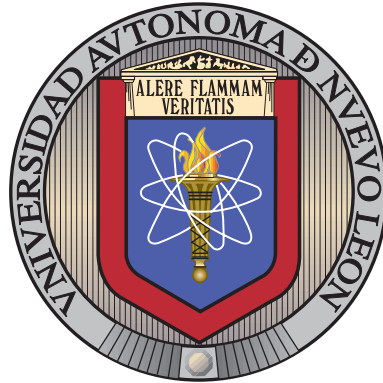


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ATRASAMIENTO DE FORMA Y TIEMPO EN LA
RED DE DISTRIBUCIÓN

POR

CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ GÓMEZ

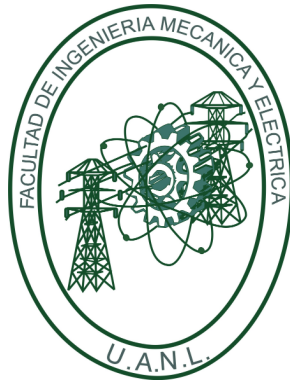
COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ATRASAMIENTO DE FORMA Y TIEMPO EN LA
RED DE DISTRIBUCIÓN

POR

CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ GÓMEZ

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO

MAYO 2021



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Atrasamiento de forma y tiempo en la red de distribución», realizada por el alumno Carlos Gustavo Martínez Gómez, con número de matrícula 1985810, sea aceptada para su defensa para obtener el grado de Maestría en Logística y Cadena de Suministro.

El Comité de Tesis

Dr. Rodolfo Garza Morales

Asesor

Dr. Miguel Mata Pérez

Revisor

Dr. Luis Alfonso Infante Rivera

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado



158

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2021



A mis Padres; Carlos y Patricia por su apoyo incondicional

*A mis Hermanas; Karla y Mariana por demostrar que siempre puedo contar con
ellas*

A mi Tía Lupita por su ayuda y consejos sinceros

A Holy Quintet y Starlight Kukugumi por ser una luz en esta agradable pesadilla

*"Si alguien comete un error, enséñale con benevolencia y muéstrele su error. Y si
no puedes, incúlpace a ti mismo, o ni siquiera te inculpes".*

Marco Aurelio, "Meditaciones", X, 4.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	x
Resumen	xi
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	1
1.1.1. Preguntas de investigación	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivo	4
1.4. Hipótesis	4
2. Análisis de Literatura	6
2.1. Definición de la estrategia de atrasamiento	6
2.1.1. Punto de desacoplamiento	7
2.2. Orígenes de la estrategia de atrasamiento	8
2.3. Estrategias de atrasamiento	11
2.4. Atrasamiento de forma	15

2.5. Investigaciones acerca de la estrategia de atrasamiento en la cadena de suministro	16
2.5.1. Métodos cuantitativos	16
2.5.2. Métodos cualitativos	19
3. Metodología	22
3.1. Desarrollo del modelo	23
3.1.1. Análisis de flujo de materiales y costos en la red de distribución	23
3.1.2. Definición de variables	24
3.1.3. Modelo	25
3.2. Generación de instancias	39
3.3. Resultados	41
4. Resultados	42
4.1. Generación de datos	42
4.2. Supuestos de las instancias	43
4.3. Resultados	44
4.3.1. Comportamiento de los costos	53
5. Conclusiones	54
5.1. Trabajo a futuro	55

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Red de Distribución.	3
2.1. Posición de los puntos de desacoplamiento de acuerdo al ambiente de producción Olhager (2003).	8
2.2. Umbral de uso del atrasamiento en la cadena de suministro Rietze (2006).	12
2.3. Ilustración de estrategia especulación total Pagh y Cooper (1998). . .	12
2.4. Ilustración de estrategia Atrasamiento Manufacturera Pagh y Cooper (1998).	13
2.5. Ilustración de estrategia Atrasamiento Logístico Pagh y Cooper (1998).	14
2.6. Ilustración de estrategia Atrasamiento total Pagh y Cooper (1998). .	14
4.1. Instancia PG3 PD5 C.	47
4.2. Comportamiento de inventario de instancia PG3 PD5 C.	48
4.3. Instancia PG3 PD3 M.	49
4.4. Comportamiento de inventario de instancia PG3 PD5 M.	50
4.5. Instancia PG3 PD3 G.	51

4.6. Comportamiento de inventario de instancia PG3 PD5 G. 52

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Usos potenciales del atrasamiento.	10
2.2. Estrategias de atrasamiento.	11
2.3. Estudios cuantitativos de estrategias de atrasamiento.	21
3.1. Costos presentes en los modelos.	23
3.2. Costos a considerar para el modelo.	24
3.3. Posibles variables a considerar en nuestro modelo.	24
3.4. Tamaño de red de distribución.	39
3.5. Combinación de productos.	40
3.6. Instancias propuestas.	40
4.1. Variación de costos de transformación.	43
4.2. Utilidad máxima de las instancias resueltas.	45
4.3. Resultados de las instancias.	46
4.4. Tabla de costos de inventarios.	53

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores de la maestría por compartirme sus valiosos conocimientos.

A mi tutor Dr. Rodolfo Garza Morales, por todo su tiempo, paciencia y dedicación durante el tiempo de desarrollo de este trabajo.

Al Comité de tesis formado por el Dr. Miguel Mata Pérez y Al Dr. Luis Alfonso Infante Rivera encargados de evaluar y corregir este trabajo

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Autónoma de Nuevo León por permitirme ser parte de ellos.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.

RESUMEN

Carlos Gustavo Martínez Gómez.

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

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: ATRASAMIENTO DE FORMA Y TIEMPO EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.

Número de páginas: 61.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: En la presente investigación se estudia el problema de atrasar lo más posible la configuración final de una gama de productos, en particular se estudia el caso en que la configuración final del producto se realiza en el área de distribución. En otras palabras, con el objetivo de incrementar el margen de contribución total y aumentar el nivel de servicio al cliente, la transformación de un producto “genérico” en uno terminado se realiza en el área de distribución ya sea cuando se conoce la demanda o bien cerca de los clientes.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La literatura en general muestra muy pocos modelos de optimización para establecer estrategias de atrasamiento, sobre todo en una red de distribución de varios niveles y en un ambiente multiperíodo, la mayoría de los trabajos son cualitativos y hay muy pocos con un enfoque cuantitativo y muchos menos usando modelos de optimización. En este trabajo introducimos un modelo

general que puede ser usado para soportar decisiones estratégicas u operativas, considerando una gama muy amplia en las características que pueden incluirse en la toma de decisiones estratégicas o en la administración de las operaciones. El modelo desarrollado mostró un tiempo de solución muy aceptable para problemas muy grandes, del orden de 256,000 variables enteras y 64,000 restricciones, resolviéndose en el orden de 24 minutos, lo cual es muy aceptable en la inmensa mayoría de los ambientes operativos. Los casos que se resolvieron mostraron incrementos en el margen de contribución de alrededor de casi 30 %, comprobándose la factibilidad y el beneficio de utilizar este modelo de atrasamiento. .

Firma del asesor: _____



Dr. Rodolfo Garza Morales

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El concepto de atrasamiento propuesto por Alderson (2006) puede ser entendido como el cambio de forma, identidad y localización al último punto posible durante el proceso de producción o distribución. Posteriormente fue expandido por Bucklin (1965) que hizo una distinción entre atrasamiento y especulación; atrasamiento consiste en retrasar intencionalmente las actividades que agregan valor al producto hasta que la orden del cliente es recibida, mientras que la especulación se refiere, agregar el valor antes que la orden del cliente sea recibida. La lógica detrás del atrasamiento es retrasar la actividad lleva más disponibilidad de información y además el reducen o eliminan el riesgo y la incertidumbre de esas actividades (Yang *et al.*, 2004).

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente el mercado gira en torno a la velocidad, ya sea de fabricación, distribución, envío o entrega al cliente final. Para seguir las tendencias del mercado y ofrecer productos con alto nivel de personalización, pero sin elevar demasiado los costos, los productores deben incluir opciones y hacer los cambios de diferenciación del producto cerca del tiempo y lugar de compra por parte del cliente final.

El uso del atrasamiento en la cadena de suministro es una decisión estratégica que bien implementada permite ganar agilidad. Se han desarrollado modelos y marcos de acción para su implementación a lo largo de la cadena de suministro, tomando en cuenta la incertidumbre de la demanda, costos de inventarios y la proliferación de variedad de los productos. No obstante no se sabe cuál es el lugar y el momento oportuno para realizar la diferenciación del producto para satisfacer la demanda.

Para resolver lo anterior en este trabajo de investigación se considera una red de distribución compuesta por cuatro etapas:

1. Fábricas
2. Centros de distribución (CD)
3. Almacenes regionales (DL)
4. Zonas de clientes (ZC)

Esto se muestra en la Figura 1.1, en la que los productos se transportan en contenedores retornables y se estiban sin diferenciar. Es importante destacar que esto no resta generalidad ya que, si no se usan contenedores desechables para mover el producto no diferenciado, se puede poner costo cero a todo lo relacionado a éstos, para diferenciarlos se utilizará inventario de partes diferenciadoras, en el problema se considera un costo fijo de instalación y costo variable, finalmente se considera también el costo de transporte tanto fijo, como sería el caso de que se tuviera que comprar una flotilla de transporte, y su costo variable y los productos pasarán por una línea de proceso de diferenciación para su posterior embarque.

Con las consideraciones anteriores de costo se puede utilizar para propósitos estratégicos en el diseño de la red y propósitos operativos, ente último caso, se podrían costo cero a lo ya implementado y un costo grande a lo que no se está usando.

Con base en los planteamientos anteriores, se formulan las siguientes preguntas:

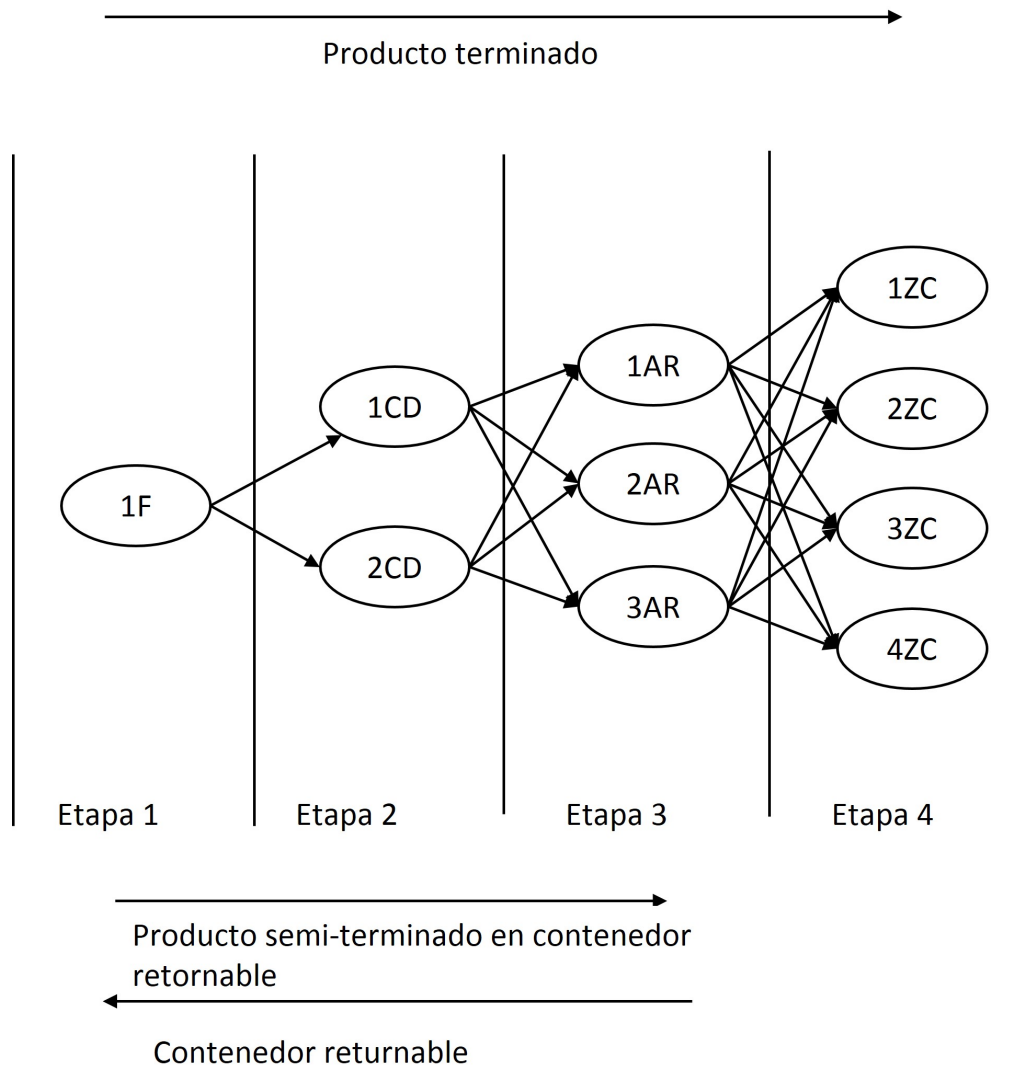


Figura 1.1: Red de Distribución.

