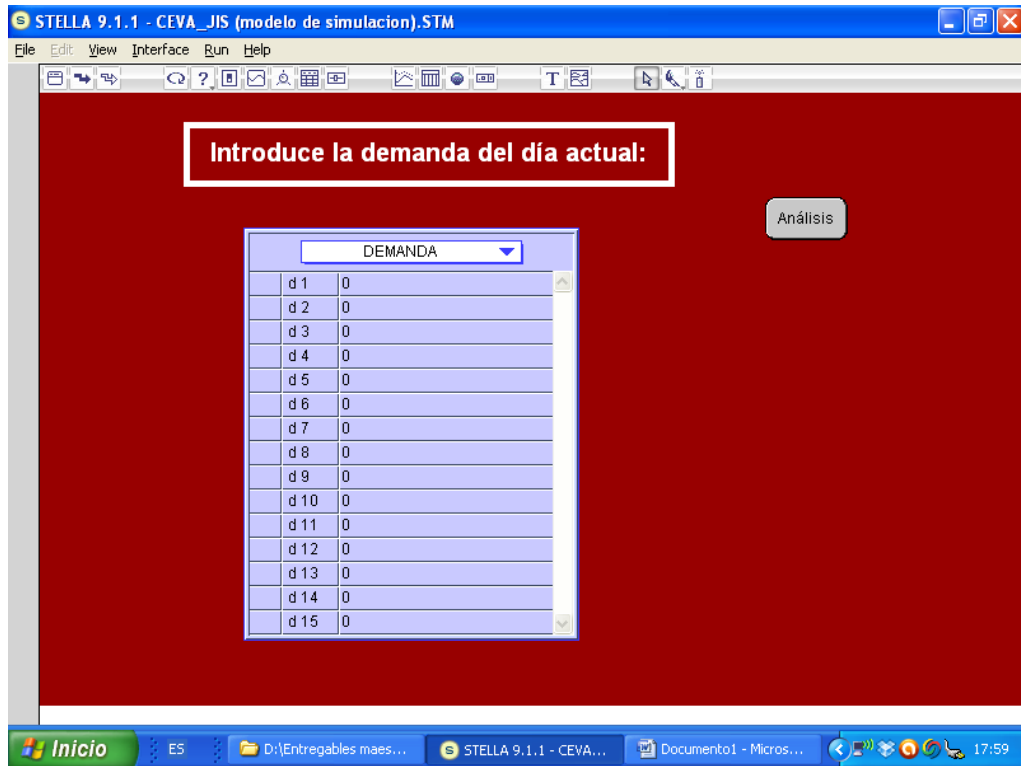


Ventana de manipulación de parámetros

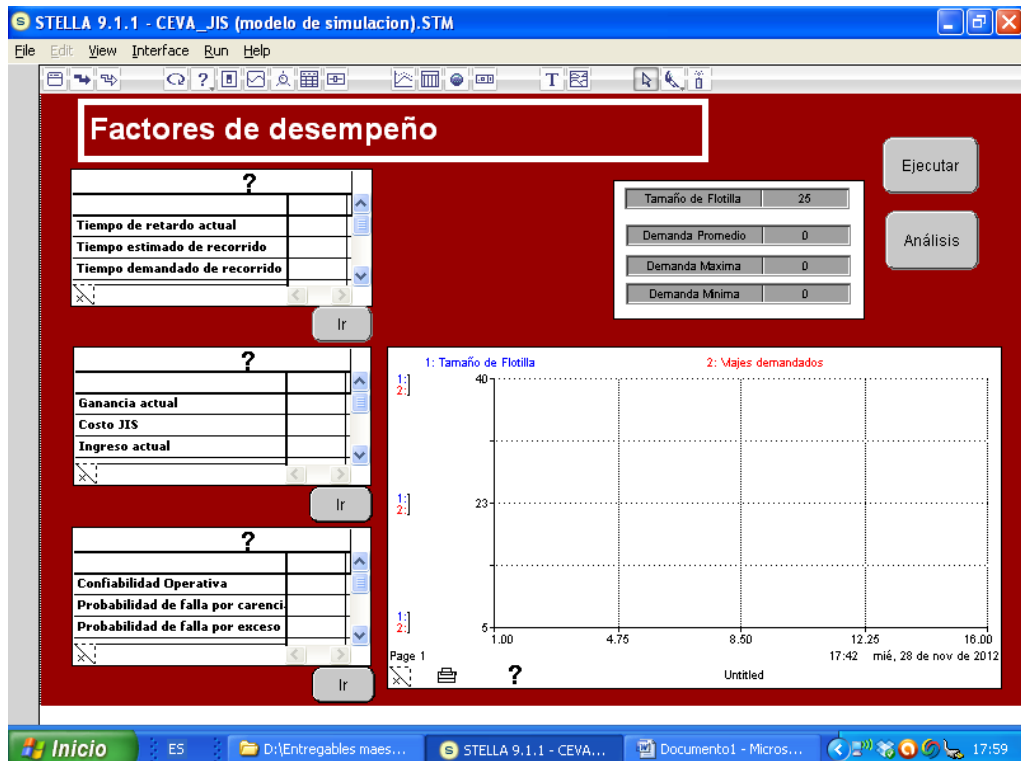




## Ventaja de entrada de Demanda



## Ventana de resultados de indicadores de desempeño



## Ventaja de resultados de indicador Tiempo



## Ventaja de resultados de indicador Costo





## ANEXO B. Ejecutables en MatLab

### I) Ajuste de la PDF condicional: "ajustecondicional.m"

```
clc
disp(' ')
disp(' ')
disp(' Este ejecutable calcula los valores del analisis condicional de probabilidad,')
disp(' en funcion de los datos bivariados')
disp(' ')
disp(' Sea  $P(t,f)=P(t|f)P(f)$ , este ejecutable calcula cuál modelo probabilistico,  $P(t|f)$ ,')
disp(' se ajusta mejor a los datos bivariados.')
```

```
disp(' ')
disp(' ')

%.....
%Entrada de datos
%.....
%Datos (entrada vectorial [.....]')
f=input(' Datos de tamaño de flotilla = ');
t=input(' Datos de tiempos de operacion = ');

%.....
%Definicion de las variables del ejecutable
%.....
n=max(f)-min(f)+1;
m=max(t)-min(t)+1;
Weight=[.10, .15, .15, .30, .20, .10]';

%.....
%Analisis de Probabilidad Condicional
%.....

%Estimacion de parametros para modelo condicional,  $P(t|f)$ :
i=min(f);
while i<=max(f)
k=i-min(f)+1;
ind=find(f==i);
Ti=t(ind,:);
ni=length(Ti);

if (length(ind)~=1 & isempty(ind)~=1 & max(Ti)~=min(Ti))
N(k,1)=i; %i-esimo valor de F
frec(k,1)=length(ind); %frecuencia del i-esimo valor de F

%Densidad empirica acumulada
[Fr,T]=ecdf(Ti);
pFr=[0; Fr(1:end-1)];
ePDF=Fr-pFr;

%Estimacion de parametros
p1(k,:)=evfit(Ti);
p2(k,:)=expfit(Ti);
p3(k,:)=gamfit(Ti);
p4(k,:)=lognfit(Ti);
p5(k,:)=wblfit(Ti);

%Valores de densidad parametrica
```

```

