

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
COMPUTACIÓN



ANÁLISIS Y CUANTIFICACIÓN DEL EFECTO DOMINÓ DE
LA CADENA DE SUMINISTRO DEL SECTOR AUTOMOTRIZ: UN
ENFOQUE CON DINÁMICA DE SISTEMAS

Mtro. Víctor Hugo de la Cruz Madrigal

Presentado al comité tutorial del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería
Avanzada (DOCIA) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Marzo 2026

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Planteamiento del problema	5
1.2. Objetivo general	10
1.3. Objetivos particulares	10
1.4. Hipótesis.....	10
1.5. Preguntas de investigación	10
1.6. Alcance del proyecto.....	11
1.7. Limitaciones.....	11
1.8. Justificación	11
2. REVISIÓN DE LITERATURA	14
2.1. Antecedentes	14
2.1.1. Gestión de la demanda en la cadena de suministro	14
2.1.2. Inventarios en la cadena de suministro.....	16
2.1.3. Tiempo de entrega (LT)	18
2.1.4. Factores de riesgo en la cadena de suministro.....	19
2.1.5. Efecto látigo en la cadena de suministro	20
2.1.6. Efecto dominó en la cadena de suministro	22
2.1.7. Desempeño de la cadena de suministro	26
3. METODOLOGÍA	28
3.1. Definir los atributos sobre la variabilidad del efecto dominó.....	28
3.2. Diseñar, validar y aplicar el cuestionario sobre el efecto dominó	29
3.3. Determinar las ecuaciones del modelo para evaluar el efecto dominó	30
3.4. Representar el modelo en un diagrama causal y de flujo.	38
3.4.1. Diagrama causal con disrupción.....	39
3.4.2. Diagrama de flujo receiving delay	43
3.4.3. Diagrama de flujo de detección de anomalías	46
3.4.4. Diagrama de flujo de inventario máximo	47

3.4.5. Diagrama de flujo de ventas perdidas	48
3.4.6. Diagrama de flujo de costos de desempeño de la cadena de suministro	49
3.5. Interpretar y analizar la información obtenida del modelo	52
3.6. Comparar los resultados obtenidos y validarlos, usando un análisis de sensibilidad.	52
4. RESULTADOS	53
4.1. Resultados del diseño y elaboración del cuestionario	53
4.2. Entrevista personal a los gerentes	54
4.3. Pronósticos de la demanda con <i>Machine Learning (ML)</i>	55
4.4. Pronósticos de la demanda con PYTHON	57
4.5. Análisis e interpretación del modelado de la demanda sin interrupción y con interrupción en la cadena de suministro	58
4.6. Comparar los resultados y validarlos mediante un análisis de sensibilidad	60
5. CONCLUSIONES	69
5.1. Trabajos futuros de investigación.....	71
5.2. Actividades divulgación y formación académica.....	72
REFERENCIAS	74
Anexo 1	84

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación se enfoca en analizar y cuantificar el efecto dominó en la cadena de suministro de la industria automotriz, en los proveedores de nivel 1 que suministran componentes que son ensamblados en el vehículo (Tier 1).

Algunos autores Remko (2020); Ivanov y Dolgui, (2020); informaron que el COVID -19 fue un factor clave para favorecer la disrupción de la cadena de suministro de la industria automotriz a nivel global, como resultado, la falta de suministro de material a las armadores, porque la mayoría de los proveedores clave se encuentran en China durante el segundo cuatrimestre del 2020 afectando a empresas, centros de distribución y operadores logísticos, de manera adversa. En este sentido, se generaron una cascada de cancelaciones de pedidos a los proveedores, impactando de forma negativa las economías emergentes como el caso de México donde la industria automotriz detuvo sus operaciones. Así mismo, Vieyra et al. (2021) consideran que la demanda de vehículos disminuyó abruptamente, por ende, muchos clientes prefieren posponer sus compras. Este decremento de la demanda afecta tanto a los vehículos nuevos como a los vehículos seminuevos y a los proveedores de primer nivel.

De acuerdo al trabajo de Ivanov, (2020) concluye que la emergencia sanitaria (COVID 19) favorece el efecto dominó en la cadena de suministro, al retrasar los tiempos de entrega hasta de 90 días de los proveedores de China, Estados Unidos, Sudamérica y Europa. Sin embargo, antes de la pandemia el tiempo promedio de entrega era de 30 días. Sin embargo, busca simular el impacto de la disrupción de la CS para evaluar los riesgos de interrupción del proveedor y predecir la disrupción al estimar los tiempos de arribo que dependen de la demanda, inventario y la capacidad.

Desde esta perspectiva, la selección del tema de investigación referido al Efecto Dominó (ED) en la Cadena de Suministro (CS). En tanto; Ivanov et al. (2018); Ivanov (2019), lo definen como la propagación de la disrupción en la cadena de suministro, por la escasez de material y capacidad de respuesta por el proveedor debido a los cambios solicitados por el cliente, problemas de calidad que impacta directamente en ventas, el tiempo de entrega y la rentabilidad, menor participación en el mercado, retrasos en los pedidos del cliente. Garvey y Carnovale (2020) comentan que el efecto dominó es un evento no planeado y no previsto que interrumpe el flujo de materiales y productos en la cadena de suministro impactando de forma negativa en la satisfacción del cliente.

De acuerdo al trabajos presentador por DuHadway et al. (2019), consideran el riesgo en la cadena de suministro como el antecedente del efecto dominó. En tanto Wu et al. (2006) consideran que el riesgo es percibido como la mayor amenaza en las empresas. En tanto Tang (2006); Avelar et al. (2019), clasifican los riesgos potenciales asociados al flujo de material, de dinero, y de información que influyen en la interrupción de las operaciones de la cadena de suministro. En el estudio de Sawik (2019) se minimizan las perdidas debido a la escasez de materiales por el proveedor a través del incremento de inventario. Ivanov (2022) define la incertidumbre como una característica desconocida del sistema acerca de lo que sucederá en el futuro, por ejemplo, se desconoce el comportamiento de la demanda, así mismo el riesgo lo define como la probabilidad de que ocurra un efecto negativo que desvíe del cumplimiento de los objetivos.

Algunos estudios han presentado los factores de riesgo en la cadena de suministro que favorecen al efecto dominó. Manuj y Mentzer (2008); Ivanov et al. (2018); Ivanov et al. (2019); Riesgos externos (accidentes, desastres naturales, colapso financiero, cambios de leyes):

- a) Demanda (variabilidad, cliente en Bancarrota, cambios radicales del cliente).
- b) Proveedores (falta de capacidad, bancarrota, fluctuación de precios, escasez de materiales. inestabilidad en la calidad y cantidad de productos).
- c) Retrasos en los procesos en la cadena de suministro.
- d) Información (falta de comunicación e infraestructura).
- e) Transporte.

1.1.Planteamiento del problema

Realizar un análisis de los factores de riesgo que favorecen al efecto dominó de la cadena de suministro del sector automotriz, al tener una variabilidad en la demanda con un efecto dominó que impacta directamente en la insatisfacción del cliente, debido a la reducción del nivel de servicio y al cumplimiento de órdenes, por los altos costos de inventario de material y cuellos de botella en la cadena de suministro cuando existe un decremento en la demanda con el riesgo de interrupción.en tanto, Sarkar y Kumar (2015) se enfocan en analizar las interrupciones parciales de la cadena de suministro utilizando una menor capacidad de producción con altos costos de manufactura utilizando una producción ajustada(tiempo, extra, envíos adicionales con trasporte eficiente con simulación.

En la cadena de suministro del sector automotriz han existido inestabilidades y fluctuaciones en demanda conocidos como el efecto látigo Se conocen desde hace varios años como un problema que afecta a las compañías. Por lo tanto, el efecto látigo indica que existe una propagación en las fluctuaciones de la demanda, a medida que van incrementándose los pedidos de los clientes a los

proveedores les puede resultar muy costoso y con una desventaja porque deben de tener exceso de inventario de capacidad para afrontarlo con pocos beneficios.

Autores como He et al. (2019), adhieren la cantidad óptima a ordenar al proveedor donde existe una correlación entre la demanda y el precio del material para minimizar los factores de riesgo por medio de programación lineal entera. Udenio et al. (2017) consideran integrar la variabilidad del inventario mediante la teoría de control. Sinha et al. (2020) mencionan que minimizar la variabilidad de la demanda para reducir el costo de interrupción de la CS. Minner y Transchel (2017), mejoran el nivel de servicio al reducir la variabilidad de las órdenes enviadas al cliente. Por su parte, Ang et al. (2017) argumentan que la variación de la demanda en los proveedores se ubica entre el 5% al 20%. En consecuencia los proveedores TIER 1 aceptan mitigar el riesgo de inventario.

De acuerdo al trabajo de Giannoccaro y Iftikhar (2020) proponen centralizar la red de proveedores donde el inventario es administrado por el proveedor o política de resurtido continuo. En consecuencia, los proveedores toman la decisión del tiempo de resurtido y la cantidad de pedido a enviar sin incluir el costo por administrar el inventario en la industria automotriz. Cannella et al. (2021) en su investigación desarrollan un modelo cuantitativo que ayuda a mitigar y responder a las interrupciones de la CS de proveedor y minorista buscando el equilibrio entre el nivel de servicio al cliente con respecto a los costos de inventario, al considerar la variabilidad de la producción y del transporte para satisfacer la demanda del cliente, a fin de evitar una mala reputación, utilizando el costo del inventario de ciclo.

En su trabajo de Wang y Disney (2017) estudiaron la política de reposición de envíos con respecto a la variabilidad del inventario con una política de revisión periódica, asumiendo que el modelo tiene una Demanda estocástica, un tiempo de entrega con alta variabilidad. Sin embargo en la práctica se requiere ajustar el transporte para evaluar los retrasos en los tiempos de entrega de los pedidos al cliente en la cadena de suministro, como resultado analizar el costo y ajustar el transporte cuando; a) bajo stock de seguridad, b) alta demanda que impactan en el tiempo de entrega. Gao et al. (2019), Lücker et al. (2019) en su trabajo determinan el nivel de inventario en una red de proveedores para minimizar la pérdida de ventas con un modelo de programación lineal, no incluyen el tiempo de entrega en la mitigación del riesgo y asumen la escasez de materiales de forma aleatoria, en tanto sugieren integrar un buffer adicional al nivel de inventario para suavizar la variabilidad de la demanda y el tiempo de entrega.

Por su parte, Jahani et al. (2021) estudian el impacto que tiene el inventario en la interrupción en el nivel de servicio del proveedor, utilizando una política de inventario de revisión periódica con programación lineal, asumiendo la capacidad del proveedor es reabastecida, considerando el costo de

penalización. Lopes et al. (2020) proponen utilizar una política de inventarios de revisión periódica en una red de proveedores con múltiples clientes para comparar la optimización de los pedidos enviados al cliente.

Recientes estudios modelan y miden el impacto de la disrupción en los proveedores en una sola etapa. No obstante, se requiere explorar el impacto del efecto dominó en una red de proveedores. Hosseini et al (2020) integraron cadenas de Márkov y redes Bayesianas de manera dinámica para modelar la disrupción de los proveedores y evaluar su nivel de servicio en una cadena de suministro de dos eslabones con una disminución en la demanda, donde excluyen el tiempo de entrega, la pérdida de participación en el mercado. Amiri et al. (2018) optimizan el nivel de inventario con una política de revisión periódica en una red de centros de distribución con una demanda estacional, mediante modelos de simulación.

En el trabajo de Sawik, (2019) se optimiza el costo del inventario y el nivel de servicio mediante la programación lineal entera, al comparar multiperiodos en una red de proveedores que surten a varios clientes. Alvertzeth et al (2020) agregan la disrupción en el transporte que puede causar retrasos en los pedidos, afectando al nivel de servicio en la cadena de suministro de tres eslabones con cuatro clientes minoristas mediante el modelado con simulación de eventos discretos.

El estudio presentado por Özçelik et al. (2021) desarrollaron un modelo de optimización robusta en una cadena de suministro inversa, aplicado a empresas de reciclaje en Turquía para minimizar el impacto a largo plazo de la disrupción, mediante una estrategia proactiva. El modelo considera una demanda con incertidumbre en un solo periodo y limitado a un caso de estudio en dos empresas de reciclaje para mejorar el nivel de servicio al cliente y minimizar el costo. Chauhan et al. (2021) desarrollaron un modelo robusto aplicado en una red de proveedores compleja de la industria automotriz para predecir y controlar la propagación de la disrupción, asumiendo un decremento en la demanda, como resultado mejorar el nivel de servicio a los clientes. El modelo se enfocó únicamente en el flujo de materiales se excluye los escenarios dinámicos y los costos.

Las diversas metodologías encontradas en la literatura para resolver problemas de riesgo se muestran en la Tabla 1.1, donde se identifica; dinámica de sistemas, simulación, simulación de eventos discretos, programación lineal que utilizaron para analizar y cuantificar el efecto dominó en la cadena de suministro.

Tabla 1.1. Metodologías utilizadas para analizar el efecto dominó.

Autores	Metodología
Sánchez et al. (2020); Bueno y Cedillo (2014); Domínguez et al. (2020); Badakhshan et al. (2020); Olivares y ElMaraghy (2021); Cannella et al. (2021); Duan et al. (2021); Rathore et al. (2021);	Dinámica de sistemas
Ivanov (2017); Ivanov et al. (2018); Michna et al (2017); Ivanov et al. (2016b); Scheibe y Blackhurst (2018); Saputro et al. (2020); Li et al. (2017); Kinra et al. (2019); Sarkar y Kumar (2015); Giannoccaro y Iftikhar (2020);	Simulación
Dolgui et al. (2018); Ivanov y Dolgui, (2020), Ivanov, (2020); Esmizadeh et al. (2021); Ivanov et al. (2017); Dolgui et al. (2019); Llanuro et al. (2021); de la Cruz et al. (2026)	Revisión de literatura
Ivanov y Dolgui (2019); Ivanov (2019a); Albertzeth et al (2020)	Simulación de eventos discretos
Sokolov et al (2016); Ivanov et al. (2016a); Ivanov et al. (2017 b); Jahani et al. (2021); Sawik, (2019).	Programación lineal
Sinha et al. (2020); Özçelik et al (2021); Chauhan et al. (2021)	Robusta
Hosseini et al. (2020)	Bayesiana
Khan et al. (2019); Bevilacqua et al. (2018); Avelar et al (2019);	Cuestionario

En la cadena de suministro de la industria automotriz en México, tiene una variabilidad en la demanda, porque al incrementarse los pedidos de los clientes de manera abrupta por parte de las armadoras de vehículos (OEMs), afecta directamente a los proveedores Tier 1) que suministran componentes automotrices para el ensamble del vehículo al cambiar sus planes de producción para cumplir con los pedidos que el cliente les solicita. Sin embargo, el proveedor Tier 1 tiene que asumir el riesgo de hacer cambios de planes de producción al incurrir el tiempo extra, darle prioridad a las órdenes atrasadas, stock de seguridad de dos semanas con una política de inventarios, se efectúan pedidos adicionales de material a sus proveedores Tier 2 con un costo mayor afectando el tiempo de entrega “*Lead time por sus siglas en inglés (LT)*” y el nivel de servicio. Por ende, el proveedor Tier 1 presenta una insatisfacción del cliente por retraso de pedidos por la ampliación del tiempo de entrega.

Pocos estudios se han enfocado en visualizar el comportamiento dinámico del efecto dominó en la cadena de suministro con un plan táctico para mejorar el desempeño de los proveedores, debido a que son el principal factor de riesgo de la disrupción. El efecto dominó que se presenta en la cadena de suministro del sector automotriz, se debe a la insatisfacción del cliente a causa de; la reducción de pedidos a los proveedores, cancelación de nuevos proyectos de ingeniería.

En conclusión, algunos autores asumen que el efecto dominó es un decremento de la demanda en función del tiempo; donde la demanda del cliente es estocástica, se distribuye normalmente de manera aleatoria. Por lo tanto, la variabilidad de la demanda se debe a que los clientes hacen sus pedidos de manera abrupta al proveedor quien asume el riesgo de tener un nivel de inventario alto para cumplir con los pedidos solicitados por el cliente a un alto costo. El control de inventario se lleva por lo general con una política de revisión continua y un tiempo de entrega constante y excluyen el tiempo de entrega variable para determinar el punto de reorden que permite determinar en qué periodos se envía el pedido. Sin embargo, no es conveniente asumir un tiempo de entrega constante por la incertidumbre que existe en los cambios en el mercado global a causa del COVID, además un tiempo de entrega prolongado favorece al efecto látigo que es la propagación de la variabilidad de la demanda con respecto a los pedidos entregados. Por consiguiente, el efecto látigo impacta en las operaciones de la cadena de suministro e influye en el efecto dominó que causa un incremento de costos en el desempeño de la cadena de suministro (CDCS) por la insatisfacción del cliente, pérdida de ventas, menor nivel de servicio y costos de penalización a los proveedores por el retraso de los pedidos.

Bajo dichas premisas, se indican las relaciones entre las variables; demanda, inventario, tiempo de entrega, efecto látigo, efecto dominó. Donde el efecto dominó en la CS causa una menor rentabilidad y un incremento de costos de desempeño en la cadena de suministro por la insatisfacción del cliente, ventas perdidas, cancelación de pedidos, retrasos de pedidos, y costos por penalización. Las características del modelo propuesto son:

1. El modelo asume que la demanda de los clientes es estocástica y se distribuye normalmente de manera aleatoria, donde la media es 0, una varianza 1, Misma que se pretende pronosticar usando suavización exponencial con un Alpha entre $0 < X < 1$ con error.
2. El proveedor Tier 1 sigue una política de reabastecimiento hasta el punto de reorden, mediante una política de inventarios de revisión periódica, con un nivel de servicio (Z). Donde se usará un modelo de pronóstico para estimar la demanda promedio y la desviación estándar con respecto al tiempo de entrega y al error del pronóstico para cuantificar la cantidad de pedidos enviados al cliente con respecto a un tiempo (t).
3. El tiempo de entrega es variable obteniéndose del tiempo de entrega promedio.
4. Se cuantifica el efecto látigo al considerar la varianza de los pedidos colocados al cliente entre la varianza de la demanda del cliente.
5. Partiendo del efecto látigo, se evalúa el efecto dominó, calculando el tiempo de interrupción en la cadena de suministro que impacta en los CDCS conformados por la insatisfacción del cliente, pérdida de ventas, cancelación de pedidos, y menor nivel de servicio.

1.2. Objetivo general

Cuantificar y evaluar el efecto domino mediante un modelo con una política de inventario de revisión periódica, un tiempo de entrega variable, y demanda estocástica para los proveedores de nivel 1 (Tier1) para encontrar el impacto en el desempeño de la cadena de suministro.

1.3. Objetivos particulares

1. Evaluar los factores de riesgo que influyen en la disrupción de la cadena de suministro de las variables demanda, inventario, tiempo de entrega, efecto látigo.
2. Diseñar un modelo matemático para cuantificar la variabilidad del efecto dominó en la cadena de suministro de acuerdo con la demanda, inventario, tiempo de entrega, efecto látigo, efecto dominó,
3. Cuantificar y analizar el impacto de la variabilidad del efecto dominó en los costos de desempeño en la cadena de suministro del sector automotriz en proveedores Tier 1 a partir de dinámica de sistemas.
4. Validar el modelo mediante un análisis de sensibilidad de las variables; demanda, inventario, tiempo de entrega.

1.4. Hipótesis

H₁: Con la propagación del decremento de la demanda en la CS, se incrementa el efecto dominó y aumenta los retrasos. Se reduce el nivel de servicio que impacta de forma negativa aumentar la cascada de cancelaciones de pedidos por parte de los clientes e incrementa los costos en la cadena de suministro.

H₂: Con la propagación de la variabilidad de la demanda en la cadena de suministro del sector automotriz favorece al efecto látigo que influye en el efecto dominó

H₃: Al cuantificar y evaluar el efecto dominó de la cadena de suministro del sector automotriz con una política de inventario de revisión periódica con un tiempo de entrega variable tendrá un impacto positivo en los costos de desempeño.

1.5. Preguntas de investigación

1. ¿Qué factores de riesgo influyen en la disrupción de la cadena de suministro del sector automotriz que favorecen la propagación del decremento de la demanda y cuál es su efecto dominó?
2. ¿Qué factores de riesgo influyen en la propagación de la variabilidad de la demanda en la cadena de suministro del sector automotriz que favorecen al efecto látigo y cómo influye en el efecto dominó?

3. ¿Cómo cuantificar y evaluar el efecto dominó de la CS del sector automotriz al considerar una política de inventario de revisión periódica con un tiempo de entrega variable y cuál es su impacto en los costos de desempeño en la cadena de suministro?

1.6. Alcance del proyecto

El alcance de esta investigación considera evaluar el efecto dominó en la cadena de suministro de la industria automotriz en proveedores Tier 1 y Tier 2, mediante un modelo de simulación con dinámica de sistemas con las variables demanda estocástica que se distribuyen normalmente de manera aleatoria, con una política de inventario de revisión periódica, al integrar un tiempo de entrega variable para ajustar el nivel de inventario que influye en el efecto látigo, así mismo determinar la correlación que existe entre el efecto dominó y el efecto látigo así como su impacto en el costo del desempeño de la CS, a través de la aplicación de encuestas a 100 proveedores,

1.7. Limitaciones

Una de las principales limitantes en este proyecto es la disposición de las empresas del sector automotriz para colaborar y proporcionar información acerca de sus tiempos de entrega, demanda, *stock* de seguridad, con políticas de información confidencial. Dichas empresas se basan en la norma IATF 16949:2016 que establece los requisitos del sistema de gestión de calidad de los proveedores Tier 1 que suministran componentes que se ensamblan en el vehículo y en proveedores Tier 2 que suministran componentes a los proveedores Tier 1.

Otra limitante es asumir que la información proporcionada por las empresas participantes se considera como confiable y verdadera. Con la información obtenida se realizará la modelación por lo que los resultados serán aproximados a la situación real del sector evaluado. La recolección de datos se limitará a empresas de autopartes Tier 1 y Tier 2 en el clúster automotriz del Bajío en México con restricciones de aplicar el cuestionario por el COVID 19. Por lo tanto, se busca aplicar el cuestionario de forma electrónica, en consecuencia, el tiempo de respuesta por parte de las empresas podría ser mayor.

1.8. Justificación

El efecto dominó (ED) es un fenómeno bastante nuevo, mientras el efecto látigo en la cadena de suministro lo han estudiado por más de 20 años en la literatura. Dolgui et al. (2019) demostraron que el efecto dominó favorece al efecto látigo. Olivares y ElMaraghy (2021), mencionan que otros estudios han modelado y analizado el impacto que causa las interrupciones en la cadena de suministro al excluir a los proveedores Tier 2.

En la investigación de Rozhkov y Ivanov (2018) se analiza el efecto dominó en la cadena de suministro de dos eslabones con cinco centros de distribución, mediante modelos de simulación el impacto que tienen tanto en el número de pedidos entregados al cliente, así como el nivel de servicio y costos en un laboratorio. Ivanov et al. (2018), propusieron un análisis cuantitativo del efecto dominó mediante la aplicación de una encuesta para evaluar la demanda, el tiempo de entrega, inventarios para controlar las interrupciones de la cadena de suministro de forma dinámica.

De acuerdo con el Registro Abierto de la Industria Automotriz de Vehículos Ligeros (RAIAVL) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, General Motors Complejo Silao, Guanajuato, se consolida como el máximo productor a nivel nacional con 169,044 unidades, Honda 68,562 unidades, Mazda 62,488 unidades, Toyota 59,355 unidades. Por lo tanto, el Estado de Guanajuato produjo 359,449 vehículos ligeros lo que lo coloca en el primer lugar a nivel nacional, Coahuila 262,344, Aguascalientes 232,630, Puebla 225,738, Nuevo León 135,700 unidades. Lo que representa que el 21.63% de todos los automóviles hechos en México durante el primer semestre del 2022 son fabricados en Guanajuato.

Uno de los beneficios de la investigación es el diseño de un modelo matemático que simule el efecto dominó de la cadena de suministro en la industria automotriz en proveedores Tier 1 que ayude a mejorar su nivel de servicio, incrementar su capacidad de respuesta, al reducir el tiempo de entrega, al predecir el comportamiento de la demanda con dinámica de sistemas mediante análisis de sensibilidad con distintos escenarios considerando una política de inventario de revisión periódica, reabastecimiento de órdenes, con un tiempo de entrega variable que permita cuantificar el efecto látigo de la CS, así mismo evaluar el efecto dominó para determinar el impacto en los costos de desempeño de la cadena de suministro.