1.1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Qué características y variables debe tener un modelo para la optimización de atrasamiento en la red de distribución con contenedores retornables?

¿En qué parte de la red de la distribución se tiene que diferenciar el producto para optimizar costos?

1.2 JUSTIFICACIÓN

Con esta investigación, se busca el desarrollo de un modelo matemático para la optimización de costos de la diferenciación del producto en una red de distribución. Saber que procesos para diferenciar el producto se pueden ejecutar en la red de distribución y en que fases/etapas de la red con costos óptimos.

Este modelo puede ser utilizado en cualquier cadena de suministro que tenga implementado la estrategia de diferenciación de producto en su red de distribución, o busque la implementación de esta estrategia.

Es conocido que una demanda agregada requiere un menor colchón de seguridad que si sumáramos los colchones de seguridad de los productos individuales, por lo tanto si el costo del producto base es lo suficientemente grande con respecto con el costo de tener inventario distribuido de partes diferenciadoras y el proceso de diferenciación que ocurra cuando la demanda sea conocida, o muy cerca del tiempo que se conocerá esta demanda, entonces tendremos ahorro sustanciales.

1.3 OBJETIVO

Apoyar la toma de decisiones para el manejo del producto terminado o semiterminado ante un ambiente de demanda incierta para lograr incrementar la rentabilidad de la operación cumpliendo con las necesidades de entrega de producto.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible incrementar la rentabilidad de una empresa a través de una estrategia de atraso en la diferenciación de producto aprovechando la red de distribución y apoyándose en un modelo de optimización para la toma de decisiones.

En este trabajo se presenta un modelo de optimización desarrollado para la toma de decisiones a nivel estratégico y táctico con estrategias de atrasamiento de forma y tiempo con el uso de contenedores retornables. Concluyendo que el tamaño de la red es un factor importante para considerar el uso de una estrategia de atrasamiento. En los siguientes capítulos se presentan, el análisis de literatura, su metodología, resultados y conclusiones.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE LITERATURA

2.1 DEFINICIÓN DE LA ESTRATEGIA DE ATRASAMIENTO

En la administración de la cadena de suministro, el uso del atrasamiento consiste en postergar deliberadamente la fabricación y/o la diferenciación del producto o su distribución hasta que se recibe una pedido por parte del cliente (Cheng *et al.*, 2010; Van Hoek, 2001).

Dado que es benéfico postergar la diferenciación incorporando las características y especificaciones del producto o su distribución, lo más tarde posible para evitar errores entre las órdenes de venta e inventario disponible, de acuerdo con Rietze (2006) se puede evitar el transporte entre fábricas y almacenes al enviar productos directamente al cliente en lugar de mantenerlos en stock (Van Hoek, 2001).

La estrategia del atrasamiento ha demostrado que puede ofrecer una amplia variedad de productos sin tener altos costos operativos, de acuerdo a Wong *et al.* (2011) se logra con la correcta integración de:

1. La estructura de producto.

2. El proceso de fabricación.
3. La alineación de la cadena de suministro.

Con esto se puede ofrecer una variedad de productos de una manera más eficiente y con un costo más efectivo lo cual resulta en una reducción del costo promedio total (Lee y Tang, 1997; Li *et al.*, 2007).

Aviv y Federgruen (2001) han mostrado que el atraso funciona como estrategia para la gestión de los riesgos que se presentan asociados a la variedad de productos y demandas inciertas. Zinn (2019) escribe que la estrategia de atrasamiento evolucionó de ser un concepto de gestión de riesgo y costo a una poderosa herramienta para la personalización en masa. Por lo que el uso de alguna técnica de atrasamiento es indispensable para el desarrollo de una cadena de suministro ágil. (Christopher, 2000).

2.1.1 PUNTO DE DESACOPLAMIENTO

Un paso fundamental para cualquier tipo de estrategia de atrasamiento es el uso del punto de orden de penetración u *order penetration point* (OPP) en inglés, también conocido como el punto de desacoplamiento, que partir de la orden del cliente, se activa la transformación del producto de acuerdo a sus requisitos y su envío al lugar especificado en la orden del compra, en otras palabras, es el punto en donde pasamos de estar empujando el producto a jalarlo *push and pull*, (Zinn, 2019).

Esto se establece de acuerdo a los ambientes de producción como MTS (*Make to stock*), ATO (*Assemble to order*), MTO (*Make to order*) y ETO (*Engineering to order*); para cada situación, su ubicación es diferente en la cadena de suministro de acuerdo con Olhager (2003), esto se ilustra en la Figura 2.1. Es importante señalar que el punto de desacoplamiento se diferencia del punto de diferenciación

del producto, este último es el que genera que el producto obtenga características únicas, (Lee y Tang, 1997).

Mientras que el primero activa el movimiento del producto en la cadena y en algunas ocasiones el punto de desacoplamiento y de diferenciación pueden estar en la misma localización (García-Dastugue y Lambert, 2007).

Ambiente de producción	Diseño	Fabricación y adquisición	Ensamble final	Distribución
Make to stock				OPP
Assemble to order			OPP	
Make to order		OPP		
Enginner to order	OPP			

Figura 2.1: Posición de los puntos de desacoplamiento de acuerdo al ambiente de producción Olhager (2003).

2.2 ORÍGENES DE LA ESTRATEGIA DE ATRASAMIENTO

El concepto de atrasamiento propuesto por Alderson (2006) puede ser entendido como el cambio de forma, identidad y localización al último punto posible durante el proceso de producción o distribución. Después fue expandido por Bucklin (1965) quien hizo una distinción entre aplazamiento y especulación. Para Waller *et al.* (2000) el atrasamiento se define como el retraso de las actividades que agregan valor al producto hasta que una orden del cliente es recibida. Y la especulación es lo contrario, hacer las actividades que agregan valor al producto antes de recibir una orden de cliente. La lógica detrás del atrasamiento es que al posponer una actividad en específico con lleva más disponibilidad, más información de la demanda. Además el riesgo y la incertidumbre de esas actividades pueden ser reducidas o incluso eliminadas (Yang *et al.*, 2004).

Después de 1965, poco fue escrito acerca del atrasamiento hasta Zinn y Bowersox (1988) presentaron un marco de trabajo donde sugieren las condiciones

para la conveniencia en el que el uso del atrasamiento está justificado. Las condiciones más importantes son:

1. Por alto valor del producto.
2. Altas fluctuaciones de la demanda.
3. La empresa cuenta con un gran número de centros de distribución (gran número de stocks de seguridad).
4. Se ofrecen diferentes versiones del producto.

El atrasamiento puede ser dividido en cinco tipos, cuatro relacionados a la alteración del producto, (etiquetado, empaque, ensamble y manufactura) y el quinto relacionado al tiempo como se muestra en la Tabla 2.1. En donde se establecen las condiciones en las que se puede usar y los tipos de atrasamiento descritos por (Zinn y Bowersox, 1988).

En 1998 se introdujo el concepto de “Vainilla boxes” que es el inventario de producto semiterminado que puede ser usado en diferentes productos terminados, este concepto fue introducido en un modelo desarrollado para su implementación en la industria computacional por parte de (Swaminathan y Tayur, 1998).

La aplicación de la estrategia de atrasamiento afecta la estructura de la cadena de suministro, Yang *et al.* (2004) ampliaron su alcance al definir dónde y cuándo es mejor aplicarlo. Se han propuesto diversas estrategias, como las presentadas por los autores, incluido el atrasamiento del desarrollo de producto y atrasamiento de compra de la materia prima, al de producción y Logístico. García-Dastugue y Lambert (2007) enfatizan que el atrasamiento no debería ser implementado sin considerar el impacto de otros miembros de la cadena de suministro.

Uso Potencial del atrasamiento	
Tipo	Uso
Etiqueta	Mismo producto de diferente marcas Alto Valor de producto Altas Fluctaciones de venta del producto
Empaque	Variedad en el tamaño del empaque Alto Valor del producto Altas fluctuaciones de venta del producto
Ensamblaje	Venta del producto en diferentes versiones Alto volumen incurrido por el empaque Alto valor del producto Altas fluctuaciones de venta del producto
Manufacturera	Alta proporción de materia ubicua Alto valor de producto Altas fluctuaciones de venta del producto
Tiempo	Alto valor de producto Un gran número de centros de distribución

Tabla 2.1: Usos potenciales del atrasamiento.

2.3 ESTRATEGIAS DE ATRASAMIENTO

El concepto de atrasamiento puede tener una menor o mayor participación en las operaciones de la cadena de suministro (Van Hoek, 2001), dividiéndose en dos grupos: de tiempo y de forma; la última se puede dividir en los tipos mostrados en la Tabla 2.2.

Tipos de Estrategias de atrasamiento	
Forma	Manufactura
	Empaque
	Etiqueta
	Ensamble
Tiempo	Logístico
	Inter-organizacional basado en tiempo
	Adquisición
	Precio

Tabla 2.2: Estrategias de atrasamiento.

Pueden existir más tipos de estrategias de atrasamiento de acuerdo a su lugar de implementación, por qué su umbral de oportunidad de uso en la cadena de suministro es amplia como lo ilustra Rietze (2006) en la Figura 2.2. Para Swaminathan y Lee (2003) los tipos de estrategias de atrasamiento tienen diferentes costos y beneficios asociados a estos. Sin olvidar que cada una tiene la función de mitigar la variación del desempeño de las operaciones bajo condiciones específicas (Forza *et al.*, 2008).

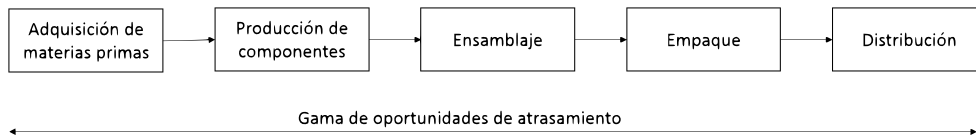


Figura 2.2: Umbral de uso del atrasamiento en la cadena de suministro Rietze (2006).