y1=evpdf(T(2:end),p1(k,1),p1(k,2)); %[forma, escala]
Y1=evcdf(T(2:end),p1(k,1),p1(k,2)); %[forma, escala]

y2=exppdf(T(2:end),p2(k,1)); %[forma]
Y2=expcdf(T(2:end),p2(k,1)); %[forma]

y3=gampdf(T(2:end),p3(k,1),p3(k,2)); %[forma,escala]
Y3=gamcdf(T(2:end),p3(k,1),p3(k,2)); %[forma,escala]

y4=lognpdf(T(2:end),p4(k,1),p4(k,2)); %[media, varianza]
Y4=logncdf(T(2:end),p4(k,1),p4(k,2)); %[media, varianza]

y5=wblpdf(T(2:end),p5(k,1),p5(k,2)); %[forma,escala]
Y5=wblcdf(T(2:end),p5(k,1),p5(k,2)); %[forma,escala]

    %Graficacion de Valores
    r=floor((k-1)/9)+2;
%   figure(r)

    if rem(k,9)==0
%   j=9;
    else
%   j=rem(k,9);
    end
%   subplot(3,3,j)
%   hold on
%   axis tight
%   plot(T(2:end),ePDF(2:end),'k.-')
%   plot(T(2:end),y1,'g--') %ve
%   plot(T(2:end),y2,'y--') %exp
%   plot(T(2:end),y3,'r--') %gam
%   plot(T(2:end),y4,'b--') %logn
%   plot(T(2:end),y5,'c--') %wei
%   xlabel(sprintf('F = %d',i))

%Pruebas de bondad de ajuste

%R2
Fr=Fr(2:end);
R2ev(k) =1- ( sum ( (Fr - Y1).^2 ) ) ./ sum( (Fr - mean(Fr)).^2 );
R2exp(k) =1- ( sum ( (Fr - Y2).^2 ) ) ./ sum( (Fr - mean(Fr)).^2 );
R2gam(k) =1- ( sum ( (Fr - Y3).^2 ) ) ./ sum( (Fr - mean(Fr)).^2 );
R2logn(k) =1- ( sum ( (Fr - Y4).^2 ) ) ./ sum( (Fr - mean(Fr)).^2 );
R2wei(k) =1- ( sum ( (Fr - Y5).^2 ) ) ./ sum( (Fr - mean(Fr)).^2 );

%R2_ajustado
if ni>3
R2Aev(k) = ((ni - 1)*R2ev(k) - 2) / (ni - (2 + 1));
R2Aexp(k) = ((ni - 1)*R2exp(k) - 1) / (ni - (1 + 1));
R2Agam(k) = ((ni - 1)*R2gam(k) - 2) / (ni - (2 + 1));
R2Alogn(k) = ((ni - 1)*R2logn(k) - 2) / (ni - (2 + 1));
R2Awei(k) = ((ni - 1)*R2wei(k) - 2) / (ni - (2 + 1));
else
R2Aev(k) =R2ev(k);
R2Aexp(k) =R2exp(k);
R2Agam(k) =R2gam(k);
R2Alogn(k) =R2logn(k);