Desde este punto de partida la contribución de esta investigación es cuantificar y evaluar el comportamiento del efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz mediante un modelo matemático con dinámica de sistemas. El modelo matemático incluye la relación que existe entre las variables de estudio a) una demanda estocástica que se distribuye normalmente de forma aleatoria para pronosticar su variabilidad por medio de Adaboost Regresor, b) inventario con una política de inventarios de revisión periódica para enviar cada pedido al cliente hasta llegar al punto de reorden, c) estimar la variabilidad de la demanda con respecto al tiempo de entrega variable que se obtiene utilizando un promedio del tiempo de entrega de periodos anteriores con un pronóstico de promedios móviles, como resultado estimar la demanda del tiempo de entrega, es la columna vertebral del control de inventarios, d) cuantificar el efecto látigo al capturar la variabilidad del inciso b entre la variabilidad del inciso a, como resultado sí la varianza es > 1 existe el riesgo de efecto látigo en la cadena de suministro, e) cuantificar el efecto dominó en CS considerando la variabilidad del abastecimiento por el

proveedor Tier 1, f) medir la influencia que existe entre ED/EI, g) evaluar el impacto que tiene CDCS que incluye nivel de servicio, satisfacción del cliente con ED. El modelado permite una aproximación a los resultados reales de los factores de riesgo que favorecen la variabilidad de la demanda y el retraso de pedidos que influyen en el nivel de servicio.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Este apartado pretende mostrar los antecedentes del problema que se plantea mediante una revisión de literatura que se divide en tres etapas. En la etapa 1 se definen las palabras clave *ripple effect and supply chain*, después de analizar la tendencia del campo de investigación sobre el efecto dominó en la cadena de suministro. Se delimitó la búsqueda de artículos publicados del periodo 2014 al 2022 en la base de datos SCOPUS obteniéndose 198 artículos científicos publicados en las áreas de ingeniería y gestión de negocios y se excluyen las áreas de ambiental y salud. Se realizó un meta-análisis con la cantidad de artículos obtenidos y se guardó en la base de datos con formato RIS (Sistema de información para la investigación) para exportarla al software VosViewer.

En la etapa dos se caracterizaron 172 artículos relacionados con el efecto dominó en la cadena de suministro de la base de datos en línea; Science Direct, Taylor and Francis, Springer, Emerald Publishing y Google Scholar para exportar en formato RIS para el software VOSviewer para obtener el mapa conceptual de las palabras clave que están relacionadas con el tópico estudiado, así como los autores que trabajan en colaboración con otros autores de diferentes nacionalidades. En la etapa tres de los artículos identificados el investigador lee el resumen, la introducción y conclusiones para conocer el contexto y su contribución, en las áreas de gestión de negocios, ciencia, economía y decide leerlo a detalle o no. Por consiguiente, filtra los artículos relevantes en una base de datos en Excel que contiene Autor, año, título del artículo, método como revisión de literatura, optimización, simulación, redes bayesianas donde se identificaron variables incluidas en los estudios, como demanda, inventarios, tiempo de entrega, efecto látigo, efecto dominó, desempeño en la cadena de suministro.

2.1.1. Gestión de la demanda en la cadena de suministro

De acuerdo Seyedan y Mafakheri (2020), mencionan que existe incertidumbre en la CS debido a; las variaciones de la demanda de los clientes, al transporte, los riesgos de la organización, al *lead time*, que influye directamente en la satisfacción del cliente con efectos en la programación de la producción, planeación del inventario y el transporte para minimizar el costo total de CS y predicen la demanda mediante Big Data. Dey et al. (2021) definen el tiempo total de entrega como el tiempo que transcurre desde que el cliente envía una orden al proveedor y a su vez el proveedor procesa la orden y coloca el pedido al cliente, por sus siglas en inglés “*Lead Time*” (LT).

El 90% de la producción de autopartes del estado de Guanajuato es exportada a EUA y Canadá como son equipo eléctrico y electrónico, asientos y accesorios, motores, frenos, inyección de plástico, partes de transmisión, dirección y suspensión, piezas metálicas troqueladas.

De acuerdo con Babai et al. (2021) la incertidumbre en la CS es atribuible a los pronósticos de la demanda que son influenciados por; competencia, precio, desarrollo tecnológico, información confidencial del cliente, tiempos de entrega, que propagan la variabilidad de la demanda que impacta directamente en los inventarios y en el tiempo de entrega. Por lo tanto, estiman la varianza de la demanda con respecto al tiempo de entrega constante considerando el *stock* de seguridad mediante promedios móviles autorregresivos (ARMA) y suavización exponencial para minimizar el error cuadrático medio (MSE), en tanto proponen un análisis comparativo del nivel de exactitud del inventario considerando un LT constante y variable.

Por su parte, Zheng et al. (2015) buscan lograr el equilibrio entre el proveedor y el cliente al tener una mayor coordinación entre ambas partes que permita mitigar la disrupción de la demanda al compartir su información. Como consecuencia de ello, la disrupción de la demanda es mayor y el proveedor necesita fabricar más piezas para incrementar la demanda en el mercado; por lo que se incrementa el costo de producción, el precio de materiales y el tiempo extra de los operadores. No obstante Duong y Chong, (2020); Ivanov et al. (2019) argumentan que la colaboración permite ajustar la política de inventarios para reducir el *stock* y compartir los pronósticos de la demanda, reducir el retraso de información y obtener una recuperación gradual de la disrupción de la CS mejorando la transparencia de la información entre los involucrados, reduciendo el tiempo de entrega, y el costo del inventario. Dichos comportamientos afectan a los almacenes y al transporte generando pérdidas económicas para las empresas.

Algunos autores asumen la demanda del clientes es estocástica que se distribuye normalmente con una variable aleatoria para predecir el número de pedidos que debe enviar el proveedor al cliente tales como Cannella et al. (2021); definen el cumplimiento de pedidos como el porcentaje de pedidos completados del inventario disponible para evitar retrasos no deseados. Por lo tanto, Ivanov et al. (2017); Demiray et al. (2017); Duong y Chong, (2020) comparten la información de la demanda mediante la planeación colaborativa para pronosticar la reposición de pedidos “*Collaborative Planning Forecasting and Replenishment*”(CPFR) en la cadena de suministro de dos eslabones de la industria automotriz.

Algunos estudios en la industria automotriz se enfocaron en pronosticar la demanda Brintrup et al. (2020); Rozanec et al. (2021) evalúan el pronóstico de la demanda considerando la varianza de la

demanda durante tiempo de entrega usando *Maching Learning* para predecir la interrupción de la CS del sector automotriz en proveedores Tier 1, asumiendo que los proveedores tienen retrasos. Botanni et al. (2021) Han demostrado que al utilizar el algoritmo AdaBoost es muy eficiente predictor de la demanda, así mismo argumentan es fundamental pronosticar la demanda de vehículos como de autopartes para optimizar las operaciones de la CS y reducir sus costos. Kim et al. (2023) recomiendan pronosticar la demanda de autopartes un año antes de su consumo. El análisis de series de tiempo se emplean técnicas cuantitativas para pronosticar los cambios en la demanda histórica En tanto Mitra et al. (2022) argumentan que los pronósticos de la demanda son la principal estrategia operacional para administrar el inventario y mejorar el nivel de satisfacción del cliente. La planeación de la demanda es desarrollar un modelo de pronóstico que ayude a tomar decisiones en los departamentos de producción, distribución y ventas. La precisión de los pronósticos es esencial para el éxito de la CS. Ivanov et al. (2021) argumentan que los métodos de regresión tienden a determinar la relación causal entre las variables independientes con la dependiente. Mitra et al. (2022) proponen un modelo híbrido entre el modelo de suavización exponencial simple con el algoritmo AdaBoost regresor para disminuir el error del pronóstico. Al utilizar el modelo propuesto puede mejorar el nivel de inventario de productos terminados

Como conclusión se identifica que las empresas asumen un decremento en la demanda para analizar el ED, otras comparten la información a lo largo de la CS ya sea de la demanda o del nivel de inventario. En tanto otras incrementan su capacidad para amortiguar y programar la producción y como resultado incrementan el inventario disponible y el nivel de servicio con una disminución del costo. Además, incorporan el posicionamiento de inventario que permite reducir el punto de reorden (PRO)-limitado a dos minoristas donde únicamente el minorista comparte la demanda que se distribuye exponencialmente y el inventario. La mayoría de los estudios asumen que la demanda estocástica se distribuye normalmente de manera aleatoria en la industria automotriz debido a la incertidumbre por los cambios en el mercado, como resultado de la investigación se busca reducir la variabilidad de la demanda en la CS, por medio de un modelo de pronóstico ARIMA para modelar el error en el pronóstico, que le permite a las empresas del sector automotriz disminuir los cambios en su programa de producción causando mayor tiempo extra, generación de pedidos al proveedor de manera abrupta, y endeudamiento.

2.1.2. Inventarios en la cadena de suministro

Desde la posición de Izar et al.(2016) el inventario en la cadena de suministro es la cantidad de materiales o productos terminados que se tienen en el almacén para suministrar al cliente o la acumulación de material en la CS. Sin embargo, Lücker et al. (2019) mencionan que la gestión de

inventarios ayudan a determinar la política que se lleva a cabo entre la satisfacción del cliente y el costo de nivel de servicio, cuando existe una interrupción en la CS debido a la incertidumbre en la demanda y a la interrupción del flujo de operaciones que persiste por un periodo de tiempo prolongado y agregan el costo de penalización. Garvey y Carnovale (2020) diseñaron una política de inventario ante la presencia del efecto dominó en la cadena de suministro. Lucker.(2019) enfatiza el rol del inventario como un riesgo para mitigar el efecto dominó con un *stock* de seguridad.

De acuerdo al trabajo presentado por Ivanov et al. (2018); Ivanov et al. (2019), utilizaron un enfoque proactivo para analizar y controlar el efecto dominó teniendo un impacto positivo en el nivel de inventario al prevenir la propagación de la interrupción de la CS por medio de simulación.. Asimismo, Ivanov et al. (2016), proponen una política de recuperación gradual con proveedores de soporte para analizar y mitigar el efecto dominó con una política de revisión continua y un stock de seguridad de una semana con una demanda normal mediante dinámica de sistemas, excluyendo los costos de inventario. En otros estudios se propone un modelo estocástico para gestionar el inventario con dos proveedores cuando ocurre el efecto dominó en la cadena de suministro consideran el arribo de los pedidos de manera estocástica y evalúan el nivel de servicio con una política de inventarios de revisión periódica Wang et al. (2014) analizan el impacto de la interrupción en la producción, con una capacidad de inventario limitada para el nivel de servicio. Sánchez et al. (2020) proponen una ecuación para evaluar el nivel de inventario de productos terminados y de partes, con dinámica de sistemas que indica el retraso del envío de órdenes desde el proveedor hacia el cliente. Otros autores en cambio incrementan el nivel de inventario para mitigar el efecto dominó en la cadena de suministro.Mishra et al. (2021) simulan el efecto dominó con dinámica de sistemas con un enfoque proactivo considerando la cantidad de *stock* de seguridad y proveedores de respaldo con un incremento en el inventario, en la capacidad de producción, y en el transporte. Como resultado se incrementan los costos de la CS.

Por su parte, Wang y Disney (2017), Nielsen y Michna (2018), utilizan una política de reabastecimiento y periódica para el envío de órdenes hasta llegar al punto de reorden, reduciendo la variabilidad del inventario, al considerar un menor stock de seguridad y faltantes, lo cual es equivalente a minimizar los costos de inventario, asumiendo que el tiempo de entrega es constante y considerar la demanda y el tiempo de entrega con un stock de seguridad de cada miembro en la CS al lanzar una orden al proveedor. Schmitt et al. (2017) sugieren explorar la recuperación del inventario cuando existe escasez en varios eslabones de la CS, asumiendo una política de reabastecimiento, un tiempo de entrega constante y una política de revisión periódica (PRP), con una variabilidad en la demanda con incertidumbre, usando meta heurísticas con un estado estable para optimizar el tiempo de interrupción (TI) del flujo de materiales en la CS de cuatro eslabones de la industria aeronáutica.

En su trabajo, Lücker (2019) incluye el *stock* de seguridad y el nivel de servicio para mitigar el efecto dominó en la cadena de suministro con una política de revisión continua al ordenar Q unidades, cuando el nivel de inventarios se reduce hasta el punto de reorden y, asume que la demanda es estocástica y estacional con un tiempo de entrega constante, utilizando métodos heurísticos.

En conclusión, cuando existe la variabilidad de demanda en la CS, el proveedor asume el riesgo de mantener altos volúmenes de inventario para protegerse utilizando una política de inventarios de revisión de continua para calcular el punto de reorden, asumiendo, además, que el tiempo de entrega es contante. Por otro lado, la industria automotriz establece que el inventario sea administrado por el proveedor. Algunos estudios recomiendan utilizar una política de revisión periódica para ajustar el nivel de inventario con respecto al tiempo de entrega prolongado que favorece al efecto dominó. Por consiguiente, también se recomienda buscar el equilibrio entre el costo de mantener el inventario y el nivel de servicio.

2.1.3. Tiempo de entrega (LT)

En el trabajo de Khan et al. (2019) se argumenta que un tiempo de entrega prolongado provoca retraso en la cantidad de pedidos y como resultado se generan órdenes atrasadas. Las órdenes atrasadas retrasan más la entrega de pedidos posteriores al cliente, generándose un efecto dominó en la cadena de suministro, provocando que el cliente incremente la cantidad de cada pedido con mayor frecuencia hasta que inician a entregar de pedidos atrasados y comienzan a incrementar su nivel de inventario. En consecuencia, los clientes comienzan a reducir los pedidos al proveedor. No obstante, continúan recibiendo entregas de pedidos realizados con anticipación. Dey et al. (2021) argumentan que la reducción del tiempo de entrega es uno de los parámetros más críticos para satisfacer a los clientes debido a la relación que existe entre el cliente y el proveedor, además agregan el costo total de la cadena de suministro.

Autores como Michna y Nielsen (2015) argumentan que al pronosticar el tiempo de entrega de los proveedores con promedios móviles de $N=3$ órdenes consecutivas su media y su varianza afectan el nivel de inventario del cliente, así cuantifican el impacto de la variabilidad del LT en el reabastecimiento de pedidos en dos eslabones de la CS. Wang y Disney (2017) analizaron la CS con pedidos confirmados donde la demanda y el tiempo de entrega estocástico. Albana et al. (2018) incluyeron el costo del tiempo de entrega. Domínguez et al. (2020) presentaron un modelo dinámico con un sistema cerrado donde el tiempo de entrega es variable. Malik y Sarkar (2019) desarrollaron una cadena de suministro inteligente considerando reducir el tiempo de entrega

Recientemente Haeussier et al. (2020) introducen un modelo de optimización donde establecen la relación entre un tiempo de entrega constante y variable. Li (2020) incluyó la varianza del tiempo de entrega y la relación que existe entre mantener el inventario con los pedidos atrasados. Shenbagan (2021) incluye el costo total de la cadena de suministro.

El estudio de Michna et al. (2017) difiere de otros estudios porque muestran que el pronóstico del tiempo de entrega es la mayor causa del efecto látigo cuándo existe una demanda autocorrelacionada considerando los parámetros; tiempo de entrega, demanda, retrasos utilizando promedios móviles para encontrar el parámetro máximo y mínimo del EL (efecto látigo) en una CS de dos eslabones (proveedor y manufactura) donde manufactura recibe la demanda del cliente y entrega de materiales por el proveedor, con una política de reabastecimiento y periódica, Con un tiempo de entrega variable, cuando la demanda es satisfecha y los pedidos previos se reciben a final del periodo y demuestran que el efecto látigo depende del LT y del coeficiente de correlación de la demanda.

De acuerdo a los trabajos presentados por Dolgui et al. (2019); Dolgui et al. (2021), el efecto látigo, se define como la variabilidad de la demanda del cliente es mayor que la capacidad de los proveedores. Por lo tanto, los proveedores asumen el riesgo de tener inventario en exceso para cubrir con los requerimientos del cliente. Nielsen y Michna (2018), asumen que el tiempo de entrega es determinístico para cuantificar el efecto látigo con una demanda estocástica, utilizando promedios móviles, suavización exponencial, MSE, cuando la demanda es independiente con una política de revisión continua en una cadena de suministro de dos eslabones.

2.1.4. Factores de riesgo en la cadena de suministro

La gestión de los riesgos en la cadena de suministro, por sus siglas en inglés “*Supply Chain Risk Management*” (SCRM) surge de fusionar la gestión de la cadena de suministro (GCS) y la gestión de riesgos (GR) y donde se clasifican en factores de riesgo. Algunos autores incluyen estrategias, conceptos, evaluación, medición y mitigación del riesgo Ho et al. (2015). Li et al. (2017) mencionan que el objetivo de la GR en la CS es generar los cambios que producen los efectos no deseados en los objetivos, tales como, altos costos de material, desperdicio de materiales, errores en la producción, tiempos de entrega prolongados, retraso de pedidos, incumplimiento de contratos, alto costos de transporte.

Desde el punto de vista de Wu et al. (2006) identificaron los factores de riesgo de los proveedores, tanto internos y externos (controlables, parcialmente controlables e incontrolables),

además aplicaron un enfoque de GR basado en una estructura analítica para cuantificar el nivel de riesgo de la CS obteniéndose el 87% del riesgo es por costo, calidad, entrega a tiempo, continuidad del proveedor. Además, Blome y Schoenherr (2011) aplicaron la GR en la CS en un estudio de caso en la industria automotriz. En tanto, Schmitt y Singh (2012) agregan dos factores de riesgo a la CS, uno es LT prolongado del proveedor al cliente y el otro es la falta de conectividad en el transporte, ambos interrumpen el flujo de materiales; y Ho et al. (2015) agregaron la clasificación de riesgos.

En la opinión de Lücker (2019), los riesgos en CS ocurren de manera abrupta en los proveedores como son los desastres naturales, interrupción tecnología y cambios en los mercados a causa de los pronósticos que afectan el desempeño. En tanto, Tang y Musa, (2011), consideran necesario identificar y evaluar el efecto dominó en la CS que puede impactar en decremento de utilidades, retraso en entregas, menor participación en el mercado. En tanto, Ivanov et al. (2018), argumentan que la propagación de la disrupción en la CS se debe a los retrasos en los tiempos de entrega, decremento del stock de seguridad que impacta de manera negativa en el cumplimiento de pedidos. En la Tabla 2.1 se muestran algunos estudios que abordan los factores de riesgo que favorecen al ED en la CS, otros riesgos externos tales como desastres naturales, pandemia, cambios en las leyes, influyen en la disrupción de la CS en el sector automotriz.

Tabla 2.1. Factores de riesgo en la CS.

Factores de riesgo Autores	Proveedores	Demanda	Lead time	Información	Transporte	Riesgos externos
Ivanov et al. (2018)	X	X		X		X
Ivanov et al. (2019)	X	X		X		X
Manuj y Menzer 2008)	X	X			X	
Wu et al. (2006)	X					
Lücker et al. (2019)	X	X				
Lücker (2019)						X
Tang & Musa, (2011)		X				X
Avelar et al (2019)		X				X

2.1.5. Efecto látigo en la cadena de suministro

Como argumentan Dolgui et al. (2021) que el efecto látigo ha sido estudiado ampliamente en la literatura durante 20 años, y en relación a los riesgos operacionales mediante la matriz de evaluación de riesgos que incluye alta probabilidad, bajo impacto, y fluctuaciones de la demanda. Ellos lo definen como la propagación de la variabilidad de la demanda en producción y cuantificación de los pedidos de los

clientes en la CS. Abbou et al. (2015) han estudiado los factores que favorecen al efecto látigo cómo son los pronósticos de la demanda, la cantidad de órdenes, promociones, escasez y exceso de inventarios.

De acuerdo al trabajo presentado por Dominguez et al. (2020) manifiestan que el efecto látigo existe cuando hay variabilidad entre la demanda y los inventarios que generan altos costos operativos a la cadena de suministro mediante dinámica de sistemas y asumen que el efecto látigo no depende del tiempo de entrega, En tanto buscan extender el modelo con un LT variable con una PRP. Badakhshan et al. (2020) realizaron pruebas sobre el exceso de inventario al cuantificar el efecto látigo con el flujo de dinero mediante dinámica de sistemas en el juego de la cerveza al considerar una discrepancia entre el inventario actual (α) y el inventario deseado (β) con una PRP al calcular las órdenes completadas con reposición, al integrar dinámica de sistemas con algoritmos genéticos para reducir el flujo de efectivo al generarse un efecto látigo en la CS.

Por su parte, Nakade y Aniyama (2019) consideran entre mayor sea la variabilidad del tiempo de entrega favorece al efecto látigo incluso cuando el tiempo de entrega es pequeño. Por tanto, recomiendan buscar un equilibrio entre la demanda y un tiempo de entrega promedio, con promedios móviles ponderados. Minner y Transchel (2017); Khan et al. (2019); He et al. (2019) agregan la falta de coordinación favorece al efecto látigo en la cadena de suministro, por las fluctuaciones de la demanda de productos terminados que impacta directamente en el nivel de inventario por la fluctuación de precios, tamaños de lote, así mismo, la falta de información provoca exceso de inventario en los proveedores, reducción del servicio al cliente, retraso en embarques con pedidos incompletos, pérdidas de producción. Ivanov et al. (2018) asumen que el efecto látigo afecta a la CS en la parte operativa al desajustar la demanda con el suministro de materiales, sin cambios estructurales en el diseño, en consecuencia, se incrementan los pedidos de los clientes de manera abrupta afectando a los proveedores en su capacidad y en su nivel de inventario, mientras el efecto dominó impacta directamente en el desempeño de la cadena de suministro en ventas, *stock* de seguridad, nivel de servicio, en la satisfacción del cliente y en los costos al hacer cambios en la red de proveedores.

De acuerdo al trabajo de Ivanov et al. (2019) argumentan para mitigar el efecto látigo en la cadena de suministro es necesario, que las empresas compartan su información para facilitar el intercambio de datos, por ejemplo, órdenes anticipadas, programas de producción que reducen la incertidumbre al tener un menor *stock* de seguridad.

Algunos estudios analizan el efecto látigo utilizando modelos de simulación y muestran las causas de variación y amplificación de la demanda. Chen et al. (2000), cuantifican el efecto látigo en una CS con múltiples eslabones considerando un LT constante y una demanda estocástica. Rong et al

(2008) argumentan que los gerentes perciben la incertidumbre tanto en la demanda como en el suministro, ellos cuantifican el efecto látigo usando dinámica de sistemas para determinar la variabilidad de las órdenes colocadas que influyen en efecto dominó de la CS de cuatro eslabones al reducir el nivel de inventario.

En conclusión, la variabilidad de la demanda de los clientes influye en la variabilidad de los pedidos entregados al cliente con una política de revisión continua para determinar el nivel de servicio del 95%. Sin embargo, el tiempo de entrega favorece al efecto látigo que impacta en las operaciones de la cadena de suministro, mientras tanto el efecto dominó influye en de forma global en los cambios en el mercado. En tanto se requiere evaluar el comportamiento de la demanda, por medio de un modelo de pronóstico que permita reducir el MSE para determinar la correlación que existe entre la demanda y los pedidos entregados al cliente.

2.1.6. Efecto dominó en la cadena de suministro

Una de las más importantes contribuciones del efecto dominó ha sido por Ivanov et al. (2014) sugieren que la propagación de disrupción debe llamarse efecto dominó, que es una versión del efecto látigo. Así mismo, aplicaron la teoría de control para analizar y cuantificar el efecto dominó. Sin embargo, requieren analizar los costos y el desempeño de la cadena de suministro que permita controlarlo, e incorporan al modelo el costo del transporte centralizado en el incremento de la demanda y validarlo con los resultados de empresas Ivanov et al. (2015) incluyen los costos de transporte y de inventario y excluyen la demanda en el modelo de programación lineal; así mismo sugieren agregar en el eslabón de producción; la capacidad, tiempo de entrega e inventarios. De acuerdo a Sokolov et al. (2016) agregan la demanda para cuantificar el efecto dominó mediante el modelado con programación lineal entera para analizar el impacto en el costo total y en el nivel de servicio Ivanov et al. (2016a) extienden el modelo con una política de reabastecimiento de los proveedores Ivanov et al.(2016b) proponen política de reabastecimiento para mitigar el efecto dominó utilizando modelos de simulación al estimar el nivel de servicio, sin considerar el costo en la cadena de suministro.