Pagh y Cooper (1998) combinaron los principios de especulación y atrasamiento en una matriz 2x2. Usando como ejes el atrasamiento y especulación. Con esto, describieron 4 estrategias genéricas, que son las siguientes;

1. La estrategia de especulación total; Todas las actividades se realizan antes de recibir la orden del cliente, que se ilustra en la Figura 2.3 Esta estrategia es la más utilizada en la mayoría de las industrias en su proceso de producción, el nivel de la personalización es nulo y la producción se basa en pronósticos y no en ordenes de clientes.

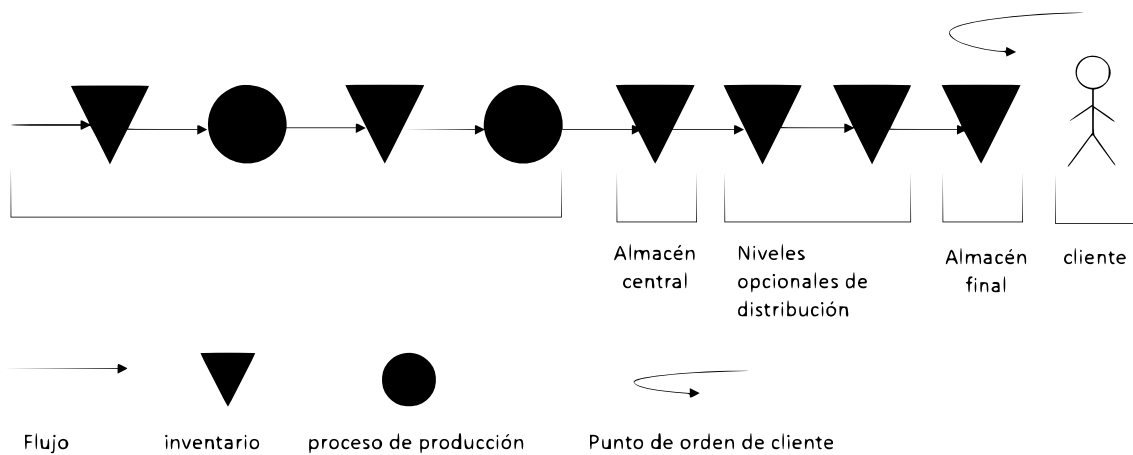


Figura 2.3: Ilustración de estrategia especulación total Pagh y Cooper (1998).

2. La estrategia de atrasamiento de manufactura se hace algunos cambios a nivel de la forma del producto, como un ensamblaje final, empaquetado o etiquetado. Teniendo el producto a un nivel genérico y siendo personalizado después de recibir la orden del cliente (Pagh y Cooper, 1998; Zinn y Bowersox, 1988; Lee y Tang, 1997; Van Hoek, 2001).

Esto genera un ahorro en los costos de mantener inventario, ya que el costo de mantener inventario de un producto semiterminado o de la materia prima es menor que el de un producto terminado ya que se cuenta con menor valor integrado (Waller *et al.*, 2000). Dicha estrategia se ilustra en la Figura 2.4.

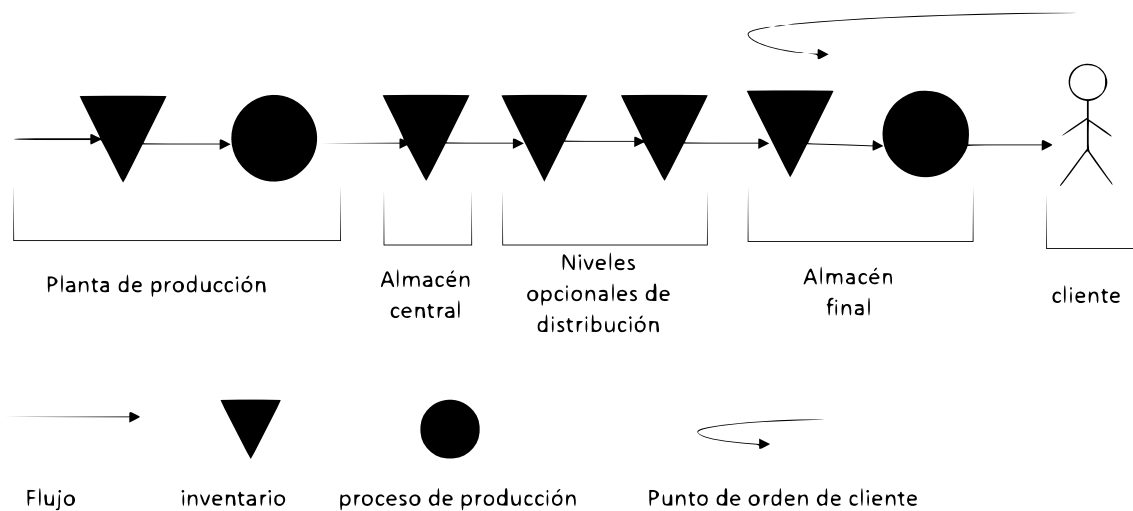


Figura 2.4: Ilustración de estrategia Atrasamiento Manufacturera Pagh y Cooper (1998).

3. La estrategia de atrasamiento logístico es cuando la orden de compra activa el movimiento del producto en la cadena de suministro. Teniendo el producto en un inventario centralizado para los minoristas o clientes finales Pagh y Cooper (1998). En la Figura 2.5 muestra que el punto de desacoplamiento se establece en un almacén centralizado con el producto listo para la entrega al cliente o tienda minorista.

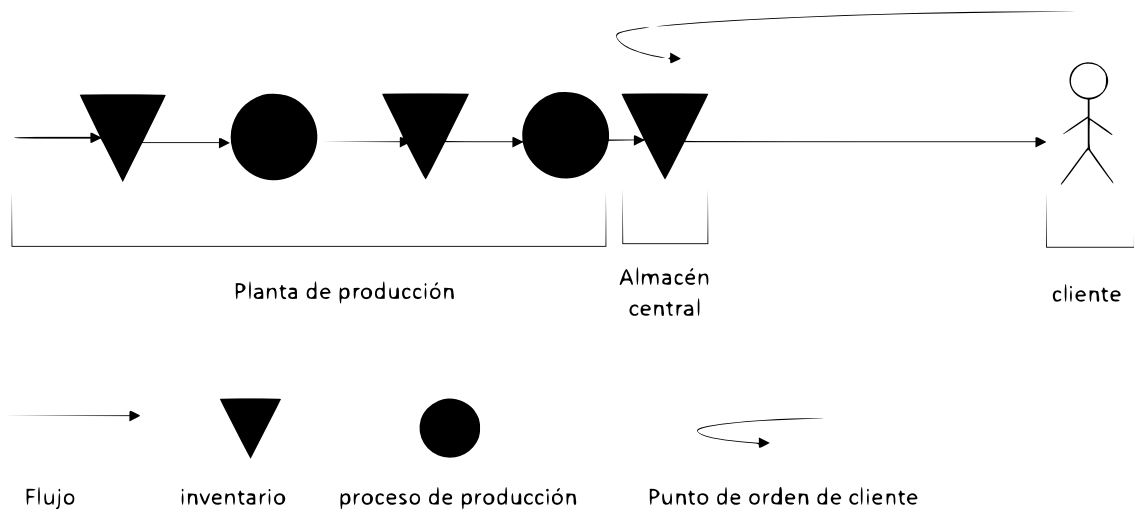


Figura 2.5: Ilustración de estrategia Atrasamiento Logístico Pagh y Cooper (1998).

4. La estrategia de atrasamiento total representa el nivel máximo en que se puede implementar el atrasamiento en una cadena de suministro. Las actividades diferenciadoras y logísticas son realizadas una vez que el cliente ha colocado su pedido. Los resultados de dicha estrategia como se menciona antes es el bajo nivel de inventario en producción y distribución, como se puede ver ilustrado en la Figura 2.6.

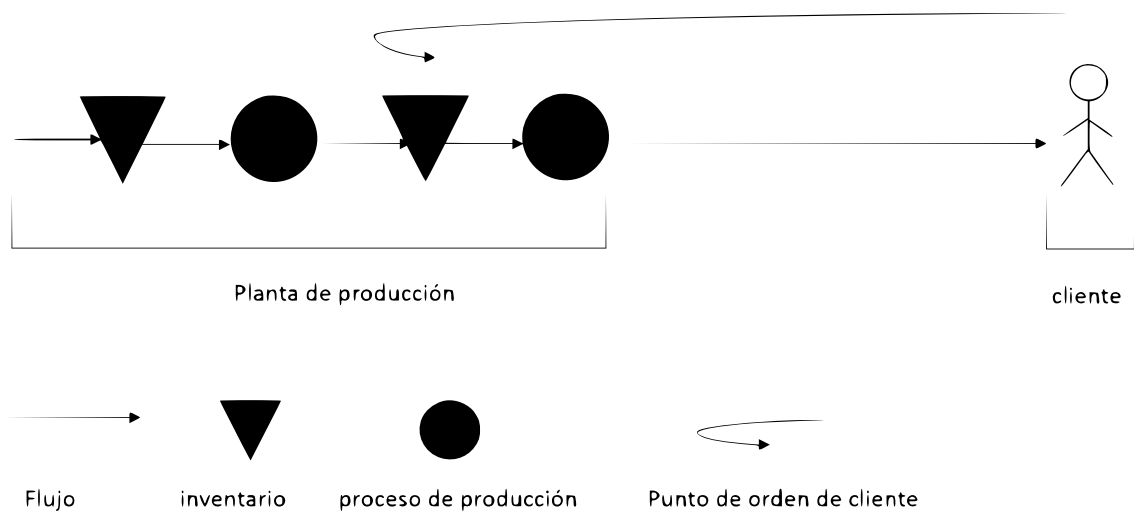


Figura 2.6: Ilustración de estrategia Atrasamiento total Pagh y Cooper (1998).

2.4 ATRASAMIENTO DE FORMA

La estrategia de atrasamiento de forma se asocia con el objetivo de poder contar con el equilibrio que se presenta en la variedad de productos ofrecidos y el rendimiento de las operaciones Zinn y Bowersox (1988); Lee y Tang (1997); Van Hoek (2001). Uno de los principios de la estrategia de atrasamiento de forma consiste en retener el producto en su forma genérica, lo más tardío posible en la cadena de suministro, esto permite a las compañías separar el valor agregado que se incorpora en el producto genérico en su etapa de manufactura de aquel que se agrega en la red de distribución.

Los autores, Hsuan Mikkola y Skjøtt-Larsen (2004) publicaron que los requisitos del producto por parte de los clientes tienen que ser incorporados de forma rápida y precisa. Aunque se entiendan los beneficios del atrasamiento, muchos participantes de la industria regularmente encuentran muy costosa su aplicación y uso por los cambios que tienen que hacer a sus procesos o al diseño de sus productos (Tang, 2011).

Lo anterior para Swaminathan y Lee (2003) es uno de los principales obstáculos para la implementación de estas estrategias en las actividades de la cadena de suministro. Algunas veces se pueden presentar los efectos contrarios al desempeño de las operaciones, de acuerdo con el tipo de atrasamiento de forma que se está usando. Por lo mismo Forza *et al.* (2008) consideran que las estrategias de atrasamiento tienen que ser adecuadas a las operaciones. Una combinación adecuada puede incrementar la flexibilidad y disminuir el tiempo de respuesta a la demanda de los clientes (Shao y Ji, 2008).