```

```

R2Awei(k) =R2wei(k);
end

%Kolgomorov-Smirnov
[a,b]=kstest2(Fr,Y1);
KS1p_v(k)=b;
[a,b]=kstest2(Fr,Y2);
KS2p_v(k)=b;
[a,b]=kstest2(Fr,Y3);
KS3p_v(k)=b;
[a,b]=kstest2(Fr,Y4);
KS4p_v(k)=b;
[a,b]=kstest2(Fr,Y5);
KS5p_v(k)=b;

%Anderson-Darling
Y1inv=flipud(Y1);
Y2inv=flipud(Y2);
Y3inv=flipud(Y3);
Y4inv=flipud(Y4);
Y5inv=flipud(Y5);
nj=length(Y1);
ite=[1:1:nj]';
S1=(2*ite-1).*(log(Y1)+log(1-Y1inv));
S2=(2*ite-1).*(log(Y2)+log(1-Y2inv));
S3=(2*ite-1).*(log(Y3)+log(1-Y3inv));
S4=(2*ite-1).*(log(Y4)+log(1-Y4inv));
S5=(2*ite-1).*(log(Y5)+log(1-Y5inv));

AD1(k)=abs(-nj-sum(S1)/nj);
% A2a=NaN;
% AD1p_v(k)=NaN;

AD2(k)=abs(-nj-sum(S2)/nj);
% A2a=A2n*(1+.03/nj);
% AD2p_v(k)=1.6193*exp(-2.5964*A2a);

AD3(k)=abs(-nj-sum(S3)/nj);
% A2a=NaN;
% AD3p_v(k)=NaN;

AD4(k)=abs(-nj-sum(S4)/nj);
% A2a=A2n*(1+ (.75/nj)+(2.25/nj.^2));
% if A2a<=.2
% AD4p_v(k)=1-exp(-13.436+101.14*A2a-223.73*A2a.^2);
% elseif A2a<=.34
% AD4p_v(k)=1-exp(-8.318+42.796*A2a-59.938*A2a.^2);
% elseif A2a<=.6
% AD4p_v(k)=exp(.9177-4.279*A2a-1.38*A2a.^2);
% else
% AD4p_v(k)=exp(1.2937-5.709*A2a-.018*A2a.^2);
% end

AD5(k)=abs(-nj-sum(S5)/nj);
% A2a=A2n*(1+0.2/sqrt(nj));
% AD5p_v(k)=1/(1+exp(-.1+1.24*log(A2a)+4.48*A2a));