A través de varios artículos el efecto dominó ha sido estudiado. Ivanov et al. (2017 b) estudiaron los modelos de simulación por medio de programación lineal entera para cuantificar el efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz para mejorar el nivel de servicio y reducir el tiempo de entrega. Ivanov (2017a), agregó el tiempo de interrupción, además simuló el efecto dominó con

simulación de eventos discretos con una política de revisión periódica, tiempo de entrega constante y costos de transporte para minimizar el LT para mejorar el flujo de materiales por la falta de capacidad.

En el trabajo presentado por Ivanov (2017), simuló el efecto dominó en la cadena de suministro con dinámica de sistemas que impactó directamente en los indicadores de desempeño de la CS; rentabilidad, ventas, nivel de servicio, y costos con una política de reabastecimiento. En tanto sugiere incluir minimizar el tiempo de entrega para reducir los costos de pérdida de cliente Rozhkov y Ivanov (2018), agregan el retraso que tiene el proveedor al entregar impacta de manera negativa en su capacidad de producción que reduce el nivel de servicio e incrementa los costos de penalización. Autores como Ivanov et al. (2017), agregan la mitigación y el control del efecto dominó en la cadena de suministro para mejorar el nivel de servicio al combinar dinámica de sistemas con programación lineal. Dolgui et al. (2018) integran al modelo el tiempo de recuperación (TR) y el costo. Ivanov et al. (2018) desarrollaron un nuevo método para analizar y cuantificar la resiliencia en la cadena de suministro del proveedor, planta y centro de distribución, al considerar el costo de recuperación impactando directamente en el nivel de servicio. Dicho modelo es una aproximación, ayuda a los gerentes a identificar la disrupción, así como la desviación de pronósticos para reducirla.

Desde el punto de vista Ivanov y Dolgui (2019) proponen una nueva perspectiva que permita analizar la magnitud del efecto dominó y la resiliencia en la red de proveedores que permita mejorar las operaciones de ventas con un sistema de producción estable. Ivanov (2019a); Ivanov y Dolgui, (2020) consideran la resiliencia en la producción y red de distribución considerando los costos de mantener el inventario y de transporte, de manufactura y penalización para evaluar los retrasos en las entregas y las órdenes atrasadas utilizando la simulación de eventos discretos, además sugieren extender el modelo al encontrar las relaciones entre la variabilidad de la demanda, stock de seguridad y la política de reabastecimiento que deben ser estudiadas y ajustar el punto de reorden con el stock en los centros de distribución.

Del trabajo de Hosseini et al. (2020), Bier et al. (2020) mitigan el efecto dominó en una red de proveedores compleja e identificar a los proveedores principales y evaluar su nivel de servicio. Bevilacqua et al. (2018) proponen analizar y cuantificar el efecto dominó en proveedores Tier 1 y Tier 2 de la industria electrónica a través de encuestas aplicando lógica difusa, mientras tanto Bevilacqua et al. (2020) lo analizaron la cadena de suministro del sector de modas para identificar los factores de riesgo que influyen en la resiliencia a la limitante de la investigación es la metodología propuesta de forma generalizada. Llaguno et al. (2021) concluyeron que una CS debe ser resiliente, robusta, eficiente y ágil para afrontar la disrupción y recuperarse rápidamente al considerar los factores de riesgo tales como; niveles de inventarios bajos, falta de capacidad de producción o reposición de material de un solo

proveedor que influyen en la variabilidad de la demanda En consecuencia favorecen el efecto dominó al reducir el nivel de servicio.

Por otro lado, Gao et al. (2019) en su investigación demuestran la cascada de efectos disruptivos que favorecen la pérdida de ventas en la red de proveedores de la cadena de suministro mediante la evaluación del índice de riesgos, el efecto dominó en la cadena de suministro incluye fallas en la máquina, cambios en la demanda de forma abrupta, desastres naturales, retrasos a los clientes en un eslabón en la cadena de suministro. Dicho impacto depende de la habilidad de recuperarse después de la disrupción ocurrida. Incluso si se ignora el daño tanto a los proveedores como a los clientes con los cambios en los mercados se propaga el decremento de la demanda en la cadena de suministro. Así mismo Scheibe y Blackhurst (2018) sugieren simular la disrupción en una red de proveedores, con dos escenarios en el comportamiento de la demanda: a) decremento, b) incremento en un caso de estudio.

De acuerdo con Saputro et al. (2020) proponen un modelo donde integran la selección de proveedores con la gestión de inventarios e ingreso del transporte para mitigar el riesgo asociado con el suministro, así como el retraso de entregas, mejorando el resurtido. En consecuencia, la interacción entre esas variables es parte fundamental. El estudio está limitado a asumir la disrupción de los proveedores, además quieren extender el modelo al implementarlo con respaldo del proveedor e incrementar el costo de compra.

Desde el punto de vista de Li et al. (2017), consideran dos eslabones en la cadena de suministro que parten del proveedor a producción con una demanda determinística para determinar el tiempo de disrupción que favorece la interrupción del flujo en la cadena de suministro teniéndose un impacto en costos por pérdidas de ventas, incremento de pedidos, impactando de manera negativa al tiempo de entrega en las órdenes atrasados. Kinra et al. (2019), desarrollaron un modelo para cuantificar el efecto dominó de la CS basado en la evaluación de riesgos a los proveedores utilizando modelos de simulación para validar con los datos de la empresa.

Autores como Dolgui et al. (2021) demostraron el impacto del efecto látigo con simulación con eventos discretos utilizando *AnyLogic* para comparar la capacidad de producción disruptiva, envío de productos desde la empresa al centro de distribución. Ivanov et al. (2017), argumentan que el riesgo operacional de la cadena de suministro es causado por el efecto látigo cómo son las órdenes del cliente y el inventario y el riesgo global por el efecto dominó en la CS es por los cambios en el mercado.

Algunos estudios analizan el efecto dominó en la cadena de suministro con modelos de dinámicas de sistemas Bueno y Cedillo (2014) demostraron que las medidas proteccionistas en contra

del efecto dominó que incrementa de manera abrupta los niveles de inventario en la CS para garantizar la seguridad y el movimiento eficiente de las mercancías en una empresa automotriz Tier 1, al excluir el costo de ED. Olivares y ElMaraghy (2021), utilizan dinámica de sistemas para evaluar el impacto que tiene el efecto dominó con múltiples eslabones en el nivel de servicio, costos, rentabilidad, niveles de inventario.

De acuerdo al trabajo presentado por Duan et al (2021) analizan el impacto del COVID 19 en la interrupción del flujo de material de la CS con dinámica de sistemas que influye directamente en los cambios del nivel de inventario. Rathore et al. (2021) integran el índice de riesgos con dinámica de sistemas para mejorar la toma de decisiones con respecto a la capacidad del inventario y del transporte de una CS alimenticia en la India. Gu y Gao (2017) utilizan dinámica de sistemas para cuantificar la disrupción del transporte y proveedores y evaluar el impacto en las ventas con respecto al nivel de inventario en una CS con múltiples eslabones y recomiendan extenderlo a cómo administrar la disrupción en la producción. Thomas y Mahanty (2020) buscan el equilibrio entre la satisfacción del cliente y el costo de suministro mediante el modelado con teoría de control y dinámica de sistemas, Dolgui et al. (2019) analizan el impacto que causan las restricciones de producción, cantidad de órdenes entregadas en el nivel de servicio y costos de la CS y proponen el NI durante y después de la disrupción.

En conclusión, el efecto dominó en la cadena de suministro se debe a la propagación del decremento de la demanda de los clientes. Algunos estudios utilizan dos estrategias para mitigarlo; a) incrementar el inventario para mejorar, el nivel de servicio y asumiendo el riesgo, como resultado el costo de la CS es mayor, b) contar con el respaldo de proveedores para mejorar la capacidad de respuesta y compartir el riesgo. Sin embargo, algunos autores abordan el costo del inventario en la CS y excluyen el costo del ED en el desempeño de la CS.

Los trabajos revisados que se muestran en la Tabla 2.2 indican la revisión de la literatura con respecto al ED, donde se estudiaron las variables; demanda, inventario, LT, EL, ED que impactan en el desempeño de la CS como es la satisfacción del cliente, nivel de servicio, pérdida de ventas. La mayoría de los autores asumen que la demanda es estocástica y se distribuye normalmente de manera aleatoria, con una política de inventarios de revisión continua y un tiempo de entrega constante para modelar el comportamiento del efecto látigo que favorece la propagación del efecto dominó en la cadena de suministro.

Tabla 2.2. Revisión de literatura del efecto dominó en la cadena de suministro

Variables Autores	Demanda	Inventario	Tiempo de entrega	Efecto látigo	Efecto dominó	Desempeño
Olivares y ElMaraghy (2021)	X	X			X	X
Sánchez et al. (2020)	X	X			X	
Kinra et al. (2019)		X	X		X	
Ivanov et al. (2018)	X	X		X	X	X
Ivanov, (2020)			X			
Dolgui et al. (2019)	X			X	X	
Dolgui et al. (2021)				X	X	
Ivanov y Dolgui, (2020)					X	X
Ivanov (2019a)		X	X		X	
Jahani et al. (2021)	X	X			X	
Özçelik et al (2021)	X	X			X	
Domínguez et al. (2020)	X	X		X	X	X

2.1.7. Desempeño de la cadena de suministro

En este contexto es fundamental evaluar desempeño de la cadena de suministro donde existe un efecto dominó para ayudar las empresas a mejorar continuamente con el objetivo de satisfacer las necesidades del cliente, teniendo un nivel de servicio mayor al 80% a un menor costo (ventas, total, inventario). Teniendo disponibilidad de productos y entregar los pedidos completos en tiempo con un nivel de inventario hasta el punto de reorden.

Autores como Avelar et al. (2019) definen el desempeño de la cadena de suministro (DCS) como las métricas utilizadas para cuantificar la eficiencia de la cadena de suministro a nivel jerárquico, estratégico, táctico y operacional. La competencia hoy en día es entre las cadenas de suministros, debido a que los clientes tienen el poder para exigirle al proveedor mayor flexibilidad, es decir, a la habilidad de responder a los cambios en el mercado, con productos de alta calidad con tiempos de ciclo cortos. Las métricas de desempeño que se utilizan para medir el desempeño de la CS son; nivel de exactitud en los pronósticos, tiempo de entrega, costo de inventario.

Algunas de las técnicas aplicadas para evaluar el desempeño de la CS son el uso de modelos de simulación que permiten medir, la calidad, el tiempo de entrega, costos para encontrar la interrelación que existe entre las métricas. Por consiguiente Ivanov et al. (2019) argumentan que la demanda como el tiempo de entrega tiene fluctuaciones en la práctica y se desconocen. Sin embargo, se pueden estimar con modelos estocásticos de probabilidad, así mismo establece que el nivel de servicio es el porcentaje de demanda satisfecha en tiempo de un producto que se encuentra en inventario para evitar faltantes. Cuando existe un alto nivel de servicio incrementa la capacidad de respuesta a un mayor costo por mantener el inventario dinámico; α es el nivel de servicio, es decir la cantidad de pedidos completos que se entreguen en tiempo, es decir la falta de stock no retrasa las entregas; β es el nivel de servicio considerando pedidos pendientes. LTS es la proporción de pedidos entregados al cliente dentro del tiempo de entrega entre el total de pedidos. SS es el stock de seguridad donde σ_{LT} es la desviación estándar de la demanda durante el LT y Z el número de desviaciones estándar. El punto de reorden es la demanda promedio con respecto al LT más SS, así mismo calculan el costo y la rentabilidad de la cantidad de pedidos entregados al cliente.

El efecto dominó en la cadena de suministro se enfoca en la parte táctica y operacional, porque involucre el riesgo en la demanda, proveedores, procesos y sistemas con un enfoque proactivo para evaluar el desempeño de la CS con respecto a las ventas anuales, nivel de servicio, entregas en tiempo y costo, Por lo tanto, es importante calcular la confiabilidad del proveedor. Ivanov (2018) calculan la confiabilidad del proveedor (CP), cuando se consideran únicamente las entregas en tiempo, donde $CP = \frac{\text{Cantidad recibida}}{\text{Cantidad ordenada}}$, además consideran el tiempo de recuperación (TR) y el tiempo de supervivencia (TS) es el tiempo máximo que puede operar la CS después de la disrupción con la demanda.

En conclusión, los autores abordan una estrategia proactiva a nivel táctico y operativo para analizar el impacto que tiene el efecto dominó en la cadena de suministro, al considerar las métricas; nivel de servicio, pedidos entregados en tiempo, stock de seguridad donde la demanda y el tiempo de entrega no son constantes que influyen en la rentabilidad anual. En consecuencia, es conveniente utilizar una política de inventarios de revisión periódica para mitigar el efecto dominó, debido evita tener un nivel excesivo de inventarios y garantiza que las empresas cuenten con el nivel de inventario para no incurrir en la escasez. Sin embargo, requiere un mayor control, porque se puede determinar una cantidad de pedido flexible y fija.

3. METODOLOGÍA

La metodología para lograr el objetivo general de esta investigación incluye seis etapas y el uso de dinámica de sistemas para obtener el modelo que cuantifique la variabilidad del efecto dominó en la cadena de suministro, siendo además de tipo exploratorio. En la Figura 3.1 se indican las seis etapas principales para para evaluar el ED en la CS de la industria automotriz en proveedores Tier 1, y que son descritas a detalle en las subsecuentes líneas.

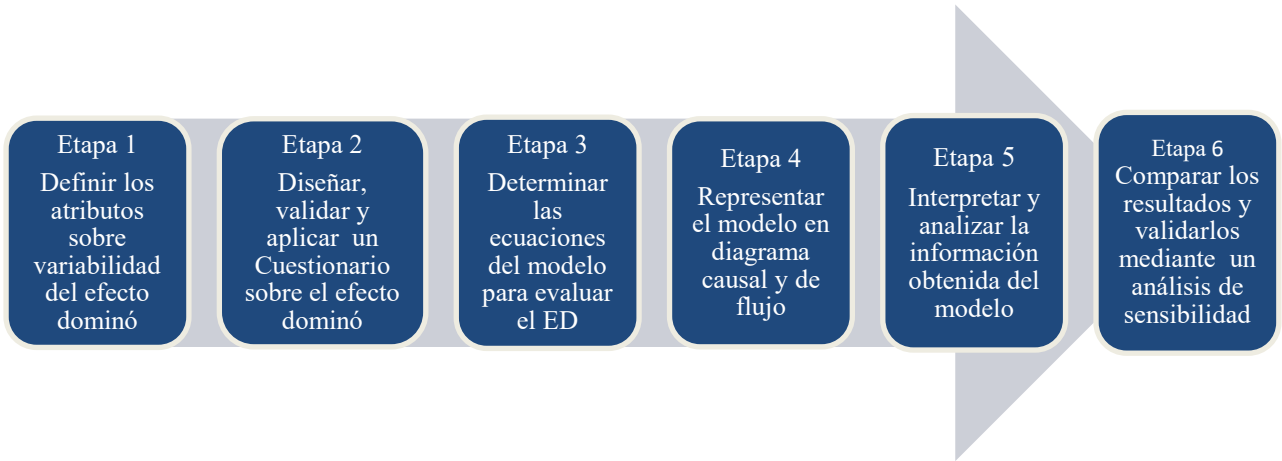


Figura 3.1. Metodología para evaluar y cuantificar el efecto dominó en la cadena de suministro.

3.1. Definir los atributos sobre la variabilidad del efecto dominó

En la etapa 1 como resultado de las entrevistas y de la revisión de la literatura se definen las variables demanda, inventario, tiempo de entrega variable, efecto látigo utilizadas en el cuestionario asociados a la variabilidad del efecto látigo que impactan directamente en el efecto dominó, a su vez en el desempeño de la CS del sector automotriz que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Atributos sobre la variabilidad del efecto dominó.

Autores	Descripción
Babai et al. (2021); Seyedan y Mafakheri (2020);	Pronóstico de la demanda, variabilidad, error
Domínguez et al. (2020)	La demanda es aleatoria, con una media y una varianza, donde el cliente la envía a través de un pronóstico de tres meses y la ajustan cada semana.
Ivanov et al. (2017); Ivanov et al. (2018); Dolgui et al. (2019)	Decremento de la demanda
Ivanov et al. (2019); Sánchez et al. (2020); Cedillo et al. (2014)	Nivel de inventario y la capacidad de producción.
Michna et al (2017); Nielsen y Michna (2018); Wang y Disney (2017); Jahani et al. (2021)	Política de inventario de revisión periódica
Giannoccaro y Iftikhar (2020);	Colocación de pedidos hasta el punto de reorden
Kinra et al. (2019); Ivanov (2020)	Tiempo de entrega (LT) constante
Michna et al (2017); Nielsen y Michna (2018)	Tiempo de entrega (LT) Variable
Domínguez et al. (2020); Dolgui et al. (2021)	Efecto látigo
Dolgui et al. (2019); Ivanov et al. (2018); Garvey y Carnovale (2020); Ivanov et al. (2017 b); Cannella et al. (2021)	Efecto dominó (ED)
Dolgui et al. (2018); Olivares y ElMaraghy (2021); Ivanov et al. (2017); Llaguno et al (2021); Ivanov y Dolgui (2019); de la Cruz et al.(2025)	CDCS Nivel de servicio, tiempo de interrupción, satisfacción del cliente, costo

3.2. Diseñar, validar y aplicar el cuestionario sobre el efecto dominó

En la etapa 2 Se diseñó el cuestionario electrónico sobre el efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz 2025 con los criterios de inclusión gerentes, encargados ingenieros en empresas de autopartes de nivel uno y nivel dos con un nivel de educación mínimo de preparatoria con experiencia de tres años en adelante, con el objetivo de recolectar información verídica y confiable para evaluar los factores de riesgo a que están expuestas las empresas, a través de la revisión de la literatura. El cuestionario es evaluado por el comité de ética en la investigación para proteger los derechos de los participantes con la política de privacidad. Antes de contestar el cuestionario los responsables de los departamentos de compras, logística, planeación y cadena de suministro tienen la libertad de dar su consentimiento para participar y autorizar que la información se utilice con fines académicos.

El cuestionario está integrado por tres secciones; riesgo en los proveedores, evaluación de los factores de riesgo, costos de desempeño de la cadena de suministro. En la sección uno se identifica como las empresas perciben el riesgo de sus proveedores y que influyen en la interrupción de la cadena de suministro del sector automotriz en el proceso de abastecimiento de materias primas y su relación con los proveedores. Zhang et al. (2018); Chopra y Sodhi (2004); Swierczek (2015); y Laguir et al. (2021) evaluaron la interrupción de la cadena de suministro en los proveedores utilizando 16 ítems; deterioro de material, paros de línea de producción, accidentes naturales, error en los pronósticos, inestabilidad de la demanda, retrasos de los proveedores, decremento de la demanda, relación con los proveedores, incremento de los costos de materiales, escasez de materiales, costos de penalización, nivel de inventario, ajuste del nivel de inventario, capacidad de respuesta, seguridad del producto, con escala Likert de 1 (nunca) y 5 (siempre).

En la sección dos busca evaluar los factores de riesgo que perciben las empresas y que influyen en la interrupción de la cadena de suministro ocasionada por la demanda, el inventario y el tiempo de entrega Ivanov (2018); Loh et al. (2017); Jafari et al. (2022) evaluaron los factores de riesgo; demanda del cliente, inventario, tiempo de entrega que favorecen al efecto látigo e influyen en el efecto domino a través de 28 ítems con Likert escala de 1 (nunca) y 5 (siempre), así mismo, en los tiempos de entrega, la escala es 1 (diaria), 2 (seminal), 3 (quincenal), 4 (mensual), 5 (bimestral).

En la sección tres es analizar los costos asociados a los inventarios, al nivel de servicio, a la satisfacción del cliente, obtenidos en la cadena de suministro en la empresa de acuerdo con sus operaciones realizadas. Bevilacqua, et al. (2020); Rožanec et al. (2021); y Avelar et al (2019) identificaron los costos de desempeño de suministro utilizando 14 ítems con escala Likert de 1 (nunca) y 5 (siempre).

Se realizó una prueba piloto del cuestionario electrónico al enviarles el enlace a tres gerentes de cadena de suministro a dos egresados de ingeniería en Logística y Transporte que tienen menos de tres años de experiencia y a un académico especialista en logística y cadena de suministro para que lo contesten para validarlo. El cuestionario validado se aplicó de manera electrónica, por medio de *Google Forms* a 100 empresas de un total de 235 empresas de autopartes en el estado de Guanajuato y Querétaro a partir del 3 de noviembre de 2022 al 21 de septiembre de 2023 para recolectar la información y analizarla estadísticamente.

3.3. Determinar las ecuaciones del modelo para evaluar el efecto dominó

En la etapa 3 Se determinan las ecuaciones del modelo para evaluar el ED con dinámica de sistemas, así mismo se entrevistarán a los encargados de los departamentos de logística, planeación de la demanda, cadena de suministro y compras para obtener información cuantitativa con respecto a los pronósticos de la demanda, inventario inicial, tiempos de entrega de proveedores y clientes, nivel de cumplimiento, retraso de pedidos y costos de mantener el inventario y gestión del pedido que permitan alimentar las ecuaciones. Es un modelo de una CS que abarca a proveedores Tier 1 y armadoras (ensambladoras) en el periodo (τ), donde el cliente revisa su nivel de inventario para solicitar un pedido al proveedor q_{τ} . La demanda del cliente D_{τ} se comporta de manera normal y determina si existe una demanda insatisfecha, es un pedido atrasado, considerando un LT variable.

A continuación, se describen las etapas que se llevaron a cabo para determinar el modelado de los pronósticos de la demanda tanto con modelos tradicionales de series de tiempo como con modelos de *machine learning* (ML). En la etapa 1 se recolectaron los datos históricos de las 16 entrevistas realizadas a los gerentes de logística de la demanda promedio de su producto terminado en los próximos dos años. En la etapa dos se normalizaron los datos previamente para estandarizar la escala de la demanda y determinar su comportamiento con pruebas estadísticas. En la etapa tres se realizaron pruebas estadísticas con el software Minitab 19 de los modelos tradicionales de series de tiempo para identificar el modelo que cuenta con el mayor porcentaje de precisión basado en análisis estadísticos. Se estimaron los parámetros de los modelos; Promedios Móviles con t igual a 2,3,8 periodos, Suavización Exponencial Simple considerando un Alpha óptimo de 0.3434, Suavización Exponencial Doble con un Alpha de 0.9667 y Beta de cero, con un factor estacional de 0.002, Promedio Móvil Autorregresivo (ARMA) de (1,0,2).

En la etapa cuatro se utilizó ML por medio del software Python 3.7.12, usando la base de datos de la etapa uno, para la manipulación de los datos, pandas 1.1.5 y la versión de Numpy 1,19.5 donde se implementaron dos algoritmos AdaBoost Regresor y Random Forest Regresor. En tanto Mitra et al. (2022) implementan el algoritmo AdaBoost: a) normalización de los datos, b) clasificar los datos en dos fases a introducir en el programa. En la fase se colocan el 70% de los datos de entrenamiento y el 30% de los datos son de aprendizaje, c) definir el Adaboost Regresor, d) ajustar los datos de aprendizaje del algoritmo, e) ejecutar el programa. En la etapa cinco se determinaron y compararon los pronósticos de la demanda, de acuerdo con las métricas que se muestran a continuación; Error Medio Cuadrático (MSE), Desviación Media Absoluta (MAD), Porcentaje de Error Medio Absoluto (MAPE), Nivel de Precisión del Pronóstico, Coeficiente de Determinación R^2 . Todo lo anterior se desarrolló para obtener la ecuación nueve, de acuerdo con el pronóstico con mayor nivel de precisión.

Proponen Sánchez et al. (2020) la ecuación 1 inventario de materia prima (RMI) que se muestra a continuación.

$$RMI_t = RMI_{t_0} + \int_0^t (RRM - URM) dt \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde *RRM* son las órdenes de materia prima enviadas por los proveedores y *URP* se refiere a las órdenes de productos terminados en embarques.

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) definen la ecuación 2 como inventario de productos terminados FGP

$$FGP = FGP_{t_0} + \int_0^t (OPC - PE) dt \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde *OPC* son las órdenes preparadas a enviarse y *PE* se refiere a las órdenes de productos terminados entregados al cliente.

Definen la ecuación 3 como las órdenes en firme (OF)

$$OF = D_t + \frac{PA_t}{AS_t} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde D_t es la demanda en el periodo t y PA_t pedidos atrasados, AS_t tiempo de ajuste de los pedidos atrasados.

Establecen la ecuación 4 como productos entregados (PE)

$$PE = \min \left(OF, \frac{IP_t}{TME} \right) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde *TME* es el tiempo mínimo por entregar.