Para la diferenciación de productos Lee y Tang (1997) formularon tres maneras de hacerla:

1. Estandarización: se refiere al uso común de partes o procesos.
2. Diseño modular: consiste en dividir el producto en subcomponentes que pueden ser fácilmente ensamblados.
3. Reestructura de procesos: realizar primeros los procesos que comparten una familia de productos antes de su personalización.

2.5 INVESTIGACIONES ACERCA DE LA ESTRATEGIA DE ATRASAMIENTO EN LA CADENA DE SUMINISTRO

2.5.1 MÉTODOS CUANTITATIVOS

Los trabajos de programación matemática que desarrollan el uso de métodos cuantitativos para la optimización o implementación, con el atrasamiento de tiempo y de forma en la red de distribución son escasos, aunque la estrategia más investigada en la literatura fue atrasamiento de forma, seguido por el atrasamiento de empaquetado, logístico y etiquetado resumido en la Tabla 2.3, la cual hace una relación de los autores y la estrategia de atrasamiento que investigaron de forma cuantitativa.

Graman (2010) utilizó un modelo de costo, *order to up cost*, creó un modelo de programación no lineal de un periodo, con dos productos, para limitar los niveles de productos terminados y la capacidad de atrasamiento. Concluyó que se puede minimizar el costo total al usar variables como el nivel de inventario de productos terminados y la capacidad de atrasamiento. Cholette (2009) presentó un modelo de

programación lineal estocástico de dos etapas que maximiza la ganancia al hacer la diferenciación en la red de distribución del producto usando la estrategia de atrasamiento de empaquetado y etiquetado.

Weskamp *et al.* (2019) formularon un modelo de programación entera mixta estocástica para la identificación de estrategias de atrasamiento en cadenas de suministro con incertidumbre de la demanda. Dicho modelo está basado en el trabajo de Guericke *et al.* (2012) que permite conocer los lugares óptimos para hacer la diferenciación del producto, su almacenamiento y ubicar los arcos de transporte más adecuados para su transportación. El objetivo de este modelo es satisfacer de manera óptima los beneficios de venta de los productos para un plan estratégico y táctico.

Kuthambalayan *et al.* (2014) desarrollaron un modelo estocástico de dos niveles relacionado con los inventarios de productos semiterminados. Inventarios de componentes, costos de terceros y la demanda de los clientes.

Wang y Liu (2009) proponen un modelo multiobjetivo de atrasamiento para optimizar costos, los tipos de productos y tiempo promedio de ensamblaje, que construye una estructura óptima de atrasamiento desde el punto de vista del valor agregado e incertidumbre de la demanda.

Yu *et al.* (2018) desarrollaron modelo de optimización llamado DPDCM el cual se basa en la integración de gestión de ordenes, inventario de producto genérico y decisiones de outsourcing que es formulado como un problema de programación entera, para requerir y satisfacer los requisitos de la compañías de usar DPD en ambientes CMfg.

Hanafy y ElMaraghy (2015) propusieron un nuevo modelo de red de plataforma de diferenciación diferida de producto (DPD), que aplica redes filo-genéticas de unión media (MJPN), que se utiliza para formar plataformas de productos y determinación del diseño de la línea de ensamblaje de familias de productos modulares.

Junior *et al.* (2018) usaron una metodología que busca medir el impacto del atrasamiento en la cadena de suministro respecto a su desempeño, considerando criterios logísticos y usando una herramienta de simulación.

Simão *et al.* (2016) utilizaron una metodología que busca medir el impacto del atrasamiento de la cadena de suministro en su desempeño considerando criterios logísticos mediante una herramienta de simulación.

Appelqvist y Gubi (2005) evaluaron el beneficio del atrasamiento usando simulaciones de eventos discretos con datos extraídos de un sistema *Enterprise Resource Planning* (ERP). Identificaron las condiciones bajo las cuales el atrasamiento de manufactura es benéfico en el comercio minorista de productos electrónicos.

Zhou *et al.* (2013) desarrolló un modelo de filas de dos etapas, para modelar la cadena de suministro, la primera etapa fue para la producción de los productos semiterminados bajo la estrategia MTS y la segunda etapa consiste en personalizar el producto de acuerdo con la demanda. Mostraron que la demanda del producto genérico la política óptima atrasa el punto de desacoplamiento y mantiene altos los niveles del inventario de seguridad (*base stock*).

Yao *et al.* (2020) propusieron una configuración de cadena de suministro que se acerca a la combinación de dos aspectos estratégicos de la cadena: la cadena de suministro verde y la personalización en masa. Se propuso usar un fuzzy AHP, y a base de esto, se desarrollaron un modelo de optimización que es establecido para igualar la demanda con la oferta. Los resultados de la simulación marcan que el resultado óptimo no solo satisface a los clientes en sus productos personalizados, sino que también en servicio y tiempo.

Wu *et al.* (2019) formularon un problema de diseño de atrasamiento dinámico o *Dynamic Postponement Design*(DPD) el cual considera una arquitectura de producto indefinida que interactúa con el diseño de atrasamiento de acuerdo con la planificación óptima de las actividades de fabricación abiertas, desarrollan un

modelo de Optimización Conjunta Jerárquica o *Hierarchical Joint Optimization* (HJO) basado en la teoría de juegos de Stackelberg.

Khakdaman *et al.* (2015) desarrollaron un modelo de optimización robusto para una firma con multiproducto considerando su capacidad para elaborar un plan operativo de mediano plazo, en ambientes MTS y MTO. Inicialmente desarrollan un modelo de programación lineal multiobjetivo determinístico en un ambiente de multiproductos y multiperíodos el cual, posteriormente, fue transformado en un marco de acción robusto de optimización de acuerdo con la metodología Lp-métrica.

Tang (2011) estudia modelos de inventario base-stock con y sin pronósticos de demanda y provee un método computacional eficaz para establecer el inventario óptimo de productos finales bajo la capacidad de atrasamiento. Li *et al.* (2007) hicieron un modelo EOQ con componentes predecibles, para evaluar el impacto de la estrategia de atrasamiento de forma para un minorista en la cadena de suministro.

Finalmente Shao y Ji (2008) analiza y comparan dos tipos de estrategias de atrasamiento aplicado a la personalización en masa. La meta es determinar la estrategia más adecuada e identificar los factores claves que influyen. Formularon un modelo de minimización de los costos con demanda agregada distribuida y Wong *et al.* (2011) quienes desarrollaron una metodología dirigida por los datos numéricos, para cuantificar los beneficios obtenidos al atrasar las actividades de empaque y etiquetado hasta que las ordenes de los minoristas es recibida.

2.5.2 MÉTODOS CUALITATIVOS

La investigación cualitativa acerca del atrasamiento es más extensa en la literatura científica; autores como Zinn y Bowersox (1988); Lee y Tang (1997); Van Hoek (2001); Pagh y Cooper (1998); Waller *et al.* (2000); Zinn (2019); Ferreira *et al.* (2015) han descrito de forma amplia las características, condiciones, implicaciones, beneficios, costos y metodología de las estrategias de atrasamiento

que ya se han citado en párrafos anteriores.

Ernst y Kamrad (2000) desarrollaron un marco de acción conceptual para evaluar las diferentes cadenas de suministro en el contexto de modulación y atrasamiento. Introduce una taxonomía y desarrollan un marco correspondiente para la caracterización de cuatro estructuras de la cadena de suministro, diseñadas de acuerdo con los niveles combinados de modularización y aplazamiento: rígido, aplazado, modularizado y flexible. Brun y Zorzini (2009) investigaron la relación entre el atrasamiento y la modulación en las prácticas de las empresas italianas. Su principal aporte fue la identificación de dos principales factores (producto/proceso de personalización y producto/complejidad de proceso) y cuatro estrategias de diferenciación fueron analizadas (rígidas, flexibles, atrasamiento y modular). Tres principales categorías fueron identificadas que pueden generar algunas excepciones a los enfoques anteriores: problemas de tiempo de entrega, obligaciones contractuales y factores relacionados al proceso.

Forza *et al.* (2008) definen tres tipos de atrasamiento: de forma, de forma exclusiva y de forma exhaustiva. Estos los incorporan al nivel de análisis y demuestran que sus efectos de reflejan en varios niveles de profundidad en la distribución

Con este análisis de literatura se sentaron las bases para la investigación, se consideró tomar en cuenta aspectos teóricos acerca de las estrategias de aplazamiento estudiadas por diversos autores, para el desarrollo de una herramienta cuantitativa en forma de un modelo de optimización de programación lineal entera mixta, para ayudar en la toma decisiones a nivel estratégico y operacional, con atrasamiento de producto en una red de distribución con partes diferenciadoras y el uso de contenedores retornables, se encontraron trabajos que presentan modelos matemáticos para la optimización de alguna estrategia de atrasamiento, generalmente a nivel de fábrica y no en la red de distribución. Al momento de hacer este análisis no se encontró ningún trabajo que incorpore en la estrategia de

Estudios cuantitativos de atrasamiento					
Autores	Atrasamiento de forma	Atrasamiento logístico	Atrasamiento de empaquetado	atrasamiento de adquisición	atrasamiento de etiquetado
Graman (2010)	x				
Weskamp <i>et al.</i> (2019)	x	x			
Simão <i>et al.</i> (2016)		x			
Zhou <i>et al.</i> (2013)			x		
Junior <i>et al.</i> (2018)		x			
Mukherjee (2016)				x	
Guericke <i>et al.</i> (2012)	x	x			
Yu <i>et al.</i> (2018)	x				
Hanafy y ElMaraghy (2015)	x				
Wu <i>et al.</i> (2019)	x				
Yao <i>et al.</i> (2020)	x				
Khakdaman <i>et al.</i> (2015)	x				
Tang (2011)	x				
Ma <i>et al.</i> (2002)	x				
Li <i>et al.</i> (2007)	x				
Brun y Zorzini (2009)	x				
Shao y Ji (2008)	x				
Cholette (2009)			x		x
Kuthambalayan <i>et al.</i> (2014)	x				
Wong <i>et al.</i> (2011)			x		x
Bandaly y Hassan (2020)	x		x		
Wang y Liu (2009)	x				
Appelqvist y Gubi (2005)	x				

Tabla 2.3: Estudios cuantitativos de estrategias de atrasamiento.

atrasamiento y el uso de contenedores retornables para productos genéricos. En el siguiente capítulo se hablará de la metodología que se usará para la investigación.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología propuesta para la investigación, con una serie de consideraciones y suposiciones para desarrollar un modelo matemático de programación entera mixta como una herramienta para la toma de decisiones a nivel estratégico y táctico, considerando la posibilidad de hacer atrasamiento de forma y tiempo en la cadena de distribución.

La propuesta de esta metodología tiene como base el análisis de la literatura explicada en el capítulo 2, donde se analizan las características fundamentales de las estrategias de atrasamiento, y los métodos cuantitativos que fueron utilizados para modelar y solucionar casos de estudio en diversas industrias.

Ya con el análisis de literatura se puede desarrollar lo que será el modelo de optimización para efectuar un análisis del flujo de producto y materiales en la red de distribución, su estructura de costos y la definición de las variables.

3.1 DESARROLLO DEL MODELO

Una vez que se haya realizado el análisis de la literatura se pueden buscar y analizar las características que el modelo debe tomar en cuenta para su desarrollo.