```

```

%AIC
if ni>80
K0=0;
elseif 4<=ni & ni<80;
K0=2*(2)*(2+1)/(ni-2-1);
else
K0=NaN;
end

AIC1(k)=2*evlike(p1(k,:),Ti) + 2*(2) + K0;
AIC2(k)=2*explike(p2(k,:),Ti) + 2*(1) + K0;
AIC3(k)=2*gamlike(p3(k,:),Ti) + 2*(2) + K0;
AIC4(k)=2*lognlike(p4(k,:),Ti) + 2*(2) + K0;
AIC5(k)=2*wbllike(p5(k,:),Ti) + 2*(2) + K0;

%BIC
BIC1(k)=2*evlike(p1(k,:),Ti) + 2*log(ni);
BIC2(k)=2*explike(p2(k,:),Ti) + 2*log(ni);
BIC3(k)=2*gamlike(p3(k,:),Ti) + 2*log(ni);
BIC4(k)=2*lognlike(p4(k,:),Ti) + 2*log(ni);
BIC5(k)=2*wbllike(p5(k,:),Ti) + 2*log(ni);

kk=k;

end
i=i+1;

end

Test1=[p1, R2ev',R2Aev',      KS1p_v',AD1',AIC1',BIC1'];
Test2=[p2, ones(kk,1),R2exp',R2Aexp',  KS2p_v',AD2',AIC2',BIC2'];
Test3=[p3, R2gam',R2Agam',      KS3p_v',AD3',AIC3',BIC3'];
Test4=[p4, R2logn',R2Alogn',    KS4p_v',AD4',AIC4',BIC4'];
Test5=[p5, R2wei',R2Awei',     KS5p_v',AD5',AIC5',BIC5'];

P=[N,frec,Test1,Test2,Test3,Test4,Test5];

%GRAFICAR UNA FIGURA POR TIPO DE PRUEBA
i=r+1;
k=1;
while k<=5
%figure(i)
%subplot(1,2,1)
%hold on
%axis tight
%plot(N,P(:,8*k-5),'k*')
%subplot(1,2,2)
%hold on
%axis tight
%plot(N,P(:,8*k-4),'o')
i=i+1;
k=k+1;
end

k=1;
while k<=5
%figure(i)

```

```

%hold on
%axis tight
%plot(N,P(:,4+k),'g')
%plot(N,P(:,12+k),'m')
%plot(N,P(:,20+k),'r')
%plot(N,P(:,28+k),'b')
%plot(N,P(:,36+k),'k')

%valor critico para cada prueba
%plot((min(N):1:max(N)),.05*ones(length(N),1),'m-')
i=i+1;
k=k+1;
end

%Seleccion de modelo condicional
k=1;
Bestfit=zeros(length(P),7);
while k<=length(P)
if isnan(N(k))~=1

Test=[P(k,(3:10));P(k,(11:18));P(k,(19:26));P(k,(27:34));P(k,(35:42))];
fit=zeros(5,6);
l=1;
while l<=6;
if l<4
[Testi,Ord]=sort(Test(:,l+2),'descend');
else
[Testi,Ord]=sort(Test(:,l+2));
end

fit(:,l)=Ord;
l=l+1;
end

Wfit=zeros(6,5);
l=1;
while l<=5;
[place,place0]=find(fit==l);
Wfit(:,l)=place;
l=l+1;
end

best=Wfit'*Weight;
better=min(best);
BFi=find(best==better);

else
best=zeros(5,1);
BFi=NaN;

end

Bestfit(k,:)= [N(k) BFi(1) best'];

k=k+1;

```



```

end

B1=sum((Bestfit(:,2)==1));
B2=sum((Bestfit(:,2)==2));
B3=sum((Bestfit(:,2)==3));
B4=sum((Bestfit(:,2)==4));
B5=sum((Bestfit(:,2)==5));

BF=max([B1,B2,B3,B4,B5]);
modelsel=find([B1,B2,B3,B4,B5]==BF);

%.....
%lista de modelo probabilistico, eleccion del mejor ajuste segun las
%pruebas de bondad
%.....

disp(' ')
disp(' ')
if modelsel==1
Parcond=Test1(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Valor extremo')
elseif modelsel==2
Parcond=Test2(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Exponencial')
elseif modelsel==3
Parcond=Test3(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Gamma')
elseif modelsel==4
Parcond=Test4(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Lognormal')
elseif modelsel==5
Parcond=Test5(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Weibull')
end

%.....
%Parametros del modelo seleccionado.
%.....

Ind=find(~isnan(Parcond(:,1))==1 & Parcond(:,1)<150);
flot=N(Ind);
Parcond=Parcond(Ind,:);