Definen la ecuación 5 como el nivel de servicio (NS)

$$NS = \frac{PE}{OF} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) definen la ecuación 6 como pedidos atrasados PA

$$PA = PA_{t_0} + \int_0^t (IPA - PAE) dt \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde IPA son el ingreso de pedidos atrasados y PAE se refiere a los pedidos atrasados entregados al cliente.

$$IPA = D_{\tau} - PE \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$PAE = PE - D_{\tau} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde k , son los eslabones de la cadena de suministro, $k=$ es la armadora, $k=2$ es el proveedor de nivel 1, $k= 3$ es el proveedor de nivel 2, t es el tiempo en meses de 1 a 61 meses. D es la demanda actualizada por el cliente, DV es la variación de la demanda de $0 < DV < 1$

$$D_{kt} = D * (Normal(1, DV)) \quad \text{Ecuación (9)}$$

Con respecto Michna et al. (2018) consideran la ecuación 10 como la variabilidad de la demanda (VARD)

$$\sigma_t^2 = Var(D_{k\tau} - \mu_D) \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde: σ_t^2 es la varianza de la demanda.

De acuerdo con Cannella et al. (2021) proponen la ecuación 11 que indica el coeficiente de variación de la demanda (CVD)

$$CVD = \frac{\sigma_D}{\mu_D} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde: σ_D es la desviación estándar de la demanda.

Por otro lado, Ivanov et al. (2021) proponen la ecuaciones 12, 13 que es la cantidad de pedidos enviados por el proveedor ROP hasta el punto de reorden o reposición cuando la demanda y el tiempo de entrega son variables.

$$ROP = Dt * (TO + LT) + SS \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde: $Dt * (TO + LT)$ es el promedio de la demanda con respecto a TO es el tiempo entre reabastecimiento, LT , es el tiempo de entrega por el proveedor, SS es el stock de seguridad.

$$SS = Z\sigma\sqrt{TO + LT} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

$\sigma\sqrt{TO + LT}$ es la desviación estándar de la demanda con respecto a TO, LT, Z es el factor de seguridad, con una política de revisión periódica.

De acuerdo al trabajo presentado por Yanal.(2013); Nielsen y Michna (2018); Wang y Disney (2017) se propone la ecuación (14) referida al inventario en procesos

$$WIP = WIP_{t_0} + \int_0^t (PR - OS) dt \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde: PR es la tasa de producción, OS son las órdenes en embarques.

Proponen Bueno y Cedillo (2014) el tamaño de lote que le conviene pedir a la empresa al proveedor, representada en la ecuación (15)

$$IP = FGP - PA + WIP \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde: FGP es el inventario de productos terminados, PA son las órdenes atrasadas, WIP es el inventario en procesos.

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) definen la ecuación 16 como las órdenes del proveedor T1

$$OT1 = IP \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde: IP es el tamaño del lote.

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) proponen la ecuación 17 como la tasa de producción.

$$PR = IF (RMI \geq MIN(AC, OT1)) THEN (AC) ELSE (0) \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde:

RMI es el inventario de materia prima, AC es la capacidad de producción actual, OT1 son las órdenes solicitadas del proveedor T1.

$$AC = TCT1 - (TCT1 * DCR) \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

AC, es l capacidad actual, TCT1 es la capacidad total del proveedor Tier 1, DCR, es la tasa de capacidad con disrupción.

$$RRM = DELAY (DP, LT) \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

RRM es la materia prima recibida, DP son los productos entregados, LT es el tiempo de entrega del proveedor.

$$URM = RMI/RD \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde:

URM, es la materia prima utilizada, RMI, es el inventario de materia prima, RD es el retraso en las órdenes

$$MO = \text{IF} (RMI < ROP) \text{ THEN} (IP) \text{ ELSE} (0) \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

MO, manufactura al cliente, RMI es el inventario de materia prima, ROP, es el punto de reorden con una política de revisión periódica, IP, es el tamaño de lote que le conviene pedir al proveedor.

$$OTMT2 = \text{IF} ((RMI + OT1) < ROP) \text{ THEN} (MO) \text{ ELSE} (0) \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde:

RMI es el inventario de materia prima, OT1 son las órdenes del proveedor Tier 1, ROP es el punto de reorden, MO es el envío de la orden al proveedor Tier 2.

$$OOT1 = OOT1_{t0} + \int_0^t (IO - DO) dt \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

OOT1 son las órdenes enviadas del proveedor de nivel 1 al cliente, IO es el ingreso de órdenes del proveedor Tier 1, DO Son los pedidos entregados el cliente.

$$IO = OMT2 \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

IO es el ingreso de pedidos del proveedor Tier 1, OMT2 son los pedidos de materia prima solicitados al proveedor Tier 2

$$DO = RMM \quad \text{Ecuación (25)}$$

Donde:

DO, son los pedidos entregados al cliente, RRM es la materia prima recibida

La varianza de las órdenes entregadas al cliente VarQR como medida del EL en la CS se indica en la ecuación (26) utilizada por Dolgui et al. (2019); Ivanov et al. (2019).

$$VarQR = \frac{\frac{\sigma_Q^2}{\mu_Q}}{\frac{\sigma_D^2}{\mu_D}} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde: σ_Q^2 es la varianza de la demanda y de los pedidos enviados al cliente, μ_Q son el promedio de la demanda y órdenes del cliente. Por otro lado, la ecuación 27 aplicada Ivanov et al. (2019) para medir la variabilidad del ED, se determina la relación que existe entre el suministro y la demanda del cliente respecto del cumplimiento de los pedidos, qué impacta en el desempeño de la CS que se ha considerado para medir el ED mediante la ecuación 28.

$$Var ED = \frac{\frac{\sigma_{Suministro}^2}{\mu_{Suministro}}}{\frac{\sigma_D^2}{\mu_D}} \quad \text{Ecuación (27)}$$

Se indican que los cambios en la demanda favorecen el incumplimiento de pedidos que causa el ED y por tanto a partir de esto, la relación que existe entre ED con EL (REDEL) se define con la ecuación 28.

$$REDEL = \frac{Var ED}{Var qtR + Var ED} \quad \text{Ecuación (28)}$$

En la Ecuación 29 se determinan las recepciones atrasadas consideran el riesgo disruptivo más la demanda que se distribuye normalmente con una media y una desviación estándar

$$RD = 0.5 + 0.10m + N(DM, SD) \quad \text{Ecuación (29)}$$

Donde:

RD son las recepciones atrasadas, N es la demanda con una distribución normal, DM es la demanda promedio, SD es la desviación estándar de la demanda.

En la ecuación 30 se considera el riesgo disruptivo.

$$m = (\text{RAMP}(0.7, 110, 150)/8) + 0.9 - \text{STEP}(3.3, 150) \quad \text{Ecuación (30)}$$

Donde:

m es el riesgo disruptivo.

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) definen la Ecuación 31 determinar los costos por órdenes atrasadas.

Donde:

CPA son los costos de pedidos atrasados, CP son costos de penalización, Cu es el costo por unidad, IO es el ingreso de pedidos atrasados

$$CPA = CP * Cu * IO \quad \text{Ecuación (31)}$$

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) definen la Ecuación 32 determinar los costos de almacenaje .

Donde:

CA son los costos de almacenaje, I es la tasa de riesgo por manejo de materiales que oscila entre el 20% al 35% del costo por unidad.

$$CA = Cu * I \quad \text{Ecuación (32)}$$

Con respecto al trabajo presentado por Olivares y ElMaraghy (2021) definen la Ecuación 33 los costos de inventario.

Donde:

CIV son los costos de inventario, WIP es el inventario en procesos, FGP es el inventario de productos terminados, I es la tasa de riesgo por manejo de materiales que oscila entre el 20% al 35% del costo por unidad. RMI es el inventario de materia prima

$$CIV = (WIP + FGP + RMI) * I \quad \text{Ecuación (33)}$$

Con respecto al trabajo presentado por (Disney et al., 2021) definen la Ecuación 34 como las ventas perdidas

Donde:

LS son las ventas perdidas, OT1 órdenes del proveedor T1, AD es la demanda actual, NS es el nivel de servicio, D es la demanda real.

$$LS = (OT1 < AD \text{ OR } (1-NS)) * D \quad \text{Ecuación (34)}$$

Con respecto al trabajo presentado por (Disney et al., 2021) definen la Ecuación 35 como los costos disruptivos

Donde:

CD son costos disruptivos IP tamaño de lote, CA son costos de almacenaje, p es el costo de penalización, LS son las ventas perdidas.

$$CD = IP * CA + p * LS \quad \text{Ecuación (35)}$$

3.4. Representar el modelo en un diagrama causal y de flujo.

Se representa el modelo en un diagrama causal y de flujo con enfoque de dinámica de sistemas para cuantificar y evaluar el efecto dominó en la cadena de suministro de la industria automotriz en proveedores Tier 1. Hahn (2019) utiliza el modelado con dinámica de sistemas y las etapas de: 1) identificación del problema, 2) desarrollar el diagrama causal y las hipótesis dinámicas, 3) convertir el diagrama causal en diagrama de flujo del sistema, 4) programar las ecuaciones del sistema en Stella Architect, así mismo Sánchez et al. (2020) complementan el modelado al identificar la relación que tienen las variables dentro del sistema como son el inventario de productos terminados, tiempo total de interrupción de la CS; 4) ejecutar el modelo, 5) realizar un análisis de sensibilidad para identificar el comportamiento de los niveles de inventario. Los estudios presentados por Cedillo et al. (2014); Rathore et al. (2021); Duan et al. (2021) utilizan el diagrama causal para describir las causas potenciales y el

efecto, por medio de hipótesis dinámicas que ayudan a determinar el comportamiento del sistema en función del tiempo, además establece un ciclo de retroalimentación entre dos o más variables que están relacionadas de manera positiva o negativa. Las flechas indican una relación positiva cuando una variable se incrementa la otra también aumenta con un bucle de retroalimentación positiva representado **R**, así mismo si una variable disminuye la otra también se reduce. La relación negativa entre dos variables indica que cuando una variable incrementa la otra disminuye, con un bucle de retroalimentación negativa representado **B**.

3.4.1. Diagrama causal con interrupción

Autores como Bala et al. (2017); Cedillo et al. (2014); Rathore et al. (2021) utilizan dinámica de sistemas para modelar y simular sistemas complejos no lineales con tiempos de demora, al analizar múltiples variables que interactúan dinámicamente y predicen su comportamiento para la toma de decisiones.

Una vez identificadas las variables de interés y que serán evaluadas en el modelo se inicia con la construcción del diagrama causal mostrado en la Figura 3.2. Éste se elabora para comprender la relación entre las variables D, I, LT, EL ED que influyen en el desempeño de la CS del sector automotriz. El diagrama causal representa la retroalimentación que existe entre la demanda y el suministro de material de parte de los proveedores [Tier 1 y Tier 2 a las armadoras de vehículos.

B1 Son los pedidos atrasados en la cadena de suministro. Si se incrementan los Pedidos atrasados entregados al cliente (PAE) se reducen los pedidos atrasados (PA) y si los pedidos atrasados disminuyen, aumentarán los pedidos entregados al cliente.

B2 Es el nivel de inventario en la cadena de suministro. Si se incrementan los Pedidos entregados al cliente (PE), disminuirá el Nivel de inventario (IP) y si aumenta el nivel de inventario se reducirá los pedidos entregados al cliente.

B3 Es el inventario de productos recibidos. Si incrementan las órdenes de Productos terminados en embarques (OPC). Disminuye el inventario de productos recibidos (Pre), si aumenta el inventario de productos recibidos, se reducirán las órdenes de productos en embarques.

B4 Consiste en Pedidos, Tamaño de lote (IP), Inventario de productos recibidos (PR), Flujo de productos (Fpr), Flujo de pedidos entregados (FDE). Si incrementa el inventario de productos recibidos, aumenta el tamaño de lote, se incrementa el flujo de productos, a su vez aumenta el flujo de pedidos entregados y disminuye el número de pedidos.

B5 Consiste en la entrega de pedidos completos al cliente que tiene relación con Flujo de productos (Fpr), Inventario de productos recibidos (Pre), Tamaño de lote (IP). Si incrementa el flujo de productos, aumenta el inventario de productos recibidos e incrementa el tamaño de lote. Sin embargo, disminuye la cantidad de Pedidos completos entregados al cliente (OT1). En caso contrario Sí se reduce el flujo de productos, disminuye el inventario de productos recibidos, así como el tamaño de lote. Como resultado, se incrementa la cantidad de pedidos completos entregados al cliente.

B6 Consiste en determinar las órdenes completadas (OF) que tienen relación con las variables Pedidos entregados al cliente (PE), Pedidos atrasados entregados al cliente (PAE). Si incrementan los pedidos entregados al cliente, se reducirá la cantidad de pedidos atrasados entregados al cliente, se incrementará las órdenes en firme por la industria automotriz. Si disminuyen los pedidos entregados al cliente, se incrementarán la cantidad de pedidos atrasados entregados al cliente. En consecuencia, se reducirán la cantidad de órdenes completadas.

B7 Consiste integrar los Pedidos atrasados (PA), con las Órdenes completadas (OF). Si se reducen los pedidos atrasados, se incrementarán las órdenes en firme. Si se incrementas los pedidos atrasados, se reducirá la cantidad de órdenes completadas.

B8 Consiste en determinar el nivel de servicio (NS), con las Órdenes en firme (OF) y Pedidos entregados al cliente (PE). Si se incrementan los pedidos entregados al cliente, se incrementa el nivel de servicio o si disminuyen las órdenes en firma, se incrementa el nivel de servicio. Si disminuyen los pedidos entregados al cliente. Se reduce el nivel de servicio.

B9 Se consideraron las variables; Capacidad disruptiva, Tasa de capacidad disruptiva y Capacidad disruptiva total. A continuación, se muestra el buble de retroalimentación (B9) que establece que la tasa de producción (PR) aumenta cuando la Capacidad disruptiva (AC) disminuye. A su vez cuando la capacidad disruptiva se incrementa, disminuye el flujo de productos, afectando el desempeño de la cadena de suministro en el nivel de servicio y satisfacción del cliente, así como, en la política de reabastecimiento, además cuando la tasa de capacidad disruptiva es igual a cero, indica que no existe disrupción en la capacidad de producción.

R1 Consiste en determinar el Tamaño de lote (IP), con el Nivel de inventario (IP). Si aumenta el Tamaño de lote. Se incrementará el nivel de inventario. Si se incrementa el nivel de inventario, aumentará el tamaño de lote.

R2 Consiste en determinar Tamaño de lote (IP), con las variables; Inventario de productos recibidos (Pre), Productos terminados en embarques (OPC), Nivel de inventario (FGI). Si el inventario de

productos recibidos, se incrementará la cantidad de productos terminados en embarques y aumentará el nivel de inventario en la cadena de suministro. Por ende, se incrementa el tamaño de lote.

R3 Consiste en determinar el número de pedidos, con las variables; Pedidos completos entregados al cliente (OT1), el Ingreso de pedidos (IDPE). Si se incrementa la cantidad de pedidos completos entregados a cliente, aumenta el ingreso de pedidos. Por consiguiente, aumenta la cantidad de pedidos por parte del cliente.

R4 Consiste en cuantificar la Demanda del cliente (D), con Pedidos atrasados entregados al cliente (PAE), Órdenes completadas (OF). Si incrementan los pedidos atrasados entregados al cliente, Se incrementarán las órdenes en firme también aumentará la demanda del cliente. Si se reducen los pedidos atrasados entregados al cliente, disminuirán las órdenes completadas y por ende la demanda se reducirá.

R5 Consiste en calcular el Inventario máximo (Imax), con los pedidos completos entregados al cliente (qt), Si se incrementa el inventario máximo, aumentará la cantidad de pedidos completos entregados al cliente.

R6 Consiste en el Ingreso de pedidos atrasados (IPA), con los Pedidos entregados al cliente (PE), Demanda del cliente (D). Si se reducen los pedidos entregados, aumenta el ingreso de pedidos atrasados y en consecuencia la demanda del cliente disminuye.

3.4.2. Diagrama de flujo receiving delay

Como resultado de las entrevistas realizadas a los gerentes de proveedores Tier 1 y Tier 2 que suministran componentes para el vehículo a las empresas armadoras (OEMS) se obtuvo una base de datos de 61 meses a partir de enero de 2019 hasta febrero de 2024 con datos de: la cantidad de inventario inicial, el tiempo de entrega, y el inventario de seguridad para nutrir las ecuaciones del apartado 3.3 con ello modelar en el software Stella Architect el comportamiento de la variabilidad de la demanda, el inventario de materia prima tanto en proceso como de producto terminado. Las órdenes enviadas al cliente y al proveedor Tier 2, órdenes atrasadas, así como la capacidad de producción con interrupción que influye en el nivel de servicio. También se incluyen las variables de respuesta, detección de la interrupción, efecto látigo.

En la Figura 3.3a, se muestra el modelo para analizar el comportamiento de la demanda con interrupción en la industria automotriz. La simulación del modelo se llevó a cabo con el software Stella Architect Versión 3.4.1 (3048) durante 61 meses, a partir de enero de 2019 hasta enero de 2024. El proveedor Tier 1 considera cualquier cambio en la demanda del cliente al colocar su pedido. El modelo cuenta con cuatro niveles de stock; Stock 1 Pedidos T1 es la cantidad de pedidos por entregar mensualmente. Se inicia con 10 pedidos por entregar, considerando como flujo de entrada el ingreso de pedidos que es equivalente a la cantidad de órdenes colocadas al cliente por parte del proveedor Tier 1, así como la salida flujo de pedidos entregados. En el nivel dos se encuentra el nivel de inventario en procesos por parte del proveedor Tier 1 de una semana de inventario es igual la tasa de producción equivalente los pedidos colocados al cliente menos la cantidad de envíos en embarques con un retraso de dos semanas que se convierte en la entrada del nivel tres. Siendo el inventario de productos terminados de dos semanas, saliendo la cantidad de pedidos entregados al cliente que depende de la cantidad mínima de órdenes completadas. Esto se refiere a los pedidos entregados al cliente incluyendo los pedidos atrasados, nivel de productos terminados inversamente proporcional al tiempo mínimo de entrega de una semana. Se determinó el nivel de servicio que es la cantidad de pedidos entregados inversamente proporcional a las órdenes completadas, considerando el tiempo de ajuste de pedidos atrasados de una semana.

Las órdenes completadas son influidas por la demanda del cliente, así como 10 pedidos atrasados con un tiempo de ajuste de pedidos atrasados de una semana. El nivel cuatro son los pedidos atrasados son el ingreso de pedidos atrasados cuando los pedidos entregados al cliente son menores a la demanda menos la cantidad de pedidos atrasados entregados al cliente cuando son mayores que la demanda. La demanda es proporcionada por la empresa armadora. para determinar el stock de seguridad de una

semana con un factor de seguridad del 95% que indica la probabilidad de no presentar desabasto de material, el 5% restante representa la probabilidad de incurrir en faltantes de componentes debido al aumento en los tiempos de entrega por el proveedor, además, se calculó el punto de reorden para liberar la orden de compra al proveedor en tiempo y establecer el tiempo entre pedidos de una semana con el objetivo de determinar el inventario máximo de componentes automotrices en semanas para disminuir el desabasto de material.

El proveedor de nivel 1 solicita materia prima de acuerdo a la demanda que le solicita su cliente quien es la armadora. La política que establece el proveedor Tier 1 es verificar el nivel de inventario que tiene en su almacén de materiales, considerando el número de órdenes recibidas que presentan un retraso de dos semanas por parte del proveedor Tier 2 a causa de las retenciones en la aduana y por desabasto de material menos la materia prima utilizada en la producción de tanques de gasolina para Toyota que tiene un retraso en la recepción de pedidos con un retraso en las entregas de 6000 tanques de gasolina equivalentes a dos semanas de producción. Este retraso asume una distribución normal con una demanda promedio de 6760 tanques de gasolina y una desviación estándar de 1637 tanques de gasolina. Como resultado, el proveedor Tier 1 al determinar el nivel de inventario de materiales que tiene en su almacén envía la orden de material al proveedor Tier 2 considerando el punto de reorden con una política de revisión periódica y de reabastecimiento.

El punto de reorden se calculó utilizando la demanda promedio de 6760 tanques de gasolina que proviene de la armadora por un tiempo de entrega de una semana con un tiempo de ajuste, cuando son proveedores nacionales y en el caso de proveedores que se ubican a nivel internacional es de tres meses mas el stock de seguridad que cuenta con un factor de seguridad de 95% de confiabilidad, que indica que el proveedor de nivel dos cuenta con el nivel de inventario para cubrir con el pedido solicitado por parte del proveedor de nivel 1 evitando el desabasto de material y una desviación estándar de 1637 tanques de gasolina.

El proveedor Tier 1 establece manufacturar de acuerdo a la orden que recibió por parte de la armadora cuando el inventario de materia prima que tiene en su almacén es menor al punto de reorden programa la producción de tanques de gasolina, además el proveedor Tier 1 cuenta con órdenes programadas para entregar considerando el ingreso de órdenes de compra enviadas por la armadora menos las órdenes entregadas al cliente. En tanto se ajustó el inventario con 1000 piezas adicionales, con un costo de producción promedio de un tanque de gasolina es de 30 dólares, además se consideró una tasa de interés de 20% anual con respecto al costo por unidad.

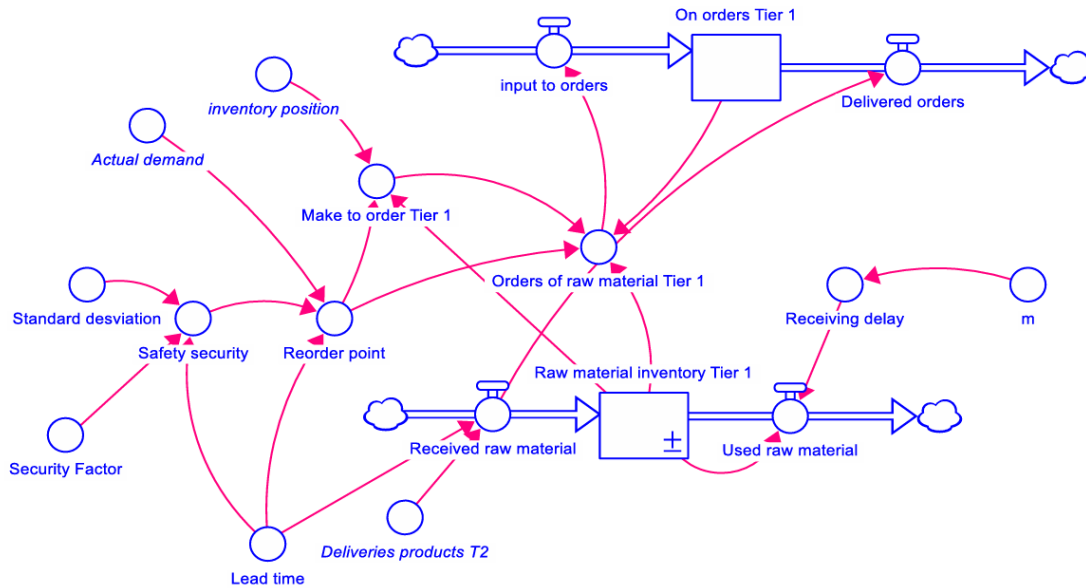


Figura 3.3 a. Órdenes de material solicitadas al proveedor de nivel 2.

En la Figura 3.3b, se muestra la disrupción de la cadena de suministro del sector automotriz que inicia con el inventario de materiales en el almacén, después se libera la orden de producción cuando el inventario de materia prima es mayor o igual capacidad mínima entre la capacidad actual y las órdenes enviadas al cliente por parte del proveedor Tier 1. La capacidad actual es determinada por la capacidad total del proveedor Tier 1 multiplicada por la capacidad disruptiva de $0 < DCR < 1$. Las órdenes Tier 1 son iguales al tamaño de lote que es determinado por el inventario de productos terminados más las órdenes atrasadas menos el inventario en procesos.

Las órdenes listas a embarcarse tienen un retraso de máximo cuatro semanas equivalentes a un mes de producción. Se cuenta con un inventario inicial de tanques de 1800 equivalentes a una semana de inventario. La política de entrega de los tanques de gasolina a Toyota es sí el inventario de productos terminados menos las órdenes confirmadas por la armadora incluyendo retraso en las órdenes debe ser mayor que cero, por ende se entregan las órdenes confirmadas con un tiempo de ajuste de una semana. Se calculó el nivel de servicio que es la cantidad de pedidos entregados al cliente entre las órdenes confirmadas son la demanda del cliente más las órdenes atrasadas dividida entre el tiempo de ajuste de una semana, así mismo se considera un nivel de servicio deseado de 0.90 de acuerdo a los requerimientos de la industria automotriz establecidos antes de la pandemia. En este sentido se establece la diferencia entre el nivel de servicio deseado menos el nivel de servicio obtenido. Las órdenes atrasadas incluyen el

el retraso que tiene el proveedor al entregar al cliente. La tercera variable es tasa de envío que indica la cantidad de membranas preparadas listas para embarques. Este indicador es determinado al dividir el nivel de inventario de membranas entre la tasa de membranas liberadas al cliente entre 0.05 a 0.125.