3.1.1 ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES Y COSTOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

Primero se tiene que analizar la manera como fluye el material en la red, esto es, el producto sin transformar y el producto transformado; para esto, nos basaremos en el trabajo de Weskamp *et al.* (2019). En los trabajos estudiados en el análisis de literatura se observaron que varios costos tanto variables y fijos estaban presentes en sus modelos de optimización, con esto se reafirmó la presencia de estos costos para el uso de nuestro modelo propuesto. Como se ha comentado anteriormente la mayoría de los trabajos revisados estudiaron el atrasamiento en el nivel de fábrica y no en la cadena de distribución. En tabla 3.1 se presenta los autores que utilizan los costos variables de transformación, inventario y transporte junto a los costos fijos de estos.

Autor	Costos diferenciación	Costo de inventariar	Costo de transporte	Costo fijo de instalación	Costo fijo de inventario	transporte
Li <i>et al.</i> (2007)	X	X				
Kuthambalayan <i>et al.</i> (2014)		X				
Khakdaman <i>et al.</i> (2015)	X	X				
Graman (2010)	X	X				
Cholette (2009)	X	X				
Weskamp <i>et al.</i> (2019)	X	X	X	X	X	X
Guericke <i>et al.</i> (2012)	X	X	X	X	X	X
Mukherjee (2016)		X	X		X	X
Junior <i>et al.</i> (2018)		X	X			

Tabla 3.1: Costos presentes en los modelos.

A partir de la revisión de los trabajos se considerado los costos en la tabla 3.2 pueden incorporarse como parámetros se llegan a presentar en una red de distribución con la estrategia de atrasamiento. Estos costos solo cubren las actividades de

atrasamiento de forma y de transporte y no los costos relacionados al uso de los contenedores retornables

Posibles costos a considerar en el modelo
Costo de proceso de producto por unidad
Costo fijo de instalar actividad de diferenciación en una facilidad (centro de diferenciación o bodega)
Costo de inventario de producto por unidad y facilidad
Costo de inventario de parte diferenciadora por unidad y facilidad
Costo de establecer actividad de inventario en una facilidad
Costo de transporte de producto por unidad
Costo fijo de permitir el transporte del producto por arco

Tabla 3.2: Costos a considerar para el modelo.

3.1.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Ya con el comportamiento de los posibles flujos, se puede dar el siguiente paso que sería definir las variables que deben estar presentes en el modelo. Con esto, se hará una comparación con los trabajos encontrados en la literatura y que se muestran en la Tabla 3.3, no se comparará con todos los autores, solamente se tomarán los trabajos que presenten 3 o más variables que resulten incluidas en nuestro modelo, tampoco se considerarán trabajos muy específicos que no estén cercanamente relacionados con nuestro modelo resultante.

Autores	Posibles variables a considerar								
	Transformación de producto	Transporte del producto	Inventario de producto	costo de falta de producto	Establecer actividad diferenciadora	Establecer actividad de inventario	Establecer ruta de transporte	Inventario de partes diferenciadoras	Contenedores retonables
Weskamp <i>et al.</i> (2019)	X	X	X	X	X	X	X		
Junior <i>et al.</i> (2018)		X	X				X		
Guericke <i>et al.</i> (2012)	X	X			X	X	X		
Yao <i>et al.</i> (2020)	X		X		X	X			
Shao y Ji (2008)	X		X		X	X			
Cholette (2009)	X		X		X				
Kuthambalayan <i>et al.</i> (2014)	X		X					X	
Este trabajo	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 3.3: Posibles variables a considerar en nuestro modelo.

3.1.3 MODELO

Dentro de los autores y trabajos revisados Weskamp *et al.* (2019) tiene un modelo de atrasamiento con algunas de las características que nos interesa incluir en este estudio, sin embargo, este modelo, si bien incluye alternativas de operación de nuestro interés, no incluía otras que si eran importantes para esta investigación, en ese sentido nuestro modelo resultante podríamos decir que se inspiró en el de Weskamp *et al.* (2019) y en el trabajo de Goudenege *et al.* (2013) para aspectos de comportamiento de los contenedores retornables.

3.1.3.1 CARACTERÍSTICAS INCLUIDAS EN AMBOS MODELOS

- Atrasamiento en un ambiente multiperiodo.
- Múltiples fábricas.
- Costos fijos de:
 1. Instalar una línea de producción de actividad. diferenciadora
 2. Activar un arco de transporte.
 3. Instalar el inventario vs porteo (este último sin costo de transformación).
- Costos variables de:
 1. Transformación de producto.
 2. Inventariar el producto.
 3. Transportar el producto.

3.1.3.2 CARACTERÍSTICAS ADICIONALES DE NUESTRO MODELO

- Alimentación desde el almacén de las fábricas de producto diferenciado o sin diferenciar.
- Uso de partes diferenciadoras, incluyendo surtimiento inventario y su costo de inventariar y transportar.
- La posibilidad de que el producto genérico se suministre en contenedores retornables, incluyendo una fuente limitada, costo de transportar de regreso a fábrica, costo de inventariar en las facilidades.
- Todos los costos de transporte son por el vehículo, no como costo unitario.
- Flota heterogénea, incluyendo el número de vehículos de cada capacidad a usar y el tamaño de la flotilla (en caso de que no sean propios usamos un número grande).
- Suministro variable de producto diferenciado o no diferenciado limitado por la capacidad de producción.
- Posibilidad de definir inventario final para considerar los colchones de seguridad.

El modelo publicado por Weskamp *et al.* (2019) incluye un conjunto de procesos de diferenciación mientras que en el que se presenta en esta tesis, todas las actividades necesarias para diferenciar el producto se hacen como una sola actividad, la cual incluiría todas las actividades requeridas para llevar a cabo la diferenciación, sin embargo en nuestro caso la actividad diferenciadora puede tener un costo diferente para cada producto, por lo cual no se pierde generalidad.

Las anteriores serían las diferencias incluidas en nuestro modelo con el objeto de considerar una gama mayor de posibilidad operativas. Esto permitirá que nuestro modelo se pueda utilizar en una gama mayor de alternativas operativas.

Para el desarrollo de nuestro modelo consideraremos que se cuenta con una red de distribución dividida en cuatro niveles: las fábricas en el primer nivel; en el nivel dos, los centros de distribución o porteos (*crossdocks*), en donde no se almacena producto pero, optativamente, se puede diferenciar y enviar a las facilidades en el nivel tres o directamente a las zonas comerciales; finalmente, en el nivel tres se considerarán bodegas locales o porteos desde donde se enviará el producto a las zonas comerciales; en el último nivel, se encuentran las zonas comerciales (clientes de la empresa), en este nivel no se puede hacer ninguna actividad de diferenciación y solo puede llegar producto terminado. Las instalaciones de la red están conectadas por rutas de transporte de vehículos con una capacidad heterogénea.

De las fábricas se tiene la posibilidad de suministrar el producto genérico o ya diferenciado y los estuches (kits) de las partes diferenciadoras (partes requeridas para diferenciar los productos). Para la diferenciación de producto, el producto genérico se tiene que pasar por un proceso diferenciador en donde se utiliza un kit de partes diferenciadoras para terminar el producto. Se pueden transportar productos y kits de partes de diferenciación en un mismo arco de transporte y se pueden mezclar en el camión. Los productos genéricos se embarcan y almacenan en contenedores retornables que una vez que sean desocupados, cuando el producto ya es diferenciado, se embarcan a las fábricas en camiones, para su rehúso. El proceso de diferenciación y almacenaje se puede hacer en cualquier instalación y en cualquier nivel, excepto en el último nivel, que es de las zonas comerciales, en donde se encuentran los clientes. Cada nodo cuenta con una capacidad finita. Las actividades tienen un costo fijo de instalación y activación, en el cual se incurre una sola vez.

3.1.3.3 SUPUESTOS

- Se cuenta con un conjunto de productos en cual se incluyen subconjuntos de productos sin diferenciar y diferenciados.
- Se cuenta con un conjunto de partes diferenciadoras.

- Se cuenta con un conjunto de contenedores retornables.
- El primer nivel (fábricas) es el principio de la red y entra producto genérico o diferenciado.
- El último nivel (zona comercial) es el final de la red y a él solo puede llegar producto diferenciado.
- Cada nodo puede estar conectado con un arco. El modelo considerará un costo fijo de activación y un costo variable unitario de transporte de producto y partes diferenciadoras.
- Exceptuando el nivel final, todos los nodos en los demás niveles pueden realizar actividades de diferenciación del producto e inventariarlo a menos que el modelo decida definir la actividad como porteo, en donde se podrá diferenciar producto, pero no almacenarlo.
- En cada nodo tendremos la posibilidad de incurrir en un costo fijo de instalación y activación de la actividad de inventariar y un costo variable unitario de inventariar producto genérico y diferenciado.
- En cada nodo cuenta con un inventario inicial de producto y debe terminar con un inventario final.
- Cada nodo cuenta con un inventario inicial de producto y se debe terminar con un inventario final.
- Las partes diferenciadoras se utilizan en un producto genérico para transformarlo en dos o más productos terminados.
- Un producto genérico puede generar varios productos diferenciados al pasar por el proceso de diferenciación.

3.1.3.4 CONJUNTOS

- B Conjunto de contenedores.
- L Conjunto de kit de diferenciación.
- N Conjunto de instalaciones.
- P Conjuntos de productos.
- T Periodos.
- $PG \supseteq P$ subconjunto de productos genéricos $p \in P$.
- $TF_{lp} \in P$ subconjunto de producto diferenciado. generado al usar kit de diferenciación $l \in L$ en Producto $p \in P$.
- $PA_{pi} \in B$ subconjunto de productos $b \in B$ que pueden ser suministrados $i \in N^{Fac}$.
- $TL_p \in L$ subconjunto de kits de diferenciación que pueden ser usadas en productos $p \in P$.
- $TB_p \in B$ subconjunto de contenedores $b \in B$ asignados a productos $p \in PG$.
- $TA_{bi} \in B$ subconjunto de contenedores $b \in B$ asignados a fábrica $i \in N^{Fac}$.
- $N = N^{Fac} \cup N^I \cup N^C$ Conjuntos de todos los nodos investigados.
- $N^{Fac} \in N$ Subconjunto de todas las localizaciones que pertenecen al primer nivel (fábricas).
- $N^I \in N$ Subconjunto de todas las localizaciones que no pertenecen al primer nivel ni el ultimo nivel.
- $N^C \in N$ Subconjunto de todas las localizaciones que pertenecen al último nivel.

- $A \in NxN$ Conjunto de todos los arcos de transporte.

3.1.3.5 VARIABLES

Z_{pijt} Cantidad de productos $p \in P$ enviado por el arco $(i, j) \in A$ donde el envío empieza en el periodo $t \in (1...T)$.

$Z1_{lijt}$ Cantidad de partes diferenciadoras $l \in L$ enviado por el arco $(i, j) \in A$ donde el envío empieza en el periodo $t \in (1...T)$.

$Z2_{bjt}$ Cantidad de contenedores $b \in B$ enviado por el arco $(i, j) \in A$ donde el envío empieza en el periodo $t \in (1...T)$.

$X_{pp'bilt}$ Cantidad de producto $p \in P$ transformado en producto $p' \in P$ transportado en contenedor $b \in B$ en la instalación $i \in N/N^c$ usando kit de diferenciación $l \in TL_p$ en el periodo $t \in (1...T)$.

Sl_{pit} Cantidad de producto $p \in P$ que no es enviado a la instalación $i \in N^c$ en el periodo $t \in (1...T)$.

V_{pit} Cantidad de inventario de producto $p \in P$ en la instalación $i \in N/N^c$ en el periodo $t \in (0...T)$.

W_{lit} Cantidad de inventario de kit de diferenciación en la instalación $i \in N/N^c$ en periodo $t \in (0...T)$.

S_{bjt} Contenedor $b \in B$ ocupado en la instalación $j \in N^I$ en el periodo $t \in (1...T)$.