```

## II) Ajuste de la PDF marginal: "ajustemarginal.m"

```
clc
disp(' ')
disp(' ')
disp(' Este ejecutable calcula los valores del analisis marginal de probabilidad,')
disp(' en funcion de los datos bivariados')
disp(' ')
disp(' Sea P(t,f)=P(t|f)P(f), este ejecutable calcula cual modelo probabilistico, P(f),')
disp(' se ajusta mejor a los datos bivariados.')
disp(' ')
disp(' ')

%.....
%Entrada de datos
%.....

f=input(' Datos de tamaño de flotilla = ');
Weight=[.10, .15, .15, .30, .20, .10]';

%.....
%Analisis de Probabilidad Marginal
%.....

%Estimacion de parametros para modelo marginal, P(f):

[Frecu,fl]=ecdf(f);
ni=length(f);

%MODELOS A ANALIZAR
%1: poisson
%2: binomial negativa
%3: binomial

%Estimacion de parametros
pd1=poissfit(f);
pd2=nbinfit(f);
pd3=[200,.1231];

%Valores de densidad parametrica
Y1d=poisscdf(fl(2:end),pd1);

Y2d=nbincdf(fl(2:end),pd2(1,1),pd2(1,2));

Y3d=binocdf(fl(2:end),pd3(1,1),pd3(1,2));

%Pruebas de bondad de ajuste

%R2
Frecu=Frecu(2:end);
R21 =1- ( sum ( (Frecu - Y1d).^2 ) ) ./ sum( (Frecu - mean(Frecu)).^2 );
R22 =1- ( sum ( (Frecu - Y2d).^2 ) ) ./ sum( (Frecu - mean(Frecu)).^2 );
R23 =1- ( sum ( (Frecu - Y3d).^2 ) ) ./ sum( (Frecu - mean(Frecu)).^2 );

%R2_ajustado
if ni>3
```

```

R2A1 = ((ni - 1)*R21 - 1) / (ni - (1 + 1));
R2A2 = ((ni - 1)*R22 - 2) / (ni - (2 + 1));
R2A3 = ((ni - 1)*R23 - 2) / (ni - (2 + 1));

else
R2A1 =R21;
R2A2 =R22;
R2A3 =R23;
end

%Kolgomorov-Smirnov
[a,b]=kstest2(Frecu,Y1d);
KS1p_vd=b;
[a,b]=kstest2(Frecu,Y2d);
KS2p_vd=b;
[a,b]=kstest2(Frecu,Y3d);
KS3p_vd=b;

%Anderson-Darling
Y1invd=flipud(Y1d);
Y2invd=flipud(Y2d);
Y3invd=flipud(Y3d);
nj=length(Y1d);
ite=[1:1:nj]';
S1d=(2*ite-1).*(log(Y1d)+log(1-Y1invd));
S2d=(2*ite-1).*(log(Y2d)+log(1-Y2invd));
S3d=(2*ite-1).*(log(Y3d)+log(1-Y3invd));

AD1d=abs(-nj-sum(S1d)/nj);
AD2d=abs(-nj-sum(S2d)/nj);
AD3d=abs(-nj-sum(S3d)/nj);

%AIC
if ni>80
K0=0;
elseif 4<=ni & ni<80;
K0=2*(2)*(2+1)/(ni-2-1);
else
K0=NaN;
end

%con RSS
AIC1d=ni*log(sum ( (Frecu - Y1d).^2)./ni) + 2*(1) + K0;
AIC2d=ni*log(sum ( (Frecu - Y2d).^2)./ni) + 2*(2) + K0;
AIC3d=ni*log(sum ( (Frecu - Y3d).^2)./ni) + 2*(2) + K0;

%BIC
BIC1d=ni*log(sum ( (Frecu - Y1d).^2)./ni) + 2*log(ni);
BIC2d=ni*log(sum ( (Frecu - Y2d).^2)./ni) + 2*log(ni);
BIC3d=ni*log(sum ( (Frecu - Y3d).^2)./ni) + 2*log(ni);

%seleccion de modelo
Testd1=[pd1,1,R21,R2A1,KS1p_vd,AD1d,AIC1d,BIC1d];
Testd2=[pd2,R22,R2A2,KS2p_vd,AD2d,AIC2d,BIC2d];
Testd3=[pd3,R23,R2A3,KS3p_vd,AD3d,AIC3d,BIC3d];

Testd=[Testd1;Testd2;Testd3];
fit=zeros(3,6);