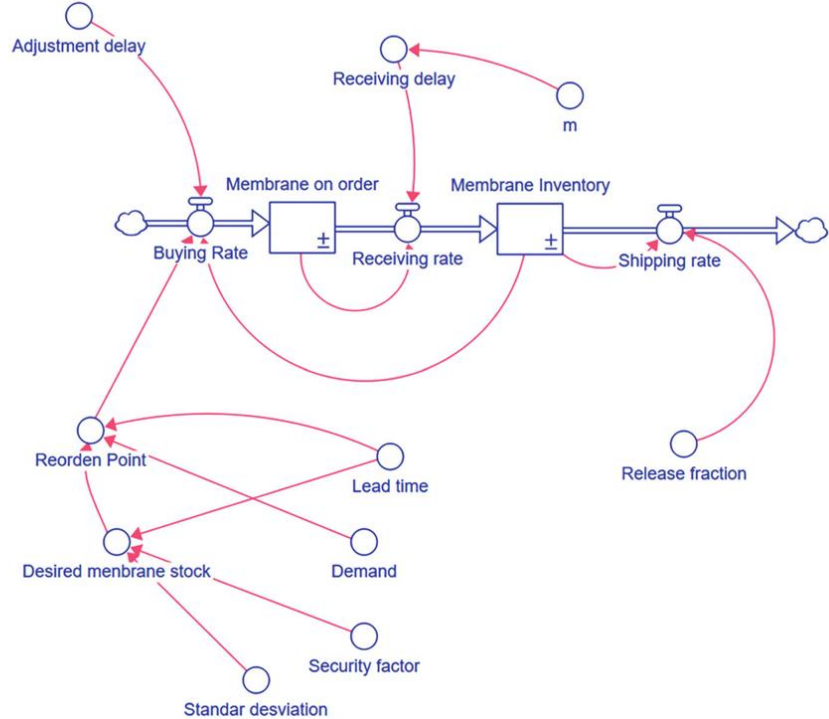


Figura 3.4. Detección de anomalías.

3.4.4. Diagrama de flujo de inventario máximo

En la Figura 3.4 Se analizó el inventario máximo que tiene la empresa para satisfacer la demanda solicitada por el cliente, al considerar un tiempo de ajuste del pedido de una semana, así como el tamaño de lote que le conviene solicitar al proveedor para enviar los pedidos completos al cliente, de acuerdo con la demanda solicitada. Las órdenes colocadas al cliente por parte del proveedor Tier 1 es la diferencia entre el inventario máximo y el tamaño de lote inversamente proporcional al tiempo entre pedidos de dos semanas. En este modelo las órdenes atrasadas son permitidas con una política de reabastecimiento y de revisión periódica.

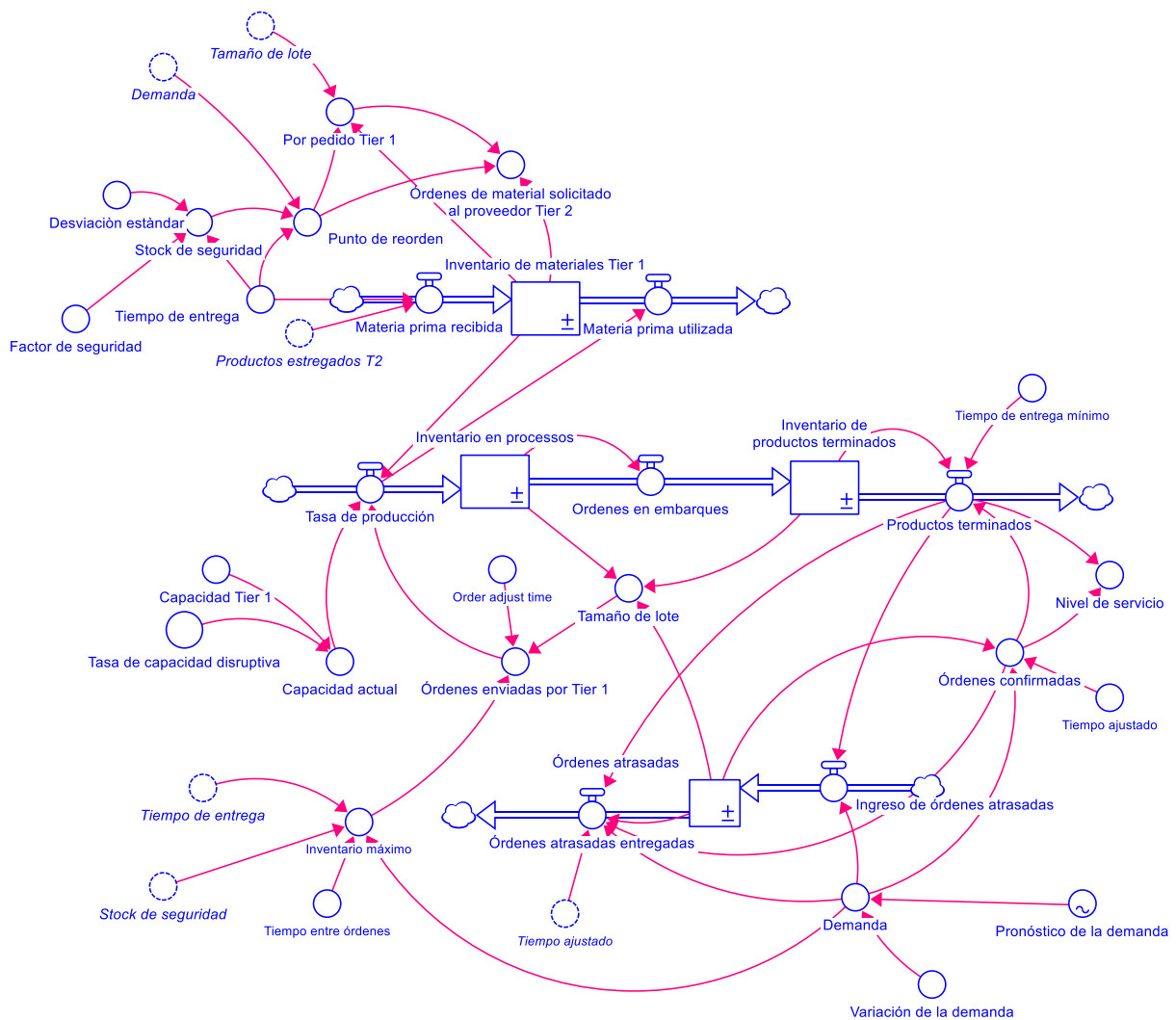


Figura 3.5. Modelo dinámico con inventario máximo.

3.4.5. Diagrama de flujo de ventas perdidas

En la Figura 3.6 se muestran las órdenes Tier 1 son el máximo de la diferencia entre el inventario máximo menos tamaño de lote que es determinado por el inventario de productos terminados más las órdenes atrasadas menos el inventario en procesos, con un ajuste en las órdenes. Las órdenes listas por embarcarse tienen un retraso de máximo cuarto semanas equivalentes a un mes de producción. Se tiene un inventario inicial de 2300 piezas equivalentes a una semana de inventario. El total de capacidad disruptiva es de 2600 unidades equivalente al 25% de la producción mensual que incluye la capacidad actual de 10300 unidades por mes, con una eficiencia de línea de producción del 70 %.

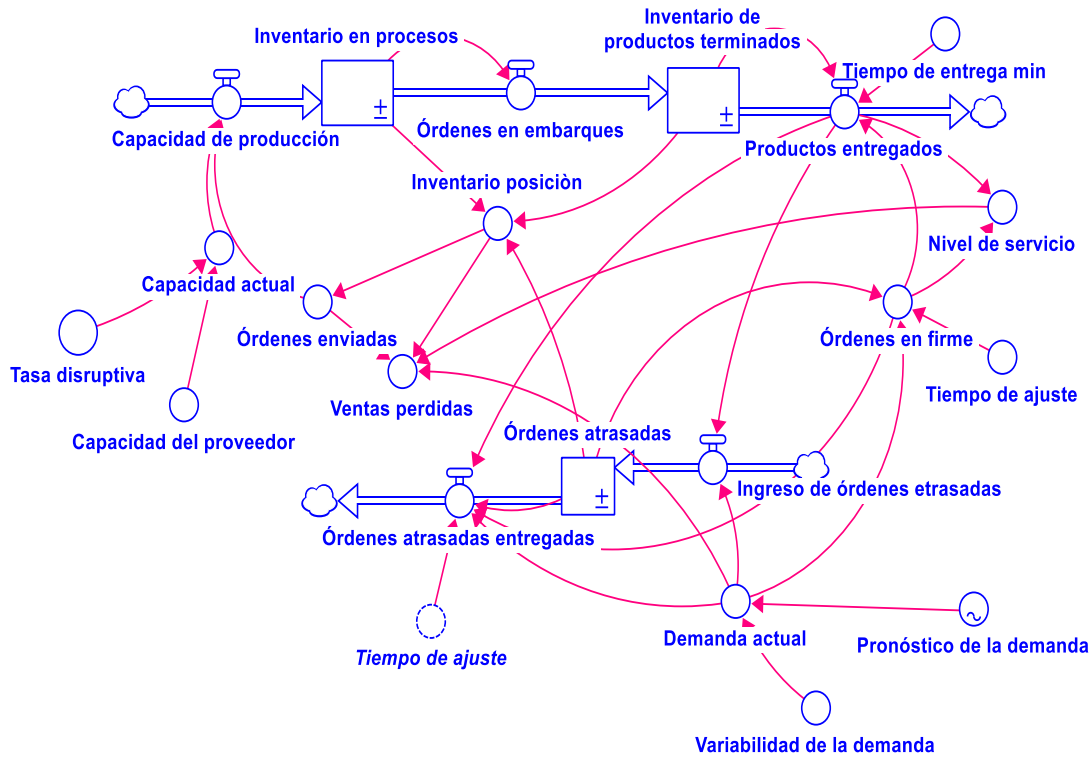


Figura 3.6. Modelo dinámico de efecto dominó.

3.4.6. Diagrama de flujo de costos de desempeño de la cadena de suministro

En la Figura 3.7 comienza con el enlace entre el ingreso de pedidos atrasados con los costos de ordenes atrasadas es el costo de penalización que corresponde al 20% del costo del pedido por el ingreso de pedidos atrasados, así mismo se agregó el costo total por unidad que incluye el costo por unidad, costo disruptivo, costo de almacenaje incluye la suma de los inventarios de procesos y productos terminados por la tasa de interés del 30% que corresponde a la prima de seguros por riesgo del transporte, almacenamiento y deterioro de la mercancía, como resultado se obtuvo el costo total de la cadena de suministro sumando los costos de inventario, de materia prima, costos por órdenes atrasadas y costos por productos entregados al cliente.

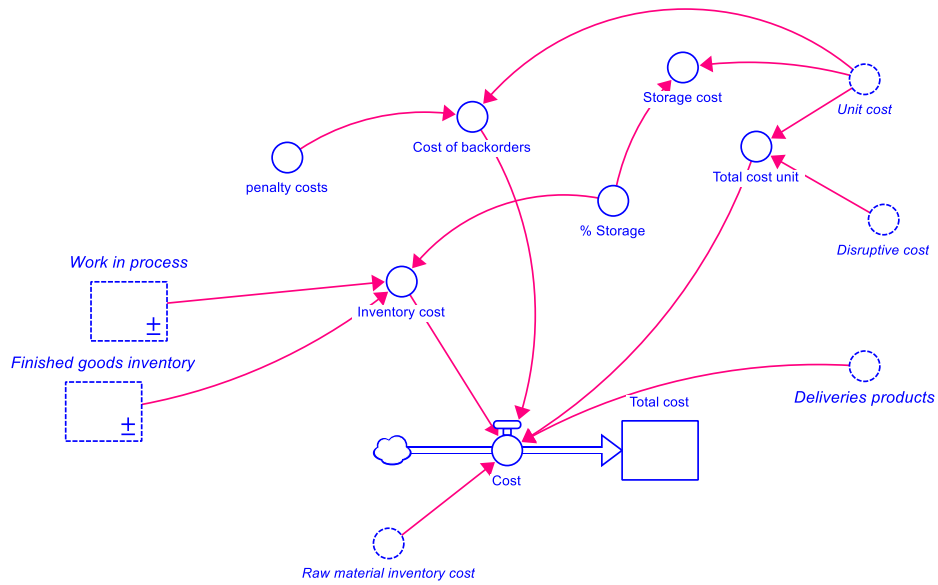


Figura 3.7. Costos en la cadena de suministro.

En la Figura 3.8 además de los costos de inventario en la cadena de suministro se integraron las ventas perdidas que se presentan cuando los pedidos enviados al cliente son menores que la demanda solicitada por la armadora, como resultado se incorporan los costos de ventas perdidas que están relacionados por la cantidad de órdenes no entregadas por el costo de penalización del 20%. El costo de ventas perdidas es el costo por la demanda no satisfecha.

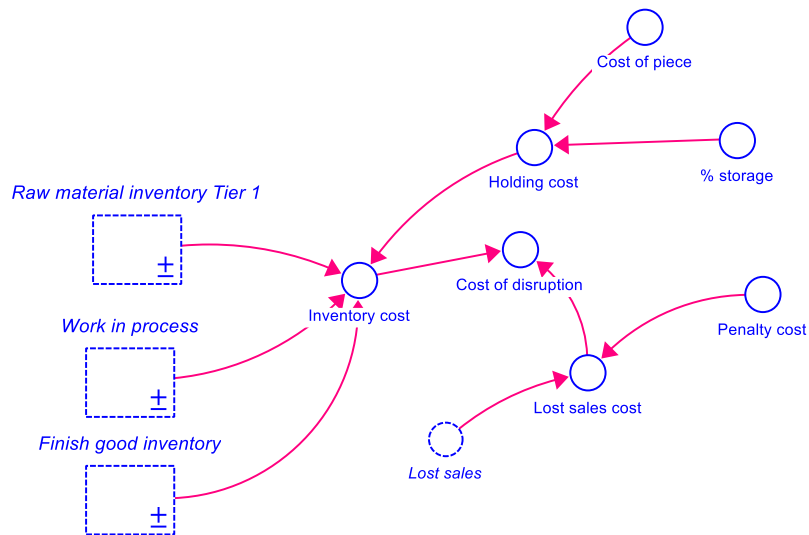


Figura 3.8 Costo por ventas perdidas.

En la Tabla 3.2 se muestran las variables con valores iniciales para iniciar el modelado de la demanda en el software *Stella Architant*, ya usando dinámica de sistemas.

Tabla 3.2. Descripción de las variables en condiciones iniciales.

Notación	Descripción	Valor	Unidad
<i>DO</i>	Pedidos entregados	6700	Piezas
<i>IO</i>	Ingreso de órdenes del proveedor T1	5000	Piezas
<i>WIP</i>	Inventario en procesos	500	Piezas
<i>OS</i>	Órdenes de productos terminados en embarques	6200	Piezas/Semana
<i>OT1</i>	Pedidos completos enviados al cliente.	3500	Piezas/Semanal
<i>TAP</i>	Tiempo de ajuste de pedido	1	Semana
<i>IDPE</i>	Ingreso de pedidos	6300	Piezas/Semanas
<i>IP</i>	Tamaño de lote	6500	Piezas
<i>FGI</i>	Inventario de productos	2500	Piezas /Semana
<i>PE</i>	Órdenes de productos terminados enviados al cliente.	3000	Piezas/semana
<i>TME</i>	Tiempo mínimo de entrega	1	Semana
<i>PAE</i>	Pedidos atrasados entregados al cliente	10,000	Piezas /semanas
<i>PA T1</i>	Pedidos atrasados por parte del proveedor Tier 1	4,000	Piezas/ semana
<i>IPA</i>	Ingreso de pedidos atrasados	1	Semana
<i>OF</i>	Órdenes en firme	8000	Mensual
<i>NS</i>	Nivel de servicio ofrecido al cliente	60	Porcentaje
<i>D</i>	Demanda de autopartes	10,300	Piezas/semanal
<i>Imax</i>	Inventario máximo en la cadena de suministro.	18,000	Piezas / mensuales
<i>VarD</i>	Variabilidad de la demanda	+50	Porcentaje
<i>SS</i>	Stock de seguridad	2	Semanas
<i>TO</i>	Tiempo entre órdenes	2	Semanas
<i>LT</i>	Tiempo de entrega	1	Semana
<i>CA</i>	Capacidad de producción	2,500	Piezas /semana
<i>TCT1</i>	Capacidad disruptiva total	2500	Piezas /semana
<i>DCR</i>	Tasa de capacidad disruptiva	75	Porcentaje

3.5. Interpretar y analizar la información obtenida del modelo

Se evaluó el modelo disruptivo utilizando la tasa disruptiva que incluye los valores de $0 < X < 1$ donde el cero indica que no hay disrupción, 0.25 indica que hay paros técnicos por el retraso de los materiales y fallas en el equipo, 0.5 indica la escasez del material por parte del proveedor y 0.75 a 1 indica disrupción severa equivalente a 15 días de suspensión de labores por la falta de material. El total de capacidad disruptiva de 2600 tanques de gasolina para los vehículos, lo cual representa el 25% de la producción mensual que influye en la capacidad actual de 8000 tanques de gasolina con una eficiencia del 70%. En este modelo se consideró un tiempo de entrega variable de 1 a 4 semanas, es decir de 0.25 a 1 mes, así mismo se agregó el tiempo entre pedidos de dos a 4 semanas, además se cuenta con n factor de seguridad de 95% de evitar el desabasto de material, de manera simultánea se asume una variabilidad de la demanda desde $-0.70 < D < 1$ que genera incertidumbre en la cadena de suministro. En tanto se cuenta con un costo por ordenar de 87 dólares, costo por pieza de 30 dólares, riesgo de pérdida de mercancía esta entre un 20% a 35% del costo por pieza, costo de penalización de 20% del costo por pedido.

3.6. Comparar los resultados obtenidos y validarlos, usando un análisis de sensibilidad.

En la etapa 6 se busca comparar los resultados obtenidos y validarlos de forma empírica usando un análisis de sensibilidad. Esto se pretende lograr utilizando como referente estudios previos sobre este por ejemplo los realizados por Bueno y Cedillo, (2014); Cedillo et al. (2014); y Sánchez et al. (2020), quienes validaron su modelo de forma empírica utilizando dinámica de sistemas para pronosticar futuros escenarios asumiendo una política de inventarios de revisión continua, además utilizaron un análisis de regresión y diseño de experimentos. Por otro lado, Ivanov (2017) propone cambiar los parámetros de forma dinámica durante la experimentación y observar el impacto que tiene el inventario en el ED. Los resultados obtenidos en el análisis pueden ser utilizados por los gerentes para analizar la disrupción de la CS y el costo que representa de manera anticipada, esto puede disminuir errores o faltantes de inventario.

En la Tabla 3.3 se muestran los indicadores para evaluar el comportamiento de demanda, al considerar el tiempo de entrega desde una semana hasta cuatro semanas, con un factor de seguridad del 95%, , además se integra la tasa disruptiva desde 0.5 hasta 1 que indica el periodo disruptivo con un ajuste en el inventario de piezas. Estos parámetros, se utilizaron para el análisis de sensibilidad que impactó en las métricas de desempeño de la cadena de suministro; como son el nivel de servicio, las órdenes enviadas al cliente, ventas perdidas y en los costos de inventario, disruptivos. .

Tabla 3.3. Estimación de parámetros usando un análisis de sensibilidad.

LT en meses	Factor de seguridad	Tasa disruptiva	Variabilidad de la demanda (ρ)	Periodo disruptivo en meses	Tiempo entre pedidos en meses	Retraso	Ajuste del inventario en piezas
0.25	95%	0	0	0.25	0.5	1	2500
0.50	95%	0.2	0.50	0.50	1	2	5000
0.75	95%	0.5	1	0.75	1.5	3	7500
1	95%	0.75	-0.25	1	2	4	10000
1	95%	1	.0.50	1.50	3	5	10000

4. RESULTADOS

Se cuantificó el efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz para evaluar su impacto en la satisfacción del cliente, nivel de servicio y en el costo, además encontrar el equilibrio entre el nivel de servicio y la capacidad de respuesta en función del costo. Por lo tanto, se estimaron los parámetros mediante un análisis de sensibilidad: a) la demanda que se comporta normalmente, b) el tiempo de entrega inicia con siete días. Factor de seguridad con 95% de confianza, β es el nivel de reabastecimiento. Las bondades de este análisis de sensibilidad que mostró los efectos que tienen, la demanda, el nivel de inventario, y LT en la REDEL que influyen en el CDC

4.1. Resultados del diseño y elaboración del cuestionario

A partir del cuestionario elaborado y siguiendo el proceso de evaluación y validación del mismo, primero se envió al comité de ética de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez antes de aplicarlo a las empresas. Una vez que se recibió el resultado favorable, se inició con la recolección de datos a partir del 03 de noviembre de 2022 de manera electrónica con el cuestionario realizado en *Google Forms*, logrando hasta el momento la respuesta de 54 empresas de autopartes de un total de 100 empresas que están consideradas. La información recabada servirá para evaluar cómo estas perciben el riesgo en sus proveedores, la demanda de sus clientes, el inventario, los tiempos de entrega, el efecto látigo que influyen en el efecto dominó que impactan en los costos de desempeño como son el nivel de servicio y la satisfacción del cliente.

En la Figura 4.1 se muestra una participación del 51% de 100 empresas automotrices, donde el 41% de las empresas contestadas son del departamento de cadena de suministro, 25% logística, 25

planeación, 8 % compras. El 75% de los gerentes tiene licenciatura terminada con más de 5 años de experiencia en el puesto, así mismo el 59% de las empresas corresponde a proveedores Tier 1 con alrededor de 500 empleados y el 41% son proveedores Tier 2 con 101 a 200 empleados.

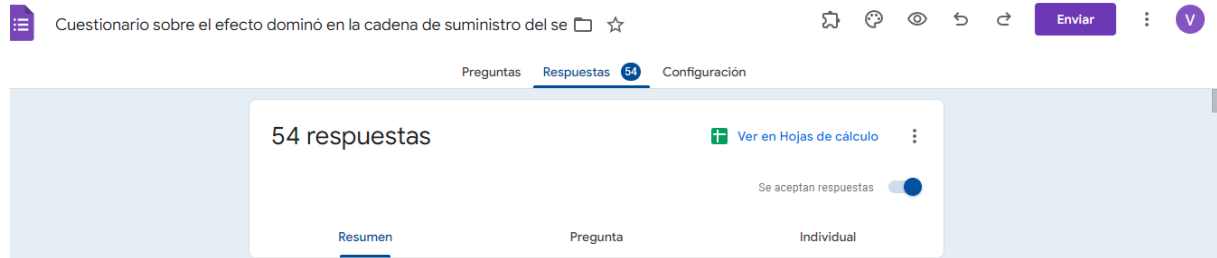


Figura 4.1. Cuestionario sobre el efecto dominó de la cadena de suministro.

4.2. Entrevista personal a los gerentes

Se creó una entrevista personal para los gerentes, encargados en los departamentos de planeación de la demanda, cadena de suministro, logística y compras de las empresas de autopartes fue evaluada por el comité de ética de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ) que consta de 16 preguntas que permiten obtener información cuantitativa para modelar el efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz con enfoque de dinámica de sistemas. Como se muestra en la Figura 4.2, el formato de entrevista completa se visualiza en el ANEXO 1.

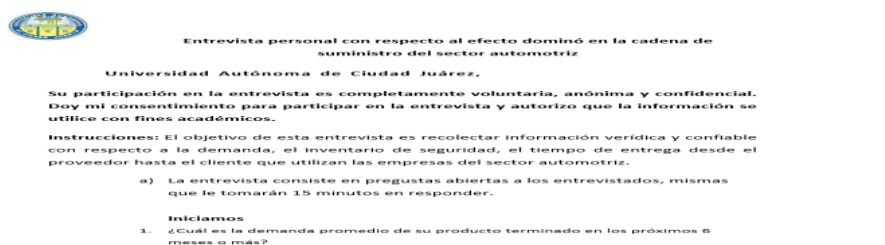


Figura 4.2. Entrevista personal a los gerentes de logística.