$S1_{bjt}$ Contenedor $b \in B$ que se desocupada en la instalación $j \in N^I$ en el periodo $t \in (1...T)$.

$S2_{bjt}$ Contenedor $b \in B$ desocupado en la instalación $j \in N^{fac}$ en el periodo $t \in (1...T)$.

$S3_{bjt}$ Contenedor $b \in B$ vacío en la instalación $j \in N^I$ en el periodo $t \in (1...T)$.

R_{bijt} Cantidad de contenedores $b \in B$ regresando de la instalación $i \in N^I$ a la fábrica $i \in N^{Fac}$ donde el envío empieza en el periodo $t \in (1...T)$.

K_{ijt} camiones usado en el arco $(i, j) \in A$ en el periodo $t \in (1...T)$.

$K1_{ijt}$ camiones usado en el arco $(i, j) \in A$ en el periodo $t \in (1..T)$ para el retorno de contenedores.

SP_{pit} Cantidad de suministro de producto $p \in P$ en fábrica $i \in N^{Fac}$ en el periodo $t \in (1..T)$.

$$y_i^\pi = \begin{cases} 1 & \text{si la diferenciación se establece en la instalación } i \in N^I \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$y_i^t = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad de inventario se establece en la instalación } i \in N/N^c \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$y_{ij}^\gamma = \begin{cases} 1 & \text{si el transporte se hace a través del arco } (i, j) \in A \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

$$y_{jit}^\omega = \begin{cases} 1 & \text{si el retorno se activa de la instalación } j \in N^I \text{ a la fábrica } I \in N^{Fac} \\ & \text{en el periodo } t \in (1..T) \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

3.1.3.6 PARAMETROS

d_{ij} El tiempo de transporte en periodos del arco $(i, j) \in A$.

e_{pj} Precio de venta por unidad del producto $p \in P$ en el periodo $t \in (1..T)$.

c_{pij}^s Costo de transporte de producto $p \in P$ por arco $(i, j) \in A$.

c_{lij}^w Costo de transporte de parte diferenciadora $l \in L$ por arco $(i, j) \in A$.

c_{pi}^p Costo de diferenciación de producto $p \in P$ en la instalación $i \in N/N^c$.

c_{pi}^I Costo de inventario de producto $p \in P$ en la instalación $i \in N/N^c$.

c_{li}^w Costo de inventario de kit de diferenciación $l \in N/N_c$ en la instalación $i \in N/N^c$.

c_i^π Costo fijo de establecer la actividad diferenciadora en la instalación $i \in N^I$ usando el kit de diferenciación $l \in L$.

c_i^t Costo fijo de permitir inventario en la instalación $i \in N/N^c$.

- c_{ij}^γ Costo fijo de permitir el transporte por el arco $(i, j) \in N/N^c$.
- c_{bi}^ω Costo de inventario en la instalación $i \in N/N^c$.
- cr_{bj}^ω Costo de regreso del contenedor $b \in B$ a la fábrica $i \in N^{fac}$.
- c_{pi}^{pe} Costo de penalidad por unidad de producto $p \in P$ si la demanda no es satisfecha en la instalación $i \in N^c$.
- u_i^P Máxima capacidad de producción para la diferenciación en la instalación $i \in N/N^c$.
- u_{ij}^s Máxima capacidad de envío por arco $(i, j) \in A$.
- u_i^I Máxima capacidad de inventario en instalación $i \in N/N^c$.
- u_i^ω Máxima capacidad de inventario para contenedores en $i \in N/N^c$.
- u_p Capacidad de almacenaje utilizada por unidad de producto $p \in P$.
- u_l Capacidad de almacenaje utilizada por unidad el kit de diferenciación $l \in L$.
- u_b Capacidad de almacenaje utilizada por contenedor $b \in B$.
- inv_{pi} Inventario inicial del producto $p \in P$ en la instalación $i \in N/N^c$.
- $Finv_{pi}$ Inventario final del producto $P \in P$ en la instalación $i \in N/N^c$.
- inv_{pi}^w Inventario inicial del kit de diferenciación $l \in L$ en la instalación $i \in N/N^c$.
- $Finv_{pi}^w$ Inventario final del kit de diferenciación $l \in L$ en la instalación $i \in N/N^c$.
- inv_{bi}^ω Inventario inicial y final de contenedor $b \in B$ en la fábrica $i \in N^{fac}$.
- M_{ij}^s Cantidad necesaria para la activa el retorno desde la instalación $i \in N^I$ a la fábrica $i \in N^{fac}$.
- Dem_{pjt} Demanda de producto $p \in TL$ en la zona comercial $j \in N^c$ en el periodo $t \in 1..T$.
- Su_{it} Capacidad de suministro en fábrica $i \in N_{fac}$ en el periodo $t \in 1..T$.

3.1.3.7 MODELO

Función objetivo

$$\begin{aligned}
Máx \quad & \sum_{p \in TF} \sum_{i,j \in A: j \in N^c} \sum_{t=1..T: t \leq (T-d_{ij})} e_{pj} Z_{pijt} - \sum_{p \in TF} \sum_{i \in N^c} \sum_{t=(1..T)} c_{pi}^{pe} S l_{pit} \\
& - \sum_{p \in PG} \sum_{p' \in PF_{lp}} \sum_{i \in N^I} \sum_{l \in TL_p} \sum_{b \in TB_p} \sum_{t=(1..T)} c_{pi}^p X_{pp'ilt} - \sum_{p \in P} \sum_{i \in N/N^c} \sum_{t=(1..T)} c_{pi}^I V_{pit} \\
& - \sum_{l \in L} \sum_{i \in N/N^c} \sum_{t=(1..T)} c_{li}^w W_{lit} - \sum_{p \in P} \sum_{i,j \in A} \sum_{t=(1..T): t \leq T-d_{ij}} c_{pij}^s Z_{pijt} - \sum_{l \in L} \sum_{i,j \in A} \sum_{t=(1..T): t \leq T-d_{ij}} c_{lij}^s Z 1_{lijt} \\
& - \sum_{b \in B} \sum_{i \in N^{Fac}} \sum_{t=(1..T)} c_{bi}^w S 2_{bit} - \sum_{b \in B} \sum_{j \in N^I} \sum_{t=(1..T)} c_{bi}^w S 3_{bjt} \\
& - \sum_{i \in N^I} c_i^\pi y_i^\pi - \sum_{i \in N/N^c} c_i^t y_i^t - \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^\gamma y_{ij}^\gamma - \sum_{j \in N^I} \sum_{i \in N^{Fac}} \sum_{t=1..T: t \leq (T-d_{ij})} cr_i^\omega y_{jit}^\omega
\end{aligned} \tag{3.1}$$

Suministro de producto

$$\begin{aligned}
& - SP_{pit:PA_{pi}} \leq V_{pi(t-1)} - \sum_{(i,j) \in A} Z_{pijt} - V_{pit} \\
& \forall p \in P, i \in N^{Fac}, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Flujo de productos

$$\begin{aligned}
& V_{pi(t-1)} + \sum_{(j,i) \in A: (t-d_{ji}) \geq 1} Z_{pij(t-d_{ji})} + \sum_{p' \in P: p \in TF_{lp'}} \sum_{l \in TL_{p'}} X_{p'pilt} \\
& = V_{pit} + \sum_{(i,j) \in A} Z_{pijt} + \sum_{p' \in TF_{lp}} \sum_{l \in TL_p} X_{pp'ilt} \\
& \forall p \in P, i \in N^I, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Suministro de kits diferenciadores

$$\begin{aligned}
& - sup_{lit} \leq w_{pi(t-1)} - \sum_{(i,j) \in A} Z 1_{lijt} - w_{lit} \\
& \forall l \in L, i \in N^{Fac}, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Flujo de kits diferenciadores

$$\begin{aligned}
& w_{pi(t-1)} + \sum_{(j,i) \in A: (t-d_{(j,i)}) \geq 1} Z1_{lij(t-d_{ji})} \\
& = \sum_{p' \in TF_{lp}} \sum_{l \in TL_p} \sum_{b \in TB_{bp}} X_{pp'ilbt} + \sum_{(i,j) \in A} Z1_{lijt} + w_{lit} \\
& \forall l \in L, i \in N/N^c, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Equilibrio de contenedores desocupados en fábrica

$$\begin{aligned}
& S1_{bi(t-1)} + \sum_{(j,i) \in A: (t-d_{ji} \geq 1)} Z2_{bij(t-d_{ji})} = \sum_{j \in N^i: t \leq (T-d_{ij})} R_{bijt} + S1_{bit} \\
& \forall b \in B, i \in N^{Fac}, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Equilibrio de contenedores ocupados en instalaciones intermedias

$$\begin{aligned}
& S_{bj(t-1)} + \sum_{(j,i) \in A: (t-d_{(j,i)}) \geq 1} Z2_{bji(t-d_{ji})} = S1_{bjt} + \sum_{(i,j) \in A} Z2_{bijt} + S_{bjt} \\
& \forall b \in B, j \in N^I, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.7}$$

Equilibrio de contenedores vacíos en instalaciones intermedias

$$\begin{aligned}
& S3_{bj(t-1)} + S1_{bjt} = \sum_{j \in N^I: t \leq (T-d_{ij})} R_{bijt} + S3_{bjt} \\
& \forall b \in B, j \in N^I, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Demanda

$$\begin{aligned}
& Dem_{pjt} = \sum_{t=(1..T): t \leq T-d_{ij}} Z_{pij(t-d_{ij})} + sl_{pjt} \\
& \forall p \in TF_{lp}, j \in N^c, t = (1..T)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Inventario inicial de producto

$$\begin{aligned}
& V_{pi0} = Inv_{pi} \\
& \forall p \in P, i \in N/N^c
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Inventario final de producto

$$\begin{aligned} V_{piT} &= FInv_{pi} \\ \forall p \in P, i \in N/N^c \end{aligned} \quad (3.11)$$

Inventario inicial de kit diferenciador

$$\begin{aligned} W_{li0} &= inv_{li}^w \\ \forall l \in L, i \in N/N^c \end{aligned} \quad (3.12)$$

Inventario final de kit diferenciador

$$\begin{aligned} W_{liT} &= Finv_{li}^w \\ \forall l \in L, i \in N/N^c \end{aligned} \quad (3.13)$$

Inventario inicial de contenedor en fábricas

$$\begin{aligned} S3_{Bi0} &= inv_{bi}^\omega \\ \forall b \in B, i \in N^{Fac} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Inventario inicial de contenedor en instalaciones

$$\begin{aligned} S2_{Bj0} &= Finv_{bi}^\omega \\ \forall b \in B, J \in N^{Fac} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Inventario final de contenedor en fábrica

$$\begin{aligned} S3_{liT} &= inv_{bi}^\omega \\ \forall l \in L, i \in N/N^c \end{aligned} \quad (3.16)$$