```

```

l=1;
while l<=6;
if l<4
[Testi,Ord]=sort(Testd(:,l+2),'descend');
else
[Testi,Ord]=sort(Testd(:,l+2));
end

fit(:,l)=Ord;
l=l+1;
end

Wfit=zeros(6,3);
l=1;
while l<=3;
[place,place0]=find(fit==l);
Wfit(:,l)=place;
l=l+1;
end

best=Wfit'*Weight;
better=min(best);
BFd=find(best==better);

%.....
%lista de modelo probabilistico, eleccion del mejor ajuste segun las
%pruebas de bondad
%.....

disp(' ')
disp(' ')
if BFd==1
Parmarg=Testd1(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Poisson')
elseif BFd==2
Parmarg=Testd2(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Binomial negativa')
elseif BFd==3
Parmarg=Testd3(:,(1:2));
disp(' Mejor modelo probabilistico: Binomial ')
end

%.....
%Parametros del modelo seleccionado.
%.....

Ind=find(~isnan(Parmarg(:,1))==1 & Parmarg(:,1)<150);
Parmarg=Parmarg(Ind,:);

```

### III) Ajuste de la PDF bivariada: "ajustebivariado.m"

```
clc
disp(' ')
disp(' ')
disp(' Esta ejecutable calcula los valores del analisis multivariado de confiabilidad,')
disp(' en funcion de la PDF Bivariada definida de los ajustes condicional y marginal. ')
disp(' ')
disp(' Sea  $P(t,f)=P(t|f)P(f)$ , este ejecutable calcula los valores del modelo probabilistico,  $P(t,f)$ ,')
disp(' en funcion de los datos datos de  $P(t|f)$  y  $P(f)$ .' )
disp(' ')
disp(' ')

%.....
%Entrada de datos
%.....
f=input(' Datos de tamaño de flotilla = ');
t=input(' Datos de tiempos de operacion = ');

%.....
%Analisis de datos bivariados
%.....

figure(1)
[n1,ctr1] = hist(f,n);
[n2,ctr2] = hist(t,m);

subplot(2,2,2);
plot(f,t, '.'); axis tight
h1=gca;
title('Análisis Bivariado');
xlabel('Flotilla'); ylabel('Tiempo de operacion');
subplot(2,2,4); bar(ctr1,-n1,1); axis tight
h2=gca;
subplot(2,2,1); barh(ctr2,-n2,1); axis tight
h3=gca;

set(h1,'Position',[0.35 0.35 0.55 0.55]);
set(h2,'Position',[.35 .1 .55 .15]);
set(h3,'Position',[.1 .35 .15 .55]);
colormap([.8 .8 1]);

%.....
%Definicion de las variables del ejecutable
%.....
n=max(f)-min(f)+1;
m=max(t)-min(t)+1;
F=[min(f):1:max(f)];
T=[min(t):1:max(t)];
PDFcond=zeros(n,m);
PDFmarg=zeros(n,m);
PDFBiv=zeros(n,m);
CDFBiv0=zeros(n,m);
CDFBiv1=zeros(n,m);
CDFBiv2=zeros(n,m);
DC2=zeros(n,m);
DD=zeros(n*m,1);
DNP = hist3([f,t], {F T});
NPB=zeros(n*m,1);
```

```

%.....
%Valores de la funcion de densidad de probabilidad
%.....

i=1;
while i<=n
    j=1;
    while j<=m

%-----
%Definicion de la PDF bivariada esta en funcion de los modelos condicional y
% marginal seleccionados, y el ajuste polinomial de F vs Parametros del
% Modelo Condicional
%-----

%Modelo jerarquico: Lognormal - Binomial negativa

% A. Condicional Parametrico
% Parametros
    %mu=fittedmodel1(F(i));
    %sigma=fittedmodel2(F(i));
    mu=7.683e-7*F(i).^4 - 0.0001207*F(i).^3 + 0.006236*F(i).^2 - 0.09231*F(i) + 4.377;
    sigma= -5.017e-7*F(i).^3 + 0.0005813*F(i).^2 - 0.02497*F(i) + 0.5050;
    sigma=max(1e-10,sigma);

% Modelo Parametrico
%PDFcond(i,j)= ( ( 1 ./ ( T(j).*sigma.*sqrt(2*pi) ) ) * exp( - (log(T(j))-mu).^2 ./ (2.*sigma.^2) ) ) );
    PDFcond(i,j)=lognpdf(T(j),mu,sigma);

% A. Marginal Parametrico
% Parametros
    omega=Parmarg(1);
    lambda=Parmarg(2);

% Modelo Parametrico
%PDFmarg(i,j)=( gamma(omega+F(i))./ (gamma(omega).*gamma(F(i)+1)) ).*( lambda.^omega .* (1-lambda).^F(i)
));
    PDFmarg(i,j)=nbinpdf(F(i),omega,lambda);

% A. Bivariado
% Modelo Parametrico
    PDFBiv(i,j)=PDFcond(i,j).*PDFmarg(i,j);

% Analisis Bivariado Parametrico
% PDFBivPar = @(t,f)( ( 1 ./ ( t .*sigma.*sqrt(2*pi) ) ) * exp( - (log(t) -mu).^2 ./ (2.*sigma.^2) ) ) .* (
(gamma(omega+f)./ (gamma(omega).*gamma(f)) ).*( lambda.^omega .* (1-lambda).^f ) );
% CDFBiv0(i,j) = dblquad(PDFBivPar,.001,F(i),T(j),max(T)+1); %Probabilidad de estabilidad
% CDFBiv1(i,j) = dblquad(PDFBivPar,F(i),max(F)+1,.001,T(j)); %Probabilidd de carencia
% CDFBiv2(i,j) = dblquad(PDFBivPar,.001,F(i),00.1,T(j)-1); %Probabilidad de exceso
    ii=(i-1)*m+j;

% Resultados del ajuste de probabilidad
%[flotilla, Tiempo, Par1cond, Par2cond, Densi condi, Par1marg, Par2marg, Densi marg, Densi conju, Confiabilidad,
Prob carencai, Prob exceso, Prob falla total]
    DD(ii,1:9)=[F(i) T(j) mu sigma PDFcond(i,j) omega lambda PDFmarg(i,j) PDFBiv(i,j)];

    j=j+1;