Las entrevistas se aplicaron a partir del 03 de noviembre de 2022 la fecha y continúan aplicándose hasta septiembre de 2023, visitando a cada uno de los gerentes a sus empresas. Como resultado se

entrevistaron a 7 gerentes de distintas empresas (proveedoras Tier 1) y donde se obtuvo la información mostrada en la Tabla 4.1 como partes inicial para alimentar las ecuaciones definidas en la metodología, previo a la modelación en dinámica de sistemas en el software Stella que permiten modelar el comportamiento de las variables demanda, la cantidad de órdenes enviadas al cliente, el nivel de servicios que impactan en el efecto dominó y en los costos de satisfacción del cliente con condiciones iniciales.

Tabla 4.1. Resultados de la entrevista personal realizada a empresas.

Empresas	1	2	3	4	5	6	7
P1	1,200,000	45000	25000	54000	400	60000	450 km de cable
P2	500 kg	3000	5000	5 días	4 días	3 días	4 semanas
P3	8-10 semanas	12 semanas	3 días	1 semana	7 días	2 semanas	1 semana
P4	2 semana	4 semanas	1 semana	4 semanas	4 semanas	6 semanas	16 semanas
P5	1 día	1 semana	4 días	1 semana	1 semana	1 semana	1 día
P6	600 SKU	200 SKU	15 SKU	50 SKU	5000 SKU	50 SKU	5000 SKU
P7	400 USA/HORA	Cancelación	1 semana	Paros de línea	Reducción de pedidos	Reducción de pedidos	Retraso de pedidos
P8	Multas		Escasez	20% penalización	Tiempo de estadía	Paros de línea	Retraso de pedidos
P9	10 semanas	6 horas	1 semana	2 días en aduanas	1 semana	5 días	1 día
P10	88 USA	8 USA	60 USA		Semana		
P11	87 USA		40 USA		6 dólares/día	12000 USA	
P12	89%	96%	75%	70%	50%	60%	80%
P13	2 semanas	1 semana	5 días	3 días	3 días	4 semanas	4 semanas
P14	87%	70%	70%	90%	70%	80%	70%
P15	800 USA/hora	20,000 /hora	1000/hora	20%	20% de pedido	50% de l pedido	300, 000 USA
P16	7	2	6	15%	10 pedidos atrasados	2 pedidos al mes	1

4.3. Pronósticos de la demanda con *Machine Learning (ML)*

Con los pronósticos obtenidos en las entrevistas en las empresas de autopartes se realizó un análisis de datos En la etapa uno se recolectaron los datos históricos durante 61 meses a partir de enero de 2019 hasta enero de 2024 de una empresa que se dedica a suministrar tanques de gasolina a la armadora Toyota en Excel denominada base de datos de la industria automotriz, con formato de archivo xlsx.

En la etapa dos se importó la base de datos de la etapa uno por medio de data frame. read_Excel ('Base de datos de la industria automotriz en el software Python versión 3.7.12, posteriormente se realizaron pruebas estadísticas con los modelos tradicionales de series de tiempo para determinar el Error Medio Cuadrático (MSE), Error Medio Absoluto (MAE), Porcentaje de Error Medio Absoluto (MAPE) que indican el menor porcentaje de error en el pronóstico de la demanda. Se estimaron los parámetros de los modelos de; suavización exponencial simple (SES) con un alfa de 0.3 y un alfa optima de 0.5878, suavización exponencial doble con un alfa de 0.3 y beta de 0.1.

La optimización de estos parámetros se obtuvo validando el modelo de SES valor optimizado verdadero, al omitir el factor de suavización 0.3. En la etapa tres se aplicaron los modelos de ML que consiste en a) crear las variables (x,y), donde x son el número de meses, y es la demanda para graficar la demanda con respecto al tiempo, b) importar los algoritmos Random Forest regressor, AdaBoost Regressor, para evaluar los algoritmos de ML y realizar la predicción de la variable (y) denominada y pred, con las métricas del error el Error Medio Cuadrático (MSE), Error Medo Absoluto (MAE), Porcentaje de Error Medio Absoluto (MAPE), además se comparó la gráfica de la demanda real con la demanda pronosticada.

En la Figura 4.3 se muestra el comportamiento obtenido a partir de la información obtenida de la demanda, que fue desde enero de 2019 y hasta enero 2024 de productos automotrices, y donde se indica que se comporta de forma intermitente debido a que en la empresa automotriz se generaron diversos paros técnicos de producción en octubre de 2019 a septiembre de 2020 por la falta de material. A partir de octubre de 2020 se incrementó la producción un 23%, debido a que las empresas del sector automotriz comenzaron a reanudar operaciones.

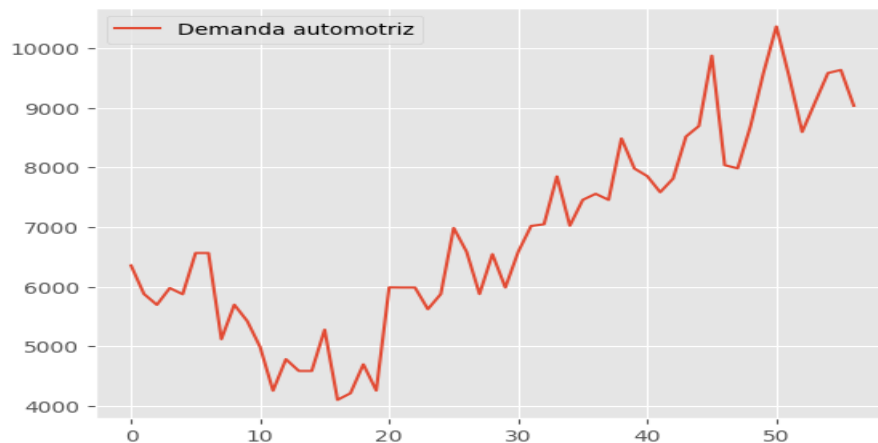


Figura 4.3. Pronósticos de la demanda de autopartes.

A continuación, se muestra la Tabla 4.2 con la aplicación de los métodos de series de tiempo tradicionales; Promedio Móvil Simple con $t = 2.3$ periodos, Suavización Exponencial Simple con un Alfa de 1.3803, Suavización Exponencial Doble, Modelo de Winter. Como resultado el Método de Suavización Exponencial Simple obtuvo un mayor nivel de precisión del 72.02%, que los otros Métodos. Por lo tanto, es un buen modelo de pronóstico que ayudó a predecir el comportamiento de la demanda de la fabricación de tanques de gasolina. Este modelo tiene un 28.5 de error del pronóstico con respecto a la demanda.

Tabla 4.2. Métodos de pronósticos de la demanda.

Modelos de pronósticos tradicionales	Parámetros	MSE	MAE	MAPE
Suavización exponencial simple	0.5878	455758.38	538.29	8.17
Modelo de Holt	Alfa=0.03, Beta= 0.1	455757	538.15	8.17

4.4. Pronósticos de la demanda con PYTHON

En la Figura 4.4 Se indica la comparativa entre la demanda respecto la proyección que se realizó en el software PYTHON con algoritmos de ML. En la fase uno se utilizó el 70% de los datos de entrenamiento del modelo. En la fase dos se aplicaron el 30% restante para el aprendizaje del modelo. Donde la línea roja muestra el comportamiento de los datos reales de la demanda, con una demanda intermitente a causa de paros técnicos que se llevaron a cabo en los meses marzo de 2020 hasta agosto de 2020 por la pandemia. Lo que indica que con este algoritmo redujo un 46% el Error Medio Absoluto y como consecuencia, el algoritmo AdaBoost Regresor aprendió a detectar el patrón de comportamiento de la demanda de los componentes automotrices.

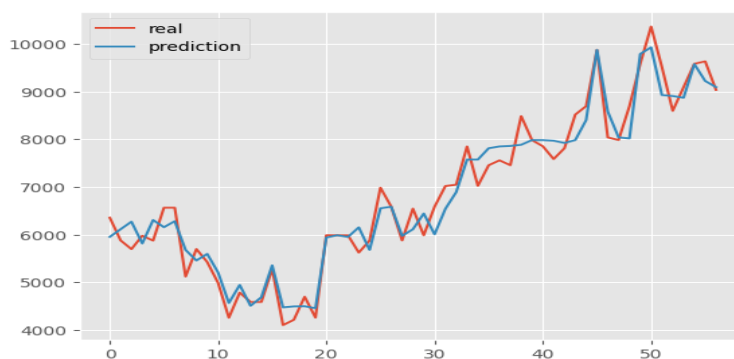


Figura 4.4. Pronósticos de la demanda de autopartes con PYTHON

4.5. Análisis e interpretación del modelado de la demanda sin interrupción y con interrupción en la cadena de suministro

De acuerdo con los datos obtenidos en análisis previos utilizando la simulación con dinámica de sistemas para el modelado de la demanda con una distribución de probabilidad normal. Con respecto a Olivares y ElMaraghy, (2021) que excluye calcular el grado de incertidumbre que existe en la demanda para cuantificar el efecto dominó. En esta investigación se modeló las recepciones atrasadas, las órdenes enviadas al cliente por el proveedor de nivel 1, el nivel de servicio, el nivel de inventario de productos terminados. En la Figura 4.5 se muestran los resultados del análisis realizado al comportamiento en la recepción de los pedidos, considerando un retraso de dos semanas de parte del proveedor Tier 2 durante los meses de abril 2020 a noviembre 2020 con una disminución en la producción de tanques de gasolina de 10300 a 2300. Esto debido a la presencia de la interrupción de la cadena de suministro debido a la escasez de componentes durante la pandemia y que fue en un nivel global.

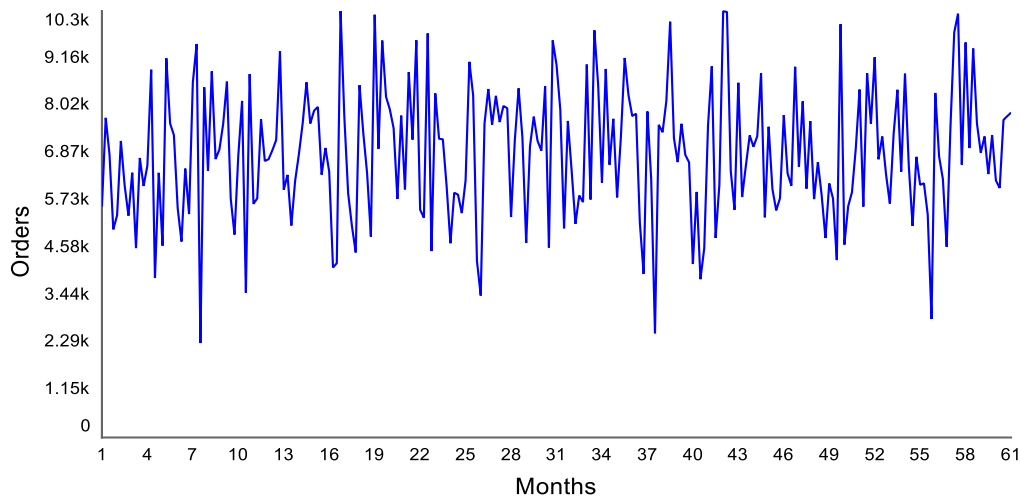


Figura 4.5. Recepciones atrasadas.

Por otro lado, se analizó el comportamiento de las órdenes entregadas al cliente por el proveedor Tier 1, los resultados se muestran en la Figura 4.6, donde se observa que durante los meses de enero a marzo del año 2020 se entregaron las órdenes completadas de acuerdo con los requerimientos solicitados por cliente. Sin embargo, a partir del mes de abril del mismo año, cuando la cadena de suministro del sector automotriz suspendió operaciones a causa del COVID 19, se disminuyeron drásticamente las órdenes entregadas al cliente. Posteriormente, la industria automotriz comenzó a recuperarse al

incrementar la demanda de componentes en un 80%, en este caso incrementos de 4500 a 8300 tanques de gasolina en un periodo de tres años, referido a la demanda de vehículos.

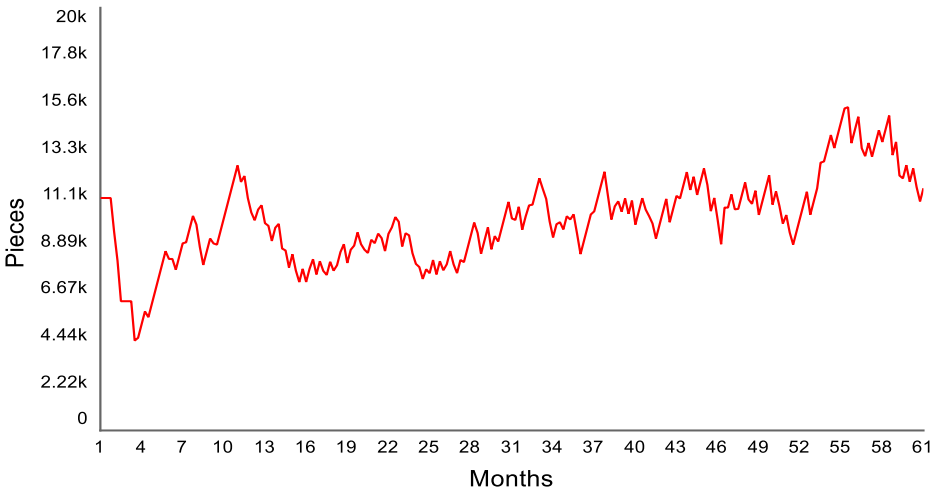


Figura 4.6. Órdenes entregadas al cliente por el proveedor de nivel 1.

Además de lo anterior, se analizó el comportamiento del nivel de servicio del proveedor Tier 1 y mostrado en la Figura 4.7. Donde se observa que disminuyó de 80% que solicitaba el cliente antes de pandemia a 65% por la disminución de la demanda de 10369 a 4102 que se presentó en los meses de abril 2020 a agosto 2020. No obstante, continúan aumentando los tiempos de entrega por parte de los proveedores Tier 1 a sus clientes por la escasez de componentes.

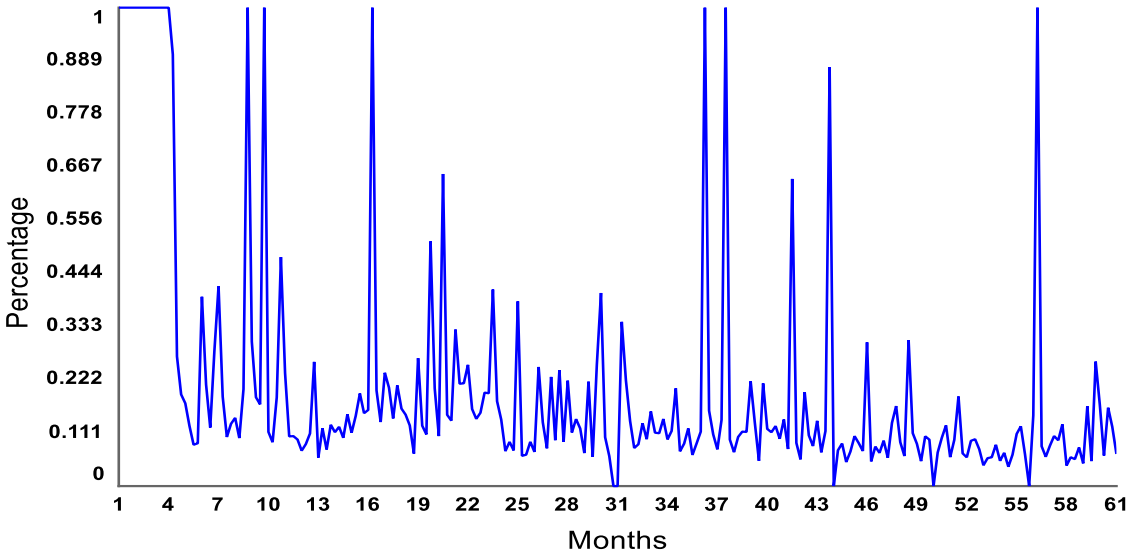


Figura 4.7 Nivel de servicio.

Finalmente, también se analizó el nivel de inventario de productos terminados del proveedor de nivel 1 y mostrado en la Figura 4.8. Los resultados indican un impacto en la reducción del 66% del nivel de inventario de productos terminados, esto debido a la suspensión de labores en la industria automotriz en México a causa del COVID 19 durante el primer semestre del año 2020. Posteriormente, se incrementó un 30% el nivel de inventario que representa una semana de stock de seguridad que ayuda al proveedor Tier 1 a abastecer la demanda del cliente. Sin embargo, sí el cliente incrementa la demanda en un 50 %, el proveedor Tier 1 se retrasa una semana en entregar el pedido, por la escasez de materiales que tiene el proveedor Tier 2. Como resultado, cuando ocurre este escenario el cliente tiene paros de línea que influye en la disminución en la participación del mercado.

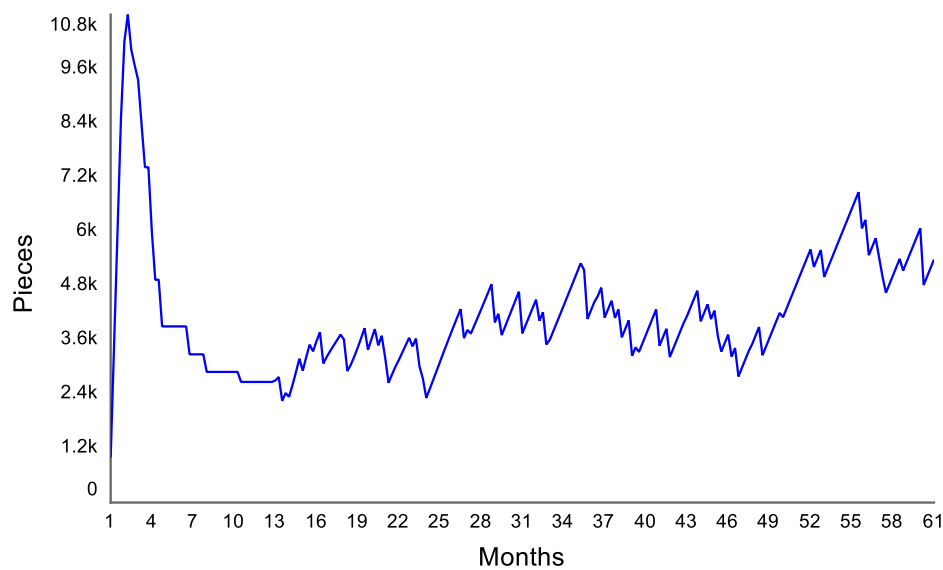


Figura 4.8 Nivel de inventario de productos terminados.

4.6. Comparar los resultados y validarlos mediante un análisis de sensibilidad

Es importante mencionar para lograr el modelo se utilizó la demanda desde una base de datos en Excel con formato xlsx de 61 meses con una variabilidad en la demanda desde $-0.5 < D < 1$. La modelación del sistema dinámico para detectar la disrupción en la cadena de suministro de la industria automotriz consideró diez escenarios sin disrupción y con disrupción que se muestran en la Tabla 4.3 El primer escenario es sin disrupción con una demanda estable con un tiempo de entrega de una semana considerando un retraso de una semana. Para los escenarios dos y tres se observa un incremento en la demanda del cliente del 20% al 50% con una disrupción del 50% que impactó en el retraso de la producción de dos semanas a causa de la escasez de materiales por el proveedor de nivel 1. Por otro

lado, en los escenarios 4 y 5 la demanda del cliente decrece un 50%, por la escasez de materiales de parte de los proveedores a nivel global. En los escenarios 6 y 7 la demanda del cliente aumentó en 50% con una disrupción severa de 0.7 que indica la suspensión de operaciones en toda la cadena de suministro del sector automotriz durante 4 semanas a causa de la escasez de materiales de parte del proveedor de nivel 2, con un tiempo de entrega de 4 semanas. El escenario 8 se presenta cuando la demanda del cliente incrementó un 70% con una disrupción severa de 0.7 y por ende los proveedores comenzaron a disminuir su inventario de materiales a causa de la interrupción de las operaciones. Por lo tanto, en los escenarios 9 y 10 la demanda del cliente disminuyó un 70% con los incrementos en los tiempos de entrega de 4 semanas por proveedores que se encuentran en México y de 16 semanas de los proveedores internacionales.

Tabla 4.3. Escenarios de la disrupción en la cadena de suministro de la industria automotriz

Escenarios	Variación de la demanda	Tasa de capacidad disruptiva	Tiempos de entrega	Retraso en meses
1	0	0	0.25	0.25
2	0.2	0.5	0.5	0.5
3	0.50	0.50	0.50	0.50
4	-0.20	0.50	0.50	0.50
5	-0.50	0.50	0.50	0.50
6	0.2	0.7	1	1
7	0.50	0.7	1	1
8	0.7	0.7	1	1
9	-0.2	0.7	1	1
10	-0.5	0.7	1	1

Se muestra en la Tabla 4.4 un análisis comparativo de los diez escenarios que se corrieron en el modelo dinámico para la detección de la disrupción en la cadena de suministro del sector automotriz a partir de dinámica de sistemas. En el escenario 1 con una demanda estable, sin disrupción considerando un tiempo de entrega de una semana. En este escenario el proveedor Tier 1 solo entregó 4289 tanques de gasolina al cliente, además le solicitó al proveedor Tier 2 un incremento de 75% de la producción de 7457 componentes para fabricar el tanque de gasolina considerando un retraso de una semana en los proveedores nacionales. En el escenario 5 con un decremento en la demanda de 50%, con una capacidad disruptiva de 50% se retrasó el proveedor Tier 2 dos semanas en entregarle los componentes al proveedor Tier 1 para el ensamble de los tanques de gasolina, lo cual solo entregó 1754 más las órdenes atrasadas. Como resultado, el cliente le cobra una penalización del 20% al proveedor Tier 1 por entregarle dos semanas después. En el escenario 7 con una variación en la demanda de 50%, con una disrupción severa,

con un tiempo de entrega de 4 semanas del proveedor de nivel 2, cumplió con el 35% de la producción de 4826 de 1550 tanques de gasolina solicitados por el cliente, por la escasez de materiales del proveedor Tier 2. Por otro lado, el proveedor Tier 1 tuvo la necesidad de incrementar sus órdenes de compra con otros proveedores. En el escenario 9 con un decremento de la demanda de 50%, el proveedor Tier 1 cubrió la demanda solicitada por el cliente con un retraso de cuatro semanas del pedido de 6531 componentes y solo cuenta con 3125 tanques de gasolina para cubrir la demanda de dos semanas como máximo. Este resultado demuestra que el proveedor corre el riesgo de cancelación de contrato por parte de la armadora debido a que no podrá cumplir con los pedidos solicitados en los próximos meses.

Tabla 4.4. Escenarios de la disrupción en la cadena de suministro de la industria automotriz

Escenarios	Recepciones atrasadas	Órdenes enviadas por Tier 1	Órdenes de material a Tier 2	Órdenes a embarcar	Órdenes completadas
1	7346	4289	7457	8125	6881
2	6884	7106	9985	4268	6769
3	6937	7924	9888	4256	5429
4	6760	6961	11000	4268	6679
5	6556	1754	3370	2410	6020
6	6870	2232	6184	5799	6931
7	6702	4826	7057	3052	5826
8	7072	6806	6450	5813	3856
9	6531	5565	7768	3125	6785
10	6901	5261	6901	5769	7589

Se muestra en la Figura 4.9 la comparativa de las recepciones atrasadas. La línea morada indica que no existe disrupción en la cadena de suministro de la industria automotriz con un tiempo de entrega de una semana. La línea punteada indica que existe una disminución de la demanda del 0.5, con una disrupción parcial que incrementó un 40% las recepciones atrasadas afectando la producción de tanques de gasolina causando el incumplimiento de la demanda del cliente. La línea rosa punteada muestra que existe una disrupción severa que retrasó los pedidos programados en un mes provocando la cancelación de contrato con el proveedor.