Capacidad de suministro

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} SP_{pit:PA_{pi}} &\leq Sup_{it} \\ \forall i \in N^{fac}, t &= (1...T) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Capacidad de producción

$$\sum_{P \in TL_p} \sum_{p' \in TF_{lp}} \sum_{B \in TB_{bp}} X_{pp'ilbt} \leq u_i^P y_i^\pi \quad (3.18)$$

$$\forall l \in L, i \in N^I, t = (1 \dots T)$$

Desocupación de contenedor

$$\sum_{p \in TF_{lp}} \sum_{l \in TL_p} X_{pp'ilbt} = S1_{bjt} \quad (3.19)$$

$$\forall b \in B, i \in N^I, t = (1 \dots T)$$

Asignación de contenedor en fábrica

$$\sum_{b \in TB_p} Z2_{bjt} = \sum_{p \in TB_p} Z_{pijt} \quad (3.20)$$

$$\forall i \in N^{fac}, j \in N^I, t = (1 \dots T)$$

Asignación de contenedor en instalaciones intermedias

$$\sum_{p \in TB_p} Z2_{bjt} = \sum_{p \in TB_p} Z_{pijt} \quad (3.21)$$

$$\forall (i, j) \in N^I, t = (1 \dots T)$$

Capacidad de transporte

$$\sum_{p \in P} u_p Z_{pijt} + \sum_{l \in L} u_l Z1_{lijt} \leq U_{ij}^s y_{ij}^\gamma \quad (3.22)$$

$$\forall (i, j) \in A, t = (1 \dots T)$$

Selección de ruta de transporte de productos

$$K_{ijt} \leq M_{ij}^s y_{ij}^\gamma \quad (3.23)$$

$$\forall (i, j) \in A, t = (1 \dots T)$$

Capacidad de Inventario

$$\sum_{p \in P} u_p V_{pit} + \sum_{l \in L} u_l W_{lit} \leq U_i^s y_i^t \quad (3.24)$$

$$\forall i \in N/N^c, t = (1 \dots T)$$

Capacidad de Inventario de contenedores

$$\sum_{b \in B} u_b S_{bit} \leq u_j^\omega \quad (3.25)$$

$$\forall i \in N^I, t = (1 \dots T)$$

Activar retorno

$$\sum_{b \in B} u_b R_{bijt} \leq U_{ij}^s Y_{ijt}^\omega \quad (3.26)$$

$$\forall i \in N^{Fac}, j \in N^I, t = (1 \dots T)$$

Selección de ruta de retorno de contenedores

$$K 1_{ijt} \leq M_{ij}^s y_{ij}^\gamma \quad (3.27)$$

$$\forall (i, j) \in A, t = (1 \dots T)$$

- 3.1 Es la función objetivo que máxima las ganancias generadas menos los costos variables de actividades y los costos fijos de instalación.
- 3.2 Indica cuánto producto genérico o personalizado es introducido a la red.
- 3.3 Mantiene el flujo de producto en la red de distribución.
- 3.4 Indica cuántos kits de diferenciación es introducido a la red.
- 3.5 Mantiene el flujo de partes diferenciadoras en la red.

- 3.6 Flujo de equilibrio del inventario de contenedores en las fábricas.
- 3.7 Flujo de equilibrio del inventario de contenedores ocupados en las instalaciones intermedias.
- 3.8 Flujo de equilibrio del inventario de contenedores desocupados en las instalaciones intermedias.
- 3.9 Cantidad de productos finales enviados a la zona comercial más cantidad de productos que faltaron para cumplir la demanda.
- (3.10) (3.12) (3.14) (3.15) Inventario inicial de producto, partes diferenciadoras y contenedores antes de iniciar actividades.
- (3.11) (3.13) (3.16) Inventario del producto, partes diferenciadoras y contenedores en las instalaciones al finalizar el ciclo.
- 3.17 Asegura que los productos introducidos en la red no sobrepasen la capacidad de producción de la fábrica más el inventario que se tenga disponible.
- 3.18 Indica que los productos diferenciados deben ser menores o iguales a la capacidad de producción de la facilidad, su variable binaria indica si la actividad es establecida o no.
- 3.19 El contenedor retornable es desocupado cuando el producto genérico es diferenciado.
- 3.20 Asigna la cantidad de contenedores a los productos que se mandarían desde fábrica.
- 3.21 Asigna la cantidad de contenedores a los productos que se mandarían desde las instalaciones intermedias.
- 3.22 Indica que los productos transportados entre los nodos no pueden ser mayores a la capacidad máxima de transporte, y el número de camiones ocupados en ese periodo.

- 3.23 Marca los arcos de transporte entre los nodos.
- (3.24) (3.25) Indica que los productos, partes diferenciadoras y contenedores inventariados no pueden ser mayores a la capacidad de inventario en la facilidad si la actividad de inventario es establecida en ese lugar.
- 3.26 Activa el retorno de contenedores retornables y cantidad de vehículos para su retorno en un periodo.
- 3.27 Activa el arco de transporte y asegura que no rebase el número de camiones disponibles.

3.2 GENERACIÓN DE INSTANCIAS

Se usarán datos relativos generados de forma aleatoria con distribución normal, con media y desviación estándar establecidas por cada grupo de parámetros similares, las redes de distribución se dividen en tres tamaños, chicas, medianas y grandes, estas se presentan en la Tabla 3.4 y las combinaciones de los productos genéricos y los productos diferenciados que se crean a partir de los primeros con partes diferenciadoras se muestran en la Tabla 3.5. Se hizo una matriz combinando los datos de las Tablas anteriores, ésta se muestra en la Tabla 3.6. Lo anterior se utilizó para crear instancias que se usarán en la experimentación.

Localización	Tamaño		
	Chica	Mediana	Grande
Fábrica	1	4	7
Centro de distribución	2	4	6
Almacén regional	3	6	10
Zona comercial	5	15	20

Tabla 3.4: Tamaño de red de distribución.

	Producto diferenciado		
Producto genérico	2	3	5
1	PG1 PD2	PG1 PD3	PG1 PD5
3	PG3 PD2	PG3 PD3	PG3 PD5
6	PG6 PD2	PG6 PD3	PG6 PD5

Tabla 3.5: Combinación de productos.

	Red de distribución		
Producto	Chica	Mediana	Grande
PG1 PD2	PG1 PD2, C	PG1 PD2, M	PG1 PD2, G
PG3 PD2	PG3 PD2, C	PG3 PD2, M	PG3 PD2, G
PG6 PD2	PG6 PD2, C	PG6 PD2, M	PG6 PD2, G
PG1 PD3	PG1 PD3, C	PG1 PD3, M	PG1 PD3, G
PG3 PD3	PG3 PD3, C	PG3 PD3, M	PG3 PD3, G
PG6 PD3	PG6 PD3, C	PG6 PD3, M	PG6 PD3, G
PG1 PD5	PG1 PD5, C	PG1 PD5, M	PG1 PD5, G
PG3 PD5	PG3 PD5, C	PG3 PD5, M	PG3 PD5, G
PG6 PD5	PG6 PD5, C	PG6 PD5, M	PG6 PD5, G

Tabla 3.6: Instancias propuestas.

Nota: PG es producto genérico el número que el sigue es la cantidad de productos genéricos, PD es producto diferenciado y el número que el sigue es la cantidad de productos diferenciados que se generan de cada producto genérico.

3.3 RESULTADOS

Se recolectan los resultados de las instancias propuestas, seguido por una comparación de beneficio total, demanda satisfecha y déficit de demanda con un modelo de distribución que no permite la diferenciación de producto. Ya con la metodología y el modelo desarrollado, el siguiente paso es la experimentación de las instancias y observar cómo se comportan los inventarios de los productos y cuándo es conveniente usar el atrasamiento de forma y tiempo de acuerdo a los costos de transformación.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se hablará de los resultados obtenidos en la experimentación realizada con el modelo manejando las instancias propuestas anteriormente, las instancias se corrieron en diferentes escenarios con diferentes costos variables de diferenciación de producto, y con esto se demostró el momento que es conveniente usar una estrategia de atrasamiento de forma o de tiempo.

Se encontró el punto de quiebre en que es conveniente diferenciar el producto en la red de distribución, encontrándose que conforme iba disminuyendo el costo de diferenciar es más conveniente utilizar el atrasamiento de forma en lugar de atrasamiento de tiempo, en las instancias corridas se tuvo una mezcla de atrasamiento de forma y tiempo.

4.1 GENERACIÓN DE DATOS

Los datos usados para esta investigación se generaron de forma aleatoria con siguiendo una distribución normal con una media 550.568 y desviación estándar de 29.83 para el precio, el costo de penalización con una media de 199.774 y desviación estándar 28.40. Para la demanda se con una media de 104 y una desviación estándar de 55.33.

Los datos fueron manejados en Microsoft Excel para su posterior alimentación al software General Algebraic Modeling System (GAMS). Para manejar el costo de cada SKU, lo que se hizo fue obtener el promedio de los precios de venta de cada SKU y se aplicó el 20% de ese precio promedio, para calcular el costo de distribución y transformación mínimo, variando el costo de transformación en diferentes porcentajes, junto con los costos distribución, en un intervalo del 20% al 37% del precio del producto.

La variación de costo de transformación se calculó como un porcentaje del costo de distribución más el costo total de éste. En la Tabla 4.1 se muestra el porcentaje de aumento al costo de transformación y el porcentaje total con los aumentos de los costos de transformación.

Porcentaje de aumento de costo transformación	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %	5 %
Porcentaje de costo de distribución y diferenciación	37 %	35 %	33 %	31 %	29 %	27 %	25 %	23 %	21 %	20 %

Tabla 4.1: Variación de costos de transformación.

4.2 SUPUESTOS DE LAS INSTANCIAS

- El costo total representa como máximo el 70% del precio del producto, en otras palabras, se considera un 30% de margen.
- Los costos de inventarios y transporte se mantienen fijos en todas las instancias.
- El costo máximo de transformación junto a los costos de distribución consideramos que pudiera llegar a ser 37% del costo total.
- Para el costo mínimo de transformación en conjunto con costos de distribución consideramos que pudiera llegar a ser 20% del costo total.

- Los precios de los productos transformados se mantienen fijos en todas las instancias.
- El número de periodos es de 9 periodos.
- El suministro del producto genéricos y diferenciados se hace cada 3 periodos.
- La demanda de los productos diferenciados es fija para cada instancia y la demanda para el periodo 1 es cero, puesto que no cuenta con inventario inicial. es imposible cumplirla.
- El inventario inicial y final fue de 0 (el modelo considera un parámetro para poner cualquier valor).
- Cada fábrica puede suministrar uno o más productos genéricos y sus transformados.
- Se cuenta con 1000 contenedores para el producto genérico.

4.3 RESULTADOS

Con los supuestos establecidos anteriormente se solucionaron las instancias con un tiempo de solución mínimo de 0.545 segundos a un tiempo máximo de 502.539 segundos, se utilizó una laptop con Windows 8 de 64bits, con procesador Intel core™ i74510U CPU @ 2.00GHz 2.60GHz con 6.00 GB de memoria RAM. Con el programa GAMS usando el solver Cplex.

En la experimentación corrimos todas las instancias propuestas en la Tabla 3.6. En la Tabla 4.2. se presenta la utilidad máxima con el porcentaje de demanda cumplida que se obtuvieron en las experimentación de instancias con diferentes costos de transformación respeto al costo de distribución.

Instancias	Utilidad Máxima	Demanda cubierta	Instancias	Utilidad Máxima	Demanda cubierta
PG1 PD2, C	115252	90 %	PG6 PD3, M	8866145	70 %
PG3 PD2, C	517572	92 %	PG1 PD5 M	4008735	9 %
PG6 PD2, C	836003	87 %	PG3 PD5 M	11199911	91 %
PG1 PD3, C	147618	90 %	PG1 PD2 G	1259009	75 %
PG3 PD3, C	4214774	92 %	PG3 PD2 G	6496070	91 %
PG6 PD3, C	1131892	93 %	PG6 PD2 G	18053572	91 %
PG1 PD5, C	350524	92 %	PG1 PD3 G	6881233	85 %
PG3 PD5, C	7021577	91 %	PG3 PD3 G	22123683	85 %
PG6 PD5, C	11028765	31 %	PG6 PD3 G	28903242	84 %
PG6 PD2, M	2715115	90 %	PG1 PD5 G	9938936	84 %
PG1 PD3, M	6112217	84 %	PG3 PD5 G	26819360	77 %

Tabla 4.2: Utilidad máxima de las instancias resueltas.