```

```

    end
    i=i+1;
end

%.....
%Valores para el analisis de confiabilidad
%.....
g=1;
while g<=n;
h=1;
    while h<=m;
        CDFBiv0(g,h)=sum(sum(PDFBiv(1:g,h:end))); %Probabilidad de exito (Confiabilidad)
        CDFBiv1(g,h)=sum(sum(PDFBiv(g+1:end,1:h))); %Probabilidad de falla por carencia
        if h==1;
            CDFBiv2(g,h)=0;
        else
            CDFBiv2(g,h)=sum(sum(PDFBiv(1:g,1:h-1))); %Probabilidad de falla por exceso
        end

        hh=(g-1)*m+h;
        DD0(hh,1:3)=[CDFBiv0(g,h) CDFBiv1(g,h) CDFBiv2(g,h)];

        h=h+1;
    end
    g=g+1;
end

%Valores del Ajuste Multivariado de Confiabilidad
VAMC=[DD,DD0];

%.....
%Grafica de datos
%.....
figure(i+1)
hist3([f,t],[n,m]);
xlabel(sprintf('Análisis empírico'))

%z1=hist3([f,t],[n,m]);
%i=1;
%datbivi=ones(1,0);
%datbiv=ones(1,0);
%while i<=62
%datbiv=[datbivi z1(i,:)];
%datbivi=datbiv;
%i=i+1;
%end
%bivemp=datbiv/length(t);
%plot3(VAMC(:,1),VAMC(:,2),bivemp,'r*')

figure(i+2)
plot3(VAMC(:,1),VAMC(:,2),VAMC(:,9),'r*')
xlabel(sprintf('Análisis parametrico: PDF bivariada '))
figure(i+3)
plot3(VAMC(:,1),VAMC(:,2),VAMC(:,10),'.')
xlabel(sprintf('Análisis parametrico: CDF bivariada (Confiabilidad) '))

```