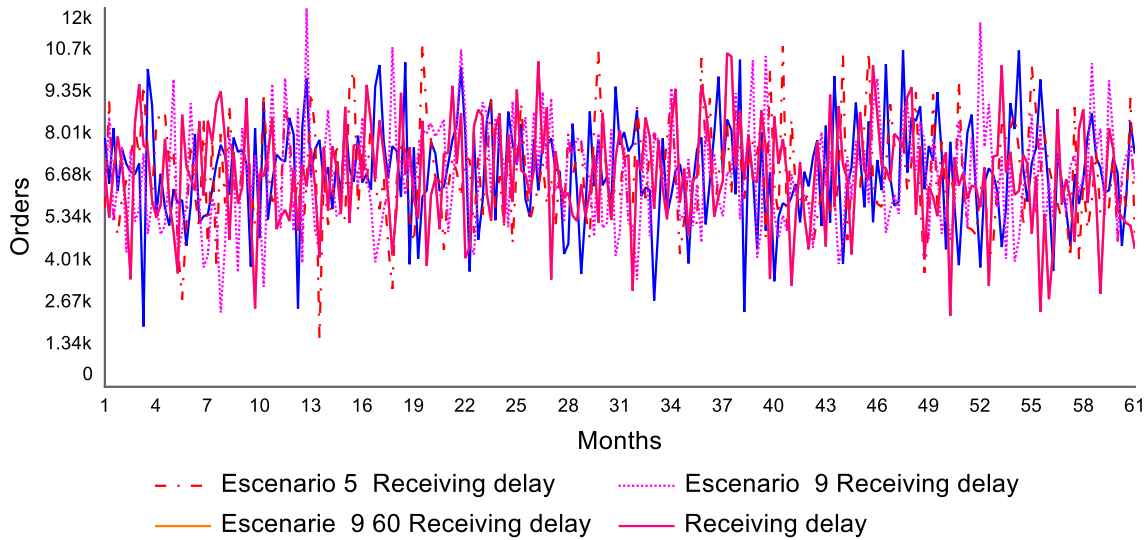


Figura 4.9. Escenarios de recepciones atrasadas.

En la Figura 4.10 se muestra la comparativa de las órdenes entregadas al cliente por el proveedor Tier 1. La línea naranja indica que no existe interrupción en la cadena de suministro con envíos constantes de 5000 tanques de gasolina mensual, así mismo la línea morada indica que existe una interrupción parcial que incluye paros técnicos de producción y disminución del nivel de inventario de productos terminados. La línea azul cielo indica una interrupción severa que afecta al cliente por el incumplimiento de pedidos. Con este escenario el proveedor corre el riesgo que el cliente le cancele el contrato de fabricación de tanques de gasolina por cuatro años.

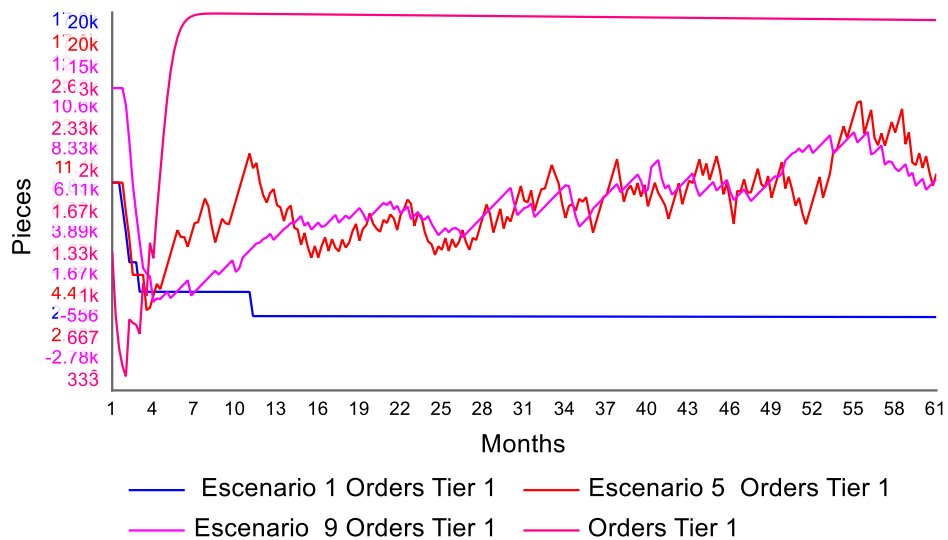


Figura 4.10. Escenarios de órdenes entregadas al cliente por el proveedor de nivel.

En la Figura 4.11 se muestra la comparativa del nivel de servicio tanto con interrupción y sin interrupción en la cadena de suministro en la industria automotriz. La línea naranja indica el nivel de servicio sin interrupción en la cadena de suministro. Indica un nivel de servicio con una reducción de la demanda del 50% a causa de la interrupción en la cadena de suministro de la industria automotriz. La línea azul resalta que existe un decremento del nivel de servicio debido a la disminución de las órdenes enviadas al cliente.

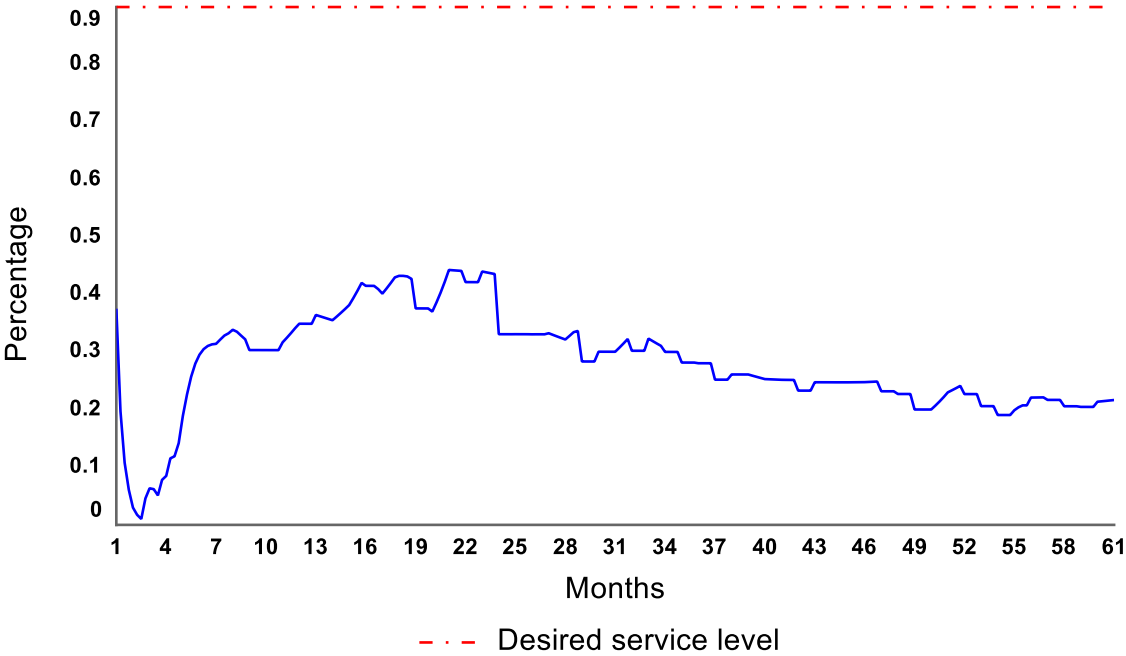


Figura 4.11 Escenarios de nivel de servicio con nivel de servicio deseado.

En la Figura 4.12 se muestra la comparativa del nivel de inventarios de productos terminados que tiene el proveedor tanto sin interrupción y con interrupción en la cadena de suministro. La línea naranja indica que no existe interrupción en la cadena de suministro manteniendo un nivel de inventario de 4000 tanques de gasolina mensualmente garantizando el cumplimiento de la demanda del cliente. Sin embargo, La línea rosa discontinua indica la interrupción en la cadena de suministro, por tanto, el proveedor Tier 1 tiene la necesidad de incrementar su nivel de inventario de productos terminados, no obstante, su proveedor Tier 2 tiene un retraso en la entrega de componentes de dos semanas que influye en el nivel de inventario de productos terminados de 3500 a 10,00 tanques de gasolina, por lo tanto, se redujo el nivel de inventario en los primeros 24 meses por la interrupción severa a causa de la suspensión

de operaciones en la cadena de suministro por la falta de materiales que tienen los proveedores Tier 2, como resultado disminuye la satisfacción del cliente.



Figura 4.12 Nivel de inventario de productos terminados.

En la Figura 4.13 se observa que existe efecto látigo en la cadena de suministro en la industria automotriz a causa del incremento de las órdenes enviadas al cliente de parte del proveedor de nivel 1. La línea naranja representa las órdenes enviadas al cliente donde se ajustó el nivel de inventario con un incremento de 1000 piezas adicionales. Sin embargo, este escenario ocasiona incrementar los costos de inventario en la cadena de suministro. Por lo tanto, si la varianza de las órdenes enviadas al cliente, con respecto a la varianza de la demanda es > 1 se corre el riesgo de presentar EL. Si la varianza es igual a 1 no existe efecto látigo. Si la varianza es < 1 se corre el riesgo de presentar efecto dominó. Este efecto ocurre cuando las ordenes enviadas al cliente disminuyen, además se incrementan los tiempos de entrega.

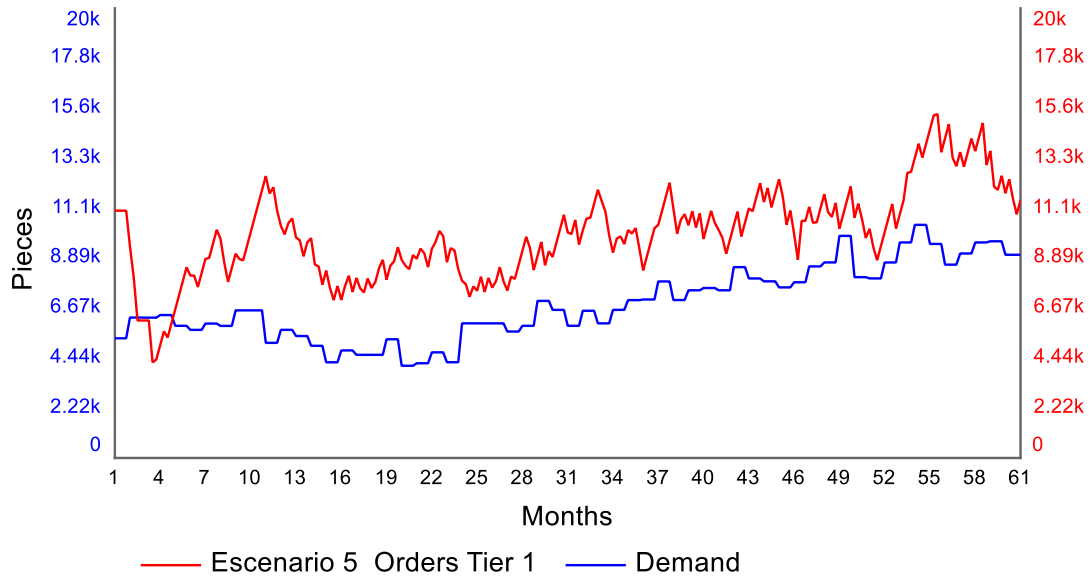


Figura 4.13 Comportamiento del efecto látigo.

En la Figura 4.14 se muestra el comportamiento de las ventas no concretadas, cuando las órdenes enviadas al cliente son menores que la demanda solicitada. La línea azul marino indica que en los meses de abril 2000 a septiembre 2020 se incrementaron las ventas perdidas en un 80% debido a la pandemia que causó cancelaciones de pedidos por la suspensión de operaciones en toda la cadena de suministro del sector automotriz.

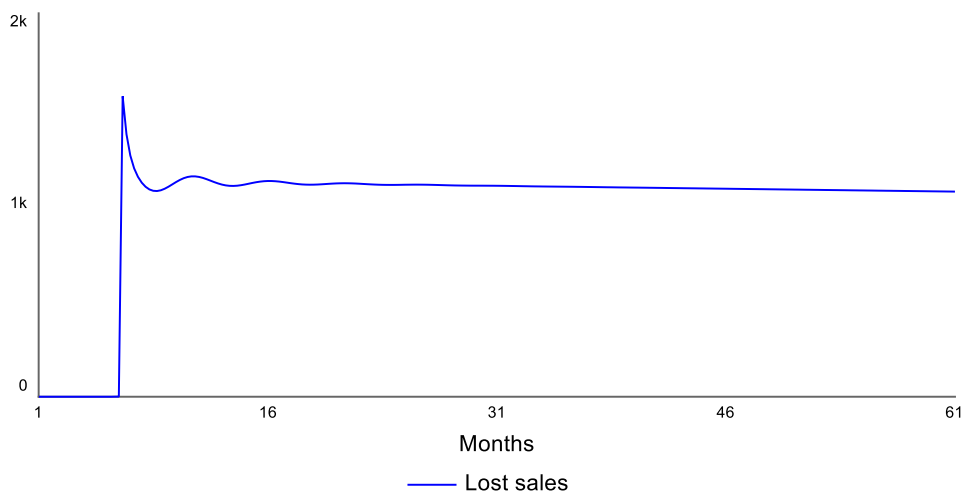


Figura 4.14 Ventas perdidas.

En la Tabla 4.5 se muestra la demanda solicitada al proveedor Tier 1. Por lo tanto, el proveedor solicita Tier 1 le solicita al proveedor Tier 2. En tanto el proveedor le suministra una cantidad mayor,

debido a que consideró una política de reabastecimiento donde se incluye la demanda solicitada más las órdenes atrasadas. En la Tabla 4.6 se muestran las métricas de desempeño de la variabilidad de la demanda y del suministro, donde se observa que el proveedor Tier 1 favorece el efecto látigo, por el decremento de las órdenes de la demanda del cliente e incrementos en los tiempos de entrega. Sin embargo, al proveedor Tier 2 tuvo un incremento en las órdenes atrasadas afectando el desempeño del proveedor Tier 1. En consecuencia, la variabilidad del efecto dominó es menor a 0.5 indica que el efecto látigo del proveedor Tier 1 favorece la ampliación del efecto dominó.

Tabla 4.5. Demanda y suministro

Eslabones de CS	Demanda	Suministro
Tier 1	6854.065574	4952.22781
Tier 2	6417.251852	9258.9044

Tabla 4.6. Métricas de desempeño

KPI	Valor
VarQR	1.01420074
VarED	0.09730002
REDEL	0.08049302

En la Tabla 4.7 se muestran los costos promedio mensual de; ventas perdidas 991 dólares, inventario de 62502, disrupción de 63492 dólares, adicional se agregó el costo de 9 dólares por unidad al ingresar como orden atrasada, como resultado, el costo de desempeño de la cadena de suministro es de 126985 dólares al mes. Esto indica que el costo del efecto dominó representa el 50%, del costo de desempeño de la cadena de suministro.

Tabla 4.7. Costos de desempeño de la cadena de suministro

Concepto	Costo en dólares
Costo por ventas perdidas	\$991.00
Costo disruptivo	\$63,492.00
Costo del inventario	\$62,502.00
Costo de Cadena de suministro	\$126,985.00

En la Tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos en el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada son; cuestionario sobre la variabilidad del efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz, estancia académica, análisis de sensibilidad de modelo, cuatro participaciones en congresos internacionales, un capítulo de libro publicado, un artículo JCR publicado, segundo artículo JCR en proceso, un artículo en Scopus en proceso y la aceptación de la ponencia Análisis y visualización del efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz: Modelo híbrido machine learning con dinámica de sistemas para publicarse en el libro Memorias colectivas del CILOG 2025.

Tabla 4.8. Resultados del DOCIA

Ponencias	Cursos	Congresos	Publicaciones
Gestión de riesgos	Diseño de cadenas de suministro	Academia Journal Celaya 2022	JCR MDPI 2025
Análisis de riesgos	Investigación y escritura de documentos científicos con inteligencia artificial	CILOG 2023	Chapter 15 Publicado Febrero 2026
Networking Talent	Inteligencia artificial	CILOG 2025	JCR en proceso
Taller de Bigdata		IWIEAT 2025	Estancia Académica en la Universidad La Rioja, España, 2023
Taller de programación en Python		Libro colectivo de CILOG 2025	Chapter CILOG 2026

5. CONCLUSIONES

Como conclusión los factores de riesgo como el incremento del tiempo de entrega de una semana a 4 semanas favorece la disrupción de forma severa en la industria automotriz causando cancelaciones de pedidos al proveedor por la escasez de materiales, generándose una disminución de la demanda con un incremento en el inventario en procesos que impacta en la disminución de inventario de productos terminados, como resultados, el proveedor incrementa las órdenes enviadas al cliente durante tres meses ocasionando efecto látigo en la cadena de suministro que influye directamente en el efecto dominó que causa una disminución en el nivel de servicio de 90% a 55% durante la pandemia. Por otro lado si se incrementa el nivel de inventario de productos terminados, se incrementan las órdenes enviadas al cliente que son mayores que la demanda solicitada por el cliente. Este escenario el proveedor Tier 2 incrementó el número de órdenes atrasadas afectando el desempeño del proveedor, en consecuencia, la variabilidad del efecto dominó es menor a 0.5 que el efecto látigo del proveedor Tier 1 incrementa el efecto dominó que indica que el proveedor Tier 2 es quien asume el riesgo en la cadena de suministro.

Se cuantificó y evaluó el efecto dominó en la cadena de suministro de la industria automotriz utilizando una política de reabastecimiento, con un tiempo de entrega variable utilizando dinámica de sistemas El modelo fue desarrollado mediante el software Stella Architect versión 3.4.1., lo cual permitió obtener el nivel de servicio como variable de respuesta donde se logró analizar desde el 68% al 50% con una variabilidad de la demanda de 25% y la colocación de pedidos a las empresas ensambladoras de vehículos sin disrupción con una satisfacción de la demanda de 81% y con disrupción en la cadena de suministro se logró satisfacer la demanda a 60% debido a la cascada de cancelaciones que se generaron por la pandemia en el primer semestre del 2020, además se incrementó el número de pedidos atrasados de 10 a 19 pedidos entregados al cliente en un 90% a causa del aumento en los tiempos de entrega por parte de los proveedores por el desabasto de componentes automotrices. Se analizó el efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz al integrar dinámica de sistemas con *machine learning* que indica que el efecto látigo favorece al efecto dominó que representa el 50% del costo de desempeño de la cadena de suministro del sector automotriz con una demanda promedio 6700 unidades mensuales, además el efecto dominó reduce el nivel de servicio en un 46% que incrementó la demanda no satisfecha.

El modelo dinámico incluyó a los costos de; inventario, materia, prima, ordenes atrasadas, disruptivos y de productos entregados. Por lo tanto, el proveedor Tier 1 pagaba a su cliente un promedio de 6,000 dólares mensuales al cliente por retraso en los pedidos. En consecuencia, se incrementaron los costos disruptivos afectando principalmente a los proveedores Tier 1 y Tier 2 en la pérdida de ventas, además ellos asumen el riesgo a causa de los cambios en la demanda en el mercado. Por lo tanto, , el

comportamiento de la demanda que se consideró para el cálculo del stock de seguridad, y de ahí concluir en el hecho de que en la industria se usa una distribución normal para evitar costos asociados al incrementar el punto de reorden y stock de seguridad. Como resultado, la industria automotriz considera un stock de seguridad de dos semanas de inventario, asumiendo una distribución normal de acuerdo con la capacidad de la línea de producción, con el propósito de evitar el desabasto de material que ocurrió en el primer semestre del 2020, teniendo una rotación de inventarios de 24 veces al año, lo que indica que cada dos semanas reabastecen sus almacenes.

Al modelar la demanda real de una empresa automotriz que produce tanques de gasolina con una distribución normal de enero 2019 a enero de 2024 con una reducción de la demanda del cliente entre un 20% a 50% con una disrupción severa de 0.7 favorece al efecto dominó en toda la cadena de suministro afectando principalmente a los proveedores Tier dos debido a que tienen que modificar el programa maestro de producción incrementan sus costos para cumplir con la demanda del cliente.

Estos escenarios permiten a los gerentes de la industria automotriz comprender la importancia de detectar la disrupción en la cadena de suministro para prevenir el desabasto de material manteniendo un nivel de inventario de productos terminados de dos semanas a tres semanas para reducir los tiempos de entrega al cliente para mitigar el efecto dominó. Así mismo implica el incremento de costos para mantener el nivel de inventario, además es complejo para la industria automotriz proporcionar información con respecto a la demanda histórica de 10 años que impacta en la precisión de los pronósticos de la demanda que influye en la detección temprana del efecto dominó en los proveedores Tier 1 y implica reducir la cantidad de pedidos expeditados a nivel internacional a causa del desabasto de material en el almacén, afectando los indicadores de desempeño stock inicial, costo de materiales y tiempos de entrega que disminuye el nivel de servicio. Sin embargo, el algoritmo puede ser aplicado a cualquier tipo de industria.

Al compartir el modelo dinámico disruptivo con los proveedores Tier 1 y Tier 2 de la industria automotriz les ayudará a predecir el efecto dominó en dos áreas tales como el almacén de materiales y embarques al solicitarle a los proveedores materiales de manera anticipada para evitar el retraso en la entrega de los productos al cliente y reduce los costos de penalización de 20% por pedido, costo disruptivo que representa el 50% del costo total de la cadena de suministro, así mismo reduce el costo de ventas perdidas en un 15, con un incremento en los costos de inventario de 25%. Las compañías pueden integrar este modelo teniendo la demanda histórica de 5 años o más, así como los costos por ordenar, costos de penalización, cantidad de inventario, tiempos de entrega para predecir la demanda de la cadena de suministro.

El modelo dinámico revela que el efecto dominó favorece el retraso en la recepción de los pedidos por la disminución del inventario de materia prima del proveedor, además se incrementan los costos de materias primas por la escasez que existe a nivel global que reducen el desempeño de la cadena de suministro en nivel de servicio, satisfacción del cliente, como resultado reduce la rentabilidad del cliente.

Se comprobaron las hipótesis dinámicas establecidas en la investigación donde se indica con el decremento de la demanda en la industria automotriz se amplifica el efecto domino al disminuir el suministro al cliente, además que el efecto látigo ocasionado por el proveedor Tier 1 favorece al efecto dominó ocasionando retrasos en los pedidos, escasez de materiales e incremento de ordenes atrasadas.

5.1. Trabajos futuros de investigación

En los trabajos futuros se pretende evaluar el costo disruptivo de la cadena de suministro del sector automotriz tanto a proveedores Tier 1 y Tier 2 considerando los niveles de inventarios máximos y mínimos, quienes son el mayor factor de riesgo en la cadena de suministro debido principalmente a la escasez de materiales. En investigaciones de Ivanov et al. (2019), se asume calcular el punto de reorden con un nivel de servicio deseado para afrontar eventos disruptivos como fue la emergencia sanitaria a nivel Global, cuando la demanda es normalizada durante el tiempo de entrega, además Dolgui et al. (2022); Ivanov (2021) proponen que la industria automotriz debe contar con 30 días de inventario disponible para mitigar el impacto del efecto dominó, donde las órdenes atrasadas son permitidas durante una semana con una política de reabastecimiento. Esto influyó en la variabilidad de demanda entre 25% a 30% al incrementar la tasa de capacidad disruptiva de 0 (que indica que no hay disrupción en la cadena de suministro y, 1 que indica existencia de disrupción). Por lo tanto, a mayor disrupción en la cadena de suministro disminuye el nivel de servicio de 70% a 50%.

En la investigación extender el modelo al proveedor de nivel 2 y predecir de manera anticipada el efecto dominó utilizando la integración de inteligencia artificial con la optimización para ajustar el control de inventarios para disminuir el riesgo en la cadena de suministro, así como incrementar el tamaño de la muestra de 5 años a 10 años para tener una mayor confiabilidad en el modelo predictivo para disminuir el riesgo en la cadena de suministro.

5.2. Actividades divulgación y formación académica

En la Tabla 4.8 se muestran los logros y participación en la divulgación de resultados, así como en la formación académica durante el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada siendo los siguientes: diseño, elaboración y aplicación de cuestionario sobre la variabilidad del efecto dominó en la cadena de suministro en el sector automotriz, estancia académica en universidad externa, el análisis de sensibilidad de modelo, cuatro participaciones en congresos internacionales, un capítulo de libro publicado, un artículo JCR publicado, segundo artículo JCR en proceso, un artículo en Scopus en proceso y la aceptación de la ponencia Análisis y visualización del efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz: Modelo híbrido machine learning con dinámica de sistemas para publicarse en el libro Memorias colectivas del CILOG 2025. Además, se han impartido cinco ponencias y se han realizado tres cursos relacionados al tema de investigación.

Tabla 4.8. Resultados del DOCIA

Ponencias	Cursos	Congresos	Publicaciones
Gestión de riesgos	Diseño de cadenas de suministro	Academia Journal Celaya 2022	JCR MDPI 2025
Análisis de riesgos	Investigación y escritura de documentos científicos con inteligencia artificial	CILOG 2023	Chapter 15 Publicado Febrero 2026
Networking Talent	Inteligencia artificial	CILOG 2025	JCR en proceso
Taller de Bigdata		IWIEAT 2025	Estancia Académica en la Universidad La Rioja, España, 2023
Taller de programación en Python		Libro colectivo de CILOG 2025	Chapter CILOG 2026 En proceso

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados logrados en la formación de recurso humano correspondiente a la docencia y dirección de tesis durante algunos periodos de los últimos 4 años, enfocada a la logística

y transporte, así como el uso de la inteligencia artificial enfocada a la generación de asistentes virtuales y la aplicación del modelo de Montecarlo para generar datos aleatorios. Por lo tanto, se logró impartir clases a 220 alumnos de nivel licenciatura las asignaturas de inteligencia artificial, simulación de procesos industriales, proyecto de investigación, investigación de operaciones y estadística inferencial.

Tabla 4.9. Formación de recurso humano como docencia

Materia	Semestre	Nivel	Cantidad de alumnos
Inteligencia artificial	7	Licenciatura	80
Simulación de procesos industriales	8	Licenciatura	30
Proyecto de investigación	8	Licenciatura	60
Investigación de operaciones	5	Licenciatura	30
Estadística inferencial	5	Licenciatura	20

Y finalmente se lograron dirigir 4 estudiantes a nivel licenciatura como un logro particular en la formación recurso humano, se detallan a continuación:

1. Gustavo Alberro Molina Villegas, Observaciones de trabajo en la empresa Novares, 2022
2. José Alberto Pérez Venegas, Análisis de adquisición de unidades operativas para el área de transporte en Play Clup, 2022
3. Marco Antonio Jaramillo Magaña, Propuesta para la configuración y control de inventarios de insumos y materiales en la compañía San Juan Agrícola, 2023.
4. Héctor Luis Arriaga García, Evaluación del flujo de materiales en la línea Twist a través de la planeación logística y transporte, 2023.

REFERENCIAS

- Abbou, R., Moussaoui, C., & Loiseau, J. J. (2015). Effects of inventory control on bullwhip in logistic systems under demand and lead time uncertainties. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.092>
- Adebanjo, D., & Laosirihongthong, T. (2014). Adoption of web-based order-processing systems: Experiences from Tier-1 suppliers in the automotive supply chain. *Production Planning and Control*, 25(15), 1287–1301. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.829252>
- Albertzeth, G., Pujawan, I. N., Hilletoft, P., & Tjahjono, B. (2020). Mitigating transportation disruptions in a supply chain: a cost-effective strategy. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 23(2), 139–158. <https://doi.org/10.1080/13675567.2019.1648640>
- Amiri-Aref, M., Klibi, W., & Babai, M. Z. (2018). The multi-sourcing location inventory problem with stochastic demand. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.003>
- Ang, E., Iancu, D. A., & Swinney, R. (2017). Disruption risk and optimal sourcing in multiTier supply networks. *Management Science*, 63(8), 2397–2419. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2016.2471>
- Avelar-Sosa, L., García-Alcaraz, J. L., & Maldonado-Macías, A. A. (2019). *Evaluation of supply chain performance. Management and Industrial Engineering. Cham: Springer International Publishing* <https://doi.org/10.1007/978-3-319-93876-9>
- Babai, Z., Dai, Y., Li, Q., Syntetos, A., & Wang, X. (2021). Forecasting of lead-time demand variance: implications for safety stock calculations. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.017>
- Badakhshan, E., Humphreys, P., Maguire, L., & Mcivor, R. (2020). *Using simulation-based system dynamics and genetic algorithms to reduce the cash flow bullwhip in the supply chain*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1715505>
- Bevilacqua, M., Ciarapica, F. E., Marcucci, G., & Mazzuto, G. (2018). Conceptual model for analysing domino effect among concepts affecting supply chain resilience. *Supply Chain Forum*, 19(4), 282–299. <https://doi.org/10.1080/16258312.2018.1537504>
- Bevilacqua, Maurizio, Ciarapica, F. E., Marcucci, G., & Mazzuto, G. (2020). Fuzzy cognitive maps approach for analysing the domino effect of factors affecting supply chain resilience: a fashion

- industry case study. *International Journal of Production Research*, 58(20), 6370–6398. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680893>
- Bier, T., Lange, A., & Glock, C. H. (2020). Methods for mitigating disruptions in complex supply chain structures: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1835–1856. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1687954>
- Blome, C., & Schoenherr, T. (2011). Int . J . Production Economics Supply chain risk management in financial crises — A multiple. *Intern. Journal of Production Economics*, 134(1), 43–57. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.002>
- Bottani, E., Mordonini, M., Franchi, B., & Pellegrino, M. (2021). Demand Forecasting for an Automotive Company with Neural Network and Ensemble Classifiers Approaches. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Vol. 630 IFIP* (Issue M1). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_14
- Brintrup, A., Pak, J., Ratiney, D., Pearce, T., Wichmann, P., Woodall, P., & McFarlane, D. (2020). Supply chain data analytics for predicting supplier disruptions: a case study in complex asset manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3330–3341. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1685705>
- Bueno-Solano, A., & Cedillo-Campos, M. G. (2014). Dynamic impact on global supply chains performance of disruptions propagation produced by terrorist acts. *Transportation Research Part E*, 61, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.09.005>
- Cannella, S., Ponte, B., Dominguez, R., Framinan, J. M., Cannella, S., Ponte, B., Dominguez, R., Jose, M., & Cannella, S. (2021). Proportional order-up-to policies for closed-loop supply chains : the dynamic effects of inventory controllers effects of inventory controllers. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1867924>
- Cedillo-Campos, M. G., Sánchez-Ramírez, C., Vadali, S., Villa, J. C., & Menezes, M. B. C. (2014). Supply chain dynamics and the “cross-border effect”: The U.S.-Mexican border’s case. *Computers and Industrial Engineering*, 72(1), 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.015>
- Chauhan, V. K., Perera, S., & Brintrup, A. (2021). The relationship between nested patterns and the ripple effect in complex supply networks. *International Journal of Production Research*, 59(1), 325–341. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1831096>

- Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K., & Simchi-Levi, D. (2000). Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information. *Management Science*, 46(3), 436–443. <https://doi.org/10.1287/mnsc.46.3.436.12069>
- Chen, L., & Lee, H. L. (2015). Modeling and Measuring the Bullwhip Effect. *Working Paper*, 1–24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32441-8_1
- Demiray, A., Akay, D., Tekin, S., & Boran, F. E. (2017). A holistic and structured CPFR roadmap with an application between automotive supplier and its aftermarket customer. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91(5–8), 1567–1586. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9848-x>
- Disney, S. M., Ponte, B., & Wang, X. (2021). Exploring the nonlinear dynamics of the lost-sales order-up-to policy. *International Journal of Production Research*, 59(19), 5809–5830.
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). Ripple effect and supply chain disruption management : new trends and research directions directions. *International Journal of Production Research*, 59(1), 102–109. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1840148>
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Rozhkov, M. (2019). *Does the ripple effect influence the bullwhip effect ? An integrated analysis of structural and operational dynamics in the supply chain*. December. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1627438>
- Dolgui, A., Ivanov, D., & Sokolov, B. (2018). Ripple effect in the supply chain: an analysis and recent literature. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 414–430. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680>
- Dominguez, R., Cannella, S., Ponte, B., & Framinan, J. M. (2020). On the dynamics of closed-loop supply chains under remanufacturing lead time variability. *Omega (United Kingdom)*, 97, 102106. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102106>
- Duan, W., Ma, H., & Xu, D. S. (2021). Analysis of the impact of COVID-19 on the coupling of the material flow and capital flow in a closed-loop supply chain. *Advances in Production Engineering & Management*, 16(1), 5–22. <https://doi.org/10.14743/apem2021.1.381>
- DuHadway, S., Carnovale, S., & Hazen, B. (2019). Understanding risk management for intentional supply chain disruptions: risk detection, risk mitigation, and risk recovery. *Annals of Operations Research*, 283(1), 179–198. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2452-0>

- Duong, L. N. K., & Chong, J. (2020). Supply chain collaboration in the presence of disruptions: a literature review. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3488–3507. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1712491>
- Florian, L., & Florian, L. (2019). inventory inventory inventory inventory the Ripple Ripple Ripple Ripple. *IFAC PapersOnLine*, 52(13), 1272–1276. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.373>
- Gao, S. Y., Simchi-Levi, D., Teo, C. P., & Yan, Z. (2019). Disruption risk mitigation in supply chains: The risk exposure index revisited. *Operations Research*, 67(3), 831-852. <https://doi.org/10.1287/opre.2018.1776>
- Garvey, M. D., & Carnovale, S. (2020). The rippled newsvendor: A new inventory framework for modeling supply chain risk severity in the presence of risk propagation. *International Journal of Production Economics*, 228, 107752 <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107752>
- Ghadge, A., Dani, S., Chester, M., & Kalawsky, R. (2013). A systems approach for modelling supply chain risks. *Supply chain management: an international journal*, 18(5), 523-538. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2012-0366>
- Giannoccaro, I., & Iftikhar, A. (2020). Mitigating ripple effect in supply networks : the effect of trust and topology on resilience. *International Journal of Production Research*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1853844>
- Gu, Q., & Gao, T. (2017). Production disruption management for R/M integrated supply chain using system dynamics methodology. *International Journal of Sustainable Engineering*, 10(1), 44–57. <https://doi.org/10.1080/19397038.2016.1250838>
- He, J., Alavifard, F., Ivanov, D., & Jahani, H. (2019). A real-option approach to mitigate disruption risk in the supply chain. *Omega*, 88, 133-149. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.08.008>
- Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., & Talluri, S. (2015). Supply chain risk management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 53(16), 5031–5069. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030467>
- Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020a). *Ripple effect modelling of supplier disruption : integrated Markov chain and dynamic Bayesian network approach*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1661538>
- Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020b). Ripple effect modelling of supplier disruption:

- integrated Markov chain and dynamic Bayesian network approach. *International Journal of Production Research*, 58(11), 3284–3303. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1661538>
- Ivanov, D. (2017a). Simulation-based ripple effect modelling in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 55(7), 2083–2101. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1275873>
- Ivanov, D. (2019a). Disruption tails and revival policies: A simulation analysis of supply chain design and production-ordering systems in the recovery and post-disruption periods. *Computers and Industrial Engineering*, 127(September 2018), 558–570. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.043>
- Ivanov, D. (2019b). *Ripple Effect in the Supply Chain : Definitions , Frameworks and Future Ripple Effect in the Supply Chain : Definitions , Frameworks and Future Research Perspectives* (Issue January). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-14302-2>
- Ivanov, D. (2020). Predicting the impacts of epidemic outbreaks on global supply chains: A simulation-based analysis on the coronavirus outbreak (COVID-19/SARS-CoV-2) case. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 136, 101922.. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.101922>
- Ivanov, D. (2018). *Structural dynamics and resilience in supply chain risk management* (Vol. 265). Berlin, Germany: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69305-7>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2021). OR-methods for coping with the ripple effect in supply chains during COVID-19 pandemic: Managerial insights and research implications. *International journal of production economics*, 232, 107921. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107921>
- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Low-Certainty-Need (LCN) supply chains: a new perspective in managing disruption risks and resilience. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 5119–5136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1521025>
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2018). Scheduling of recovery actions in the supply chain with resilience analysis considerations. *International Journal of Production Research*, 56(19), 6473–6490. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1401747>
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2019). *The impact of digital technology and Industry 4 . 0 on the ripple effect and supply chain risk analytics.* 7543. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1488086>
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., & Ivanova, M. (2017). Literature review on disruption recovery in

- the supply chain*. *International Journal of Production Research*, 55(20), 6158–6174. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1330572>
- Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Ivanova, M., Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Ivanova, M., & Review, L. (2018). *Chain To cite this version : HAL Id : hal-01522118 Literature Review on Disruption Recovery in the Supply Chain*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1330572>
- Ivanov, D., Hartl, R., Dolgui, A., Pavlov, A., & Sokolov, B. (2015). Integration of aggregate distribution and dynamic transportation planning in a supply chain with capacity disruptions and the ripple effect consideration. *International Journal of Production Research*, 53(23), 6963–6979. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.986303>
- Ivanov, D., Pavlov, A., Pavlov, D., & Sokolov, B. (2017). Int . J . Production Economics Minimization of disruption-related return fl ows in the supply chain. *Intern. Journal of Production Economics*, 183, 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.03.012>
- Ivanov, D., Pavlov, A., & Sokolov, B. (2014). Optimal distribution (re) planning in a centralized multi-stage supply network under conditions of the ripple effect and structure dynamics. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 758–770. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.023>
- Ivanov, D., Sokolov, B., & Dolgui, A. (2014). The Ripple effect in supply chains: Trade-off “efficiency-flexibility- resilience” in disruption management. *International Journal of Production Research*, 52(7), 2154–2172. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.858836>
- Ivanov, D., Sokolov, B., Solovyeva, I., Dolgui, A., & Jie, F. (2016a). Dynamic recovery policies for time-critical supply chains under conditions of ripple effect. *International Journal of Production Research*, 54(23), 7245–7258. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1161253>
- Ivanov, D., Sokolov, B., Solovyeva, I., Dolgui, A., & Jie, F. (2016b). Dynamic recovery policies for time-critical supply chains under conditions of ripple effect. *International Journal of Production Research*, 54(23), 7245–7258. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1161253>
- Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., Schönberger, J. (2025). Inventory Management. In: Global Supply Chain and Operations Management. Springer Texts in Business and Economics. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95859-5_13
- Jahani, H., Abbasi, B., Hosseinifard, Z., Fadaki, M., & Minas, J. P. (2021). Disruption risk management in service-level agreements. *International Journal of Production Research*, 59(1), 226–244.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1748248>

- Khan, M. H., Ahmed, S., & Hussain, D. (2019). Analysis of Bullwhip effect : A Behavioral Approach. *Supply Chain Forum: An International Journal*, 20(4), 310–331. <https://doi.org/10.1080/16258312.2019.1661756>
- Kim, J. D., Kim, T. H., & Han, S. W. (2023). Demand Forecasting of Spare Parts Using Artificial Intelligence: A Case Study of K-X Tanks. *Mathematics*, 11(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/math11030501>
- Kinra, A., Ivanov, D., Das, A., & Dolgui, A. (2019). *Ripple effect quantification by supplier risk exposure assessment*. October. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1675919>
- Li, S., He, Y., & Chen, L. (2017). International Journal of Production Economics Dynamic strategies for supply disruptions in production-inventory systems. *International Journal of Production Economics*, 194(April), 88–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.04.003>
- Llaguno, A., Mula, J., & Campuzano-Bolarin, F. (2022). State of the art, conceptual framework and simulation analysis of the ripple effect on supply chains. *International Journal of Production Research*, 60(6), 2044-2066. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1877842>
- Lopes, R. L., Figueira, G., Amorim, P., & Almada-Lobo, B. (2020). Cooperative coevolution of expressions for (r,Q) inventory management policies using genetic programming. *International Journal of Production Research*, 58(2), 509–525. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1597293>
- Lücker, F., Seifert, R. W., & Biçer, I. (2019). Roles of inventory and reserve capacity in mitigating supply chain disruption risk. *International Journal of Production Research*, 57(4), 1238–1249. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504173>
- Manuel, J., Landeta, I., Berenice, C., Cortés, Y., & García, G. (2016). existencias de seguridad y costo del inventario. *Contaduría y Administración*, 61(3), 499–513. <https://doi.org/10.1016/j.cya.2015.11.008>
- Manuj, I., & Mentzer, J. T. (2008). Global supply chain risk management strategies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(3), 192–223. <https://doi.org/10.1108/09600030810866986>

- Michna, Z., Disney, S. M., & Nielsen, P. (2017). *The impact of stochastic lead times on the bullwhip effect under correlated demand and moving average forecasts*. 44(0), 1–20. <http://arxiv.org/abs/1701.07638>
- Michna, Z., & Nielsen, P. (2013). The impact of lead time forecasting on the bullwhip effect. *arXiv preprint arXiv:1309.7374*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1309.7374>
- Minner, S., & Transchel, S. (2017). Order variability in perishable product supply chains. *European Journal of Operational Research*, 260(1), 93–107. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.016>
- Mishra, D., Dwivedi, Y. K., Rana, N. P., & Hassini, E. (2021). Evolution of supply chain ripple effect: a bibliometric and meta-analytic view of the constructs. *International Journal of Production Research*, 59(1), 129-147. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1668073>
- Mitra, A., Jain, A., Kishore, A., & Kumar, P. (2022). A Comparative Study of Demand Forecasting Models for a Multi-Channel Retail Company: A Novel Hybrid Machine Learning Approach. *Operations Research Forum*, 3(4), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s43069-022-00166-4>
- Nakade, K., & Aniyama, Y. (2019). ScienceDirect Bullwhip Effect of Weighted Moving Average Forecast Bullwhip Effect of Weighted Moving Average Forecast Bullwhip of Weighted Moving Average Forecast Bullwhip Effect Effect of Weighted Moving Average Forecast under Stochastic Lead Time Bullwh. *IFAC PapersOnLine*, 52(13), 1277–1282. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.374>
- Nielsen, P., & Michna, Z. (2018). The impact of stochastic lead times on the bullwhip effect—an empirical insight. *Management and production engineering review*, 9(1) 65–70. <https://doi.org/10.24425/119401>
- Olivares-Aguila, J., & ElMaraghy, W. (2021). System dynamics modelling for supply chain disruptions. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1757–1775. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1725171>
- Özçelik, G., Faruk Yılmaz, Ö., & Betül Yeni, F. (2021). Robust optimisation for ripple effect on reverse supply chain: an industrial case study. *International Journal of Production Research*, 59(1), 245–264. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1740348>
- Pérez-López, R. J., Tiznado, J. E. O., Magaña, M. M., Wilson, C. C., López Barreras, J. A., & García-Alcaraz, J. L. (2019). Information sharing with ICT in production systems and operational performance. *Sustainability (Switzerland)*, 11(13). <https://doi.org/10.3390/su11133640>

- Perez-Villanueva, P., Gasto, M., & Martinez-flores, L. (2011). *Global economic crisis and Mexican automotive suppliers: Impacts on the labor capital*. 87(790), 711–725. <https://doi.org/10.1177/0037549710393259>
- Rafiei, M., Mohammadi, M., & Torabi, S. A. (2013). Reliable multi period multi product supply chain design with facility disruption. *Decision Science Letters*, 2(2), 81–94. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2013.02.002>
- Rathore, R., Thakkar, J. J., & Jha, J. K. (2021). Impact of risks in foodgrains transportation system: a system dynamics approach. *International Journal of Production Research*, 59(6), 1814–1833. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1725683>
- Remko, V. H. (2020). Research opportunities for a more resilient post-COVID-19 supply chain—closing the gap between research findings and industry practice. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Rong, Y., Shen, Z. J. M., & Snyder, L. V. (2008). The impact of ordering behavior on order-quantity variability: A study of forward and reverse bullwhip effects. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 20(1–2), 95–124. <https://doi.org/10.1007/s10696-009-9054-3>
- Rozhkov, M., & Ivanov, D. (2018). *Contingency Production-Inventory Control Policy for Capacity Disruptions in the Retail Supply Chain With Perishable Products*. *IFAC-PapersOnLine*, 51 (11), 1448–1452. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.311>
- Sánchez-Ramírez, C., Ramos-hernández, R., Fong, J. R. M., Alor-Hernández, G., & García-alcaraz, J. L. (2020). A system dynamics model to evaluate the impact of production process disruption on order shipping. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/app10010208>
- Saputro, T. E., Figueira, G., & Almada-Lobo, B. (2020). Integrating supplier selection with inventory management under supply disruptions. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1866223>
- Sarkar, S., & Kumar, S. (2015). Int . J . Production Economics A behavioral experiment on inventory management with supply chain disruption. *Intern. Journal of Production Economics*, 169, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.07.032>
- Sawik, T. (2019). Two-period vs. multi-period model for supply chain disruption management. *International Journal of Production Research*, 57(14), 4502–4518.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1504246>

- Scheibe, K. P., & Blackhurst, J. (2018). Supply chain disruption propagation: a systemic risk and normal accident theory perspective. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 43–59. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1355123>
- Schmitt, A. J., & Singh, M. (2012). Int . J . Production Economics A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain. *Intern. Journal of Production Economics*, 139(1), 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.004>
- Schmitt, T. G., Kumar, S., Stecke, K. E., Glover, F. W., & Ehlen, M. A. (2017). Mitigating disruptions in a multi-echelon supply chain using adaptive ordering \$. *Omega*, 68, 185–198. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.07.004>
- Seyedan, M., & Mafakheri, F. (2020). Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting : methods , applications , and research opportunities. *Journal of Big Data*. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00329-2>
- Sinha, P., Kumar, S., & Prakash, S. (2020). Measuring and mitigating the effects of cost disturbance propagation in multi-echelon apparel supply chains. *European Journal of Operational Research*, 282(1), 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.015>
- Sokolov, B., Ivanov, D., Dolgui, A., & Pavlov, A. (2016). Structural quantification of the ripple effect in the supply chain. *International Journal of Production Research*, 54(1), 152–169. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1055347>
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 451–488. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- Tang, O., & Musa, S. N. (2011). Identifying risk issues and research advancements in supply chain risk management. *International journal of production economics*, 133(1), 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.06.013>
- Thomas, V. A., & Mahanty, B. (2020). Assessment of emergency sourcing strategy of a supply chain through dynamic simulation approach. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 37(1), 56–69. <https://doi.org/10.1080/21681015.2020.1729877>
- Udenio, M., Vatamidou, E., Fransoo, J. C., & Dellaert, N. (2017). Behavioral causes of the bullwhip effect: An analysis using linear control theory. *IIEE Transactions*, 49(10), 980–1000.

<https://doi.org/10.1080/24725854.2017.1325026>

- Wang, D., Tang, O., & Zhang, L. (2014). A periodic review lot sizing problem with random yields, disruptions and inventory capacity. *International Journal of Production Economics*, 155, 330–339. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.007>
- Wang, X., & Disney, S. M. (2017). Mitigating variance amplification under stochastic lead-time: The proportional control approach. *European Journal of Operational Research*, 256(1), 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.010>
- Wu, T., Blackhurst, J., & Chidambaram, V. (2006). A model for inbound supply risk analysis. *Computers in industry*, 57(4), 350-365. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.11.001>
- Yang, F., Zhang, B., & Su, Z. (2013). Analysis and verification of bullwhip effect based on system dynamics. *Applied Mechanics and Materials*, 340, 312–319. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.340.312>
- Zhang, J., Chen, X., & Fang, C. (2018). Transmission of a supplier's disruption risk along the supply chain: a further investigation of the Chinese automotive industry. *Production Planning and Control*, 29(9), 773–789. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1470268>

ANEXO 1



Entrevista personal con respecto al efecto dominó en la cadena de suministro del sector automotriz

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Su participación en la entrevista es completamente voluntaria, anónima y confidencial. Doy mi consentimiento para participar en la entrevista y autorizo que la información se utilice con fines académicos.

Instrucciones: El objetivo de esta entrevista es recolectar información verídica y confiable con respecto a la demanda, el inventario de seguridad, el tiempo de entrega desde el proveedor hasta el cliente que utilizan las empresas del sector automotriz.

- a) La entrevista consiste en preguntas abiertas a los entrevistados, mismas que le tomarán 15 minutos en responder.

Iniciamos

1. ¿Cuál es la demanda promedio de su producto terminado en los próximos 6 meses o más?

2. ¿Cuál es su inventario inicial para arrancar la línea de producción?

3. ¿Cuál es el tiempo de entrega promedio de parte de sus proveedores principales?

4. ¿Cuánto tiempo de anticipación sus clientes les envían el pronóstico de la demanda?

5. ¿Cuál es su tiempo de entrega promedio de envíos de pedidos desde que se embarca hasta que llega a sus clientes?

6. ¿Cuántos componentes o números de parte manejan?

7. ¿Cómo les impacta la escasez de materiales en la línea de producción?

8. ¿Qué influye en el retraso de materiales a la línea de producción?

9. ¿Cuánto tiempo se retrasa el material en llegar a la planta?

10. ¿Cuál es el costo promedio por componente por mantenerlo almacenado?

11. ¿Cuál es el costo estima de preparación del pedido?

12. ¿Cuál es el porcentaje de cumplimiento de sus proveedores a partir de la pandemia?

13. ¿Cuántos días de inventario deben tener en planta para no quedarse sin material hasta que llega el nuevo pedido?

14. ¿Qué porcentaje de satisfacción del cliente tienen a pesar de la pandemia?

15. ¿Cuál es el costo promedio de penalización que sus clientes establecen por retraso de pedidos, o incumplimiento?

16. ¿Cuántos pedidos u ordines atrasadas han tenido en 6 meses?