En la Tabla 4.3 se presentan las cantidades de inventarios de los productos genéricos y los productos transformados, la demanda total, la cantidad cumplida y la cantidad no cumplida, la utilidad máxima que se puede generar en las instancias PG6 PD5 C, PG6 PD3 M y PG6 PD3 G. En las gráficas 4.2, 4.4 y 4.6 se muestran el comportamiento del inventario. Se puede observar el punto en donde es conveniente comenzar a diferenciar el producto y el comportamiento que tiene el inventario total. (genérico + diferenciado). respectivamente con costo de diferenciación, el nivel de inventario marca cuando es conveniente hacer la diferenciación del producto respecto al tamaño de la red.

Instancia	Inventario de producto			Demanda Total	Demanda surtida	Demanda no surtida	Porcentaje cubierto	Función Objetivo	Tiempo (s)
	Genérico	Transformado	Total						
PG6 PD5 C-37 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-35 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-33 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-31 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-29 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-27 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-25 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-23 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-21 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD5 C-20 %	0	32115	32115	57787	17787	40000	30.78 %	11028765	23.024
PG6 PD3 M-37 %	0	49136	49136	74976	68017	6959	90.72 %	16616332	11.039
PG6 PD3 M-35 %	16018	33118	49136	74976	68018	6958	90.72 %	16741355	12.648
PG6 PD3 M-33 %	20250	30130	50380	74976	68018	6958	90.72 %	16798607	11.953
PG6 PD3 M-31 %	21039	29744	50783	74976	68015	6961	90.72 %	16872585	12.261
PG6 PD3 M-29 %	26264	25872	52136	74976	68012	6964	90.71 %	16968889	11.586
PG6 PD3 M-27 %	30728	24126	54854	74976	68018	6958	90.72 %	17102453	198.65
PG6 PD3 M-25 %	30333	22821	53154	74976	68016	6960	90.72 %	17284252	11.412
PG6 PD3 M-23 %	36507	22871	59378	74976	68018	6958	90.72 %	17566864	209.812
PG6 PD3 M-21 %	31230	22943	54173	74976	68013	6963	90.71 %	17877202	11.63
PG6 PD3 M-20 %	38823	23032	61855	74976	68018	6958	90.72 %	18053572	205.967
PG6 PD3 G-35 %	0	17018	17018	221507	55989	165518	25.28 %	16117491	5.348
PG6 PD3 G-33 %	26330	47671	74001	221507	111996	109511	50.56 %	30316398	380.68
PG6 PD3 G-31 %	42486	36556	79042	221507	112000	109507	50.56 %	30534146	500.417
PG6 PD3 G-29 %	63022	21721	84743	221507	111998	109509	50.56 %	30813749	382.161
PG6 PD3 G-25 %	69558	18420	87978	221507	109510	111997	49.44 %	31261555	395.752
PG6 PD3 G-25 %	70481	17867	88348	221507	112000	109507	50.56 %	31751489	476.831
PG6 PD3 G-23 %	69885	17820	87705	221507	112000	109507	50.56 %	32247413	502.784
PG6 PD3 G-21 %	71031	18787	89818	221507	112000	109507	50.56 %	32769721	370.186
PG6 PD3 G-20 %	70875	18701	89576	221507	120000	101507	54.17 %	33001697	474.593

Tabla 4.3: Resultados de las instancias.

Cuando el inventario de producto genérico es cero significa que no se está diferenciando producto en la red. Se puede observar que cuando el costo de transformación se reduce, el inventario de producto transformado se reduce, pues la red se alimenta con producto genérico para su transformación en lugar de ya de transformado, esto indica que se está usando la estrategia de que se está alimentando la red con producto genérico con el objetivo de transformarlo para surtir la demanda, en otras palabras la diferenciación del producto se hace más cercano a la ocurrencia de la demanda. Esto confirma el análisis teórico que hicieron Pagh y Cooper (1998) en donde describen las estrategias genéricas de atrasamiento sin utilizar modelación.

Con los resultados obtenidos cuando muestran que el inventario de producto genérico es nulo en red, se puede interpretar que el costo de transformación es alto

de acuerdo con la proporción con el costo de distribución. Mientras que cuando el costo de transformación se reduce, aumenta los niveles de inventario de producto genérico en la red de distribución a la vez que disminuye los inventarios de productos diferenciados, esto se da debido a que ya entra más producto genérico para su transformación que producto ya transformado. Esto se interpreta en el modelo que indica que una de la estrategia genérica de atrasamiento se está usando para satisfacer la demanda de la red. Ya sea la estrategia de atrasamiento logístico o de atrasamiento de manufactura propuestas por Pagh y Cooper (1998).

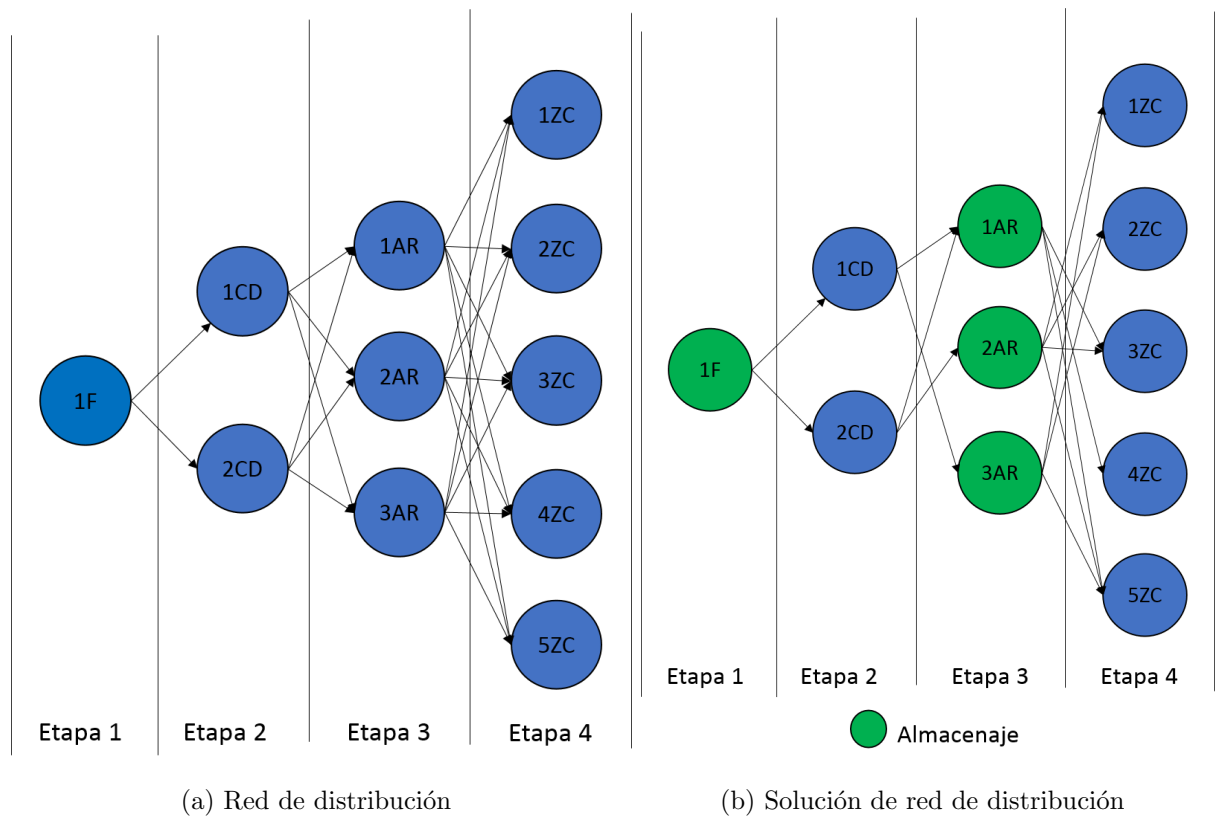


Figura 4.1: Instancia PG3 PD5 C.

La red de distribución para la instancia PG6 PD5 C en la Figura 4.1a y la red solución en la Figura 4.1b, se puede observar que en la solución óptima, las fábricas no almacenan, los centros de distribución funcionan como instalaciones para actividades exclusivas de porteo mientras que en el tercer nivel los almacenes regionales se encargan de almacenar el producto para la satisfacer la demanda. En

ninguna de las instalaciones se estableció la actividad de transformación de producto.

El modelo cuando opta por no transformar producto genérico en la red distribución con en la instancia PG6 PD5 C, con cualquier costo de transformación como lo indica la Figura 4.2 se puede interpretar que la red de distribución es demasiado pequeña para considerar la estrategia de atrasamiento de manufactura.

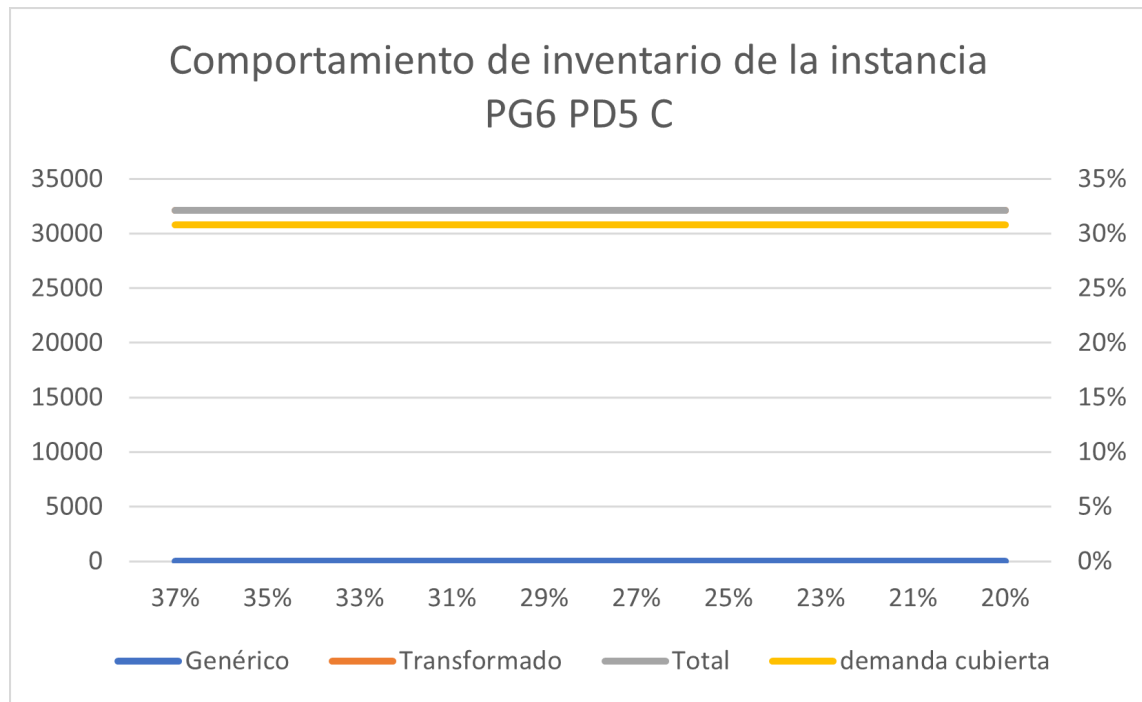


Figura 4.2: Comportamiento de inventario de instancia PG3 PD5 C.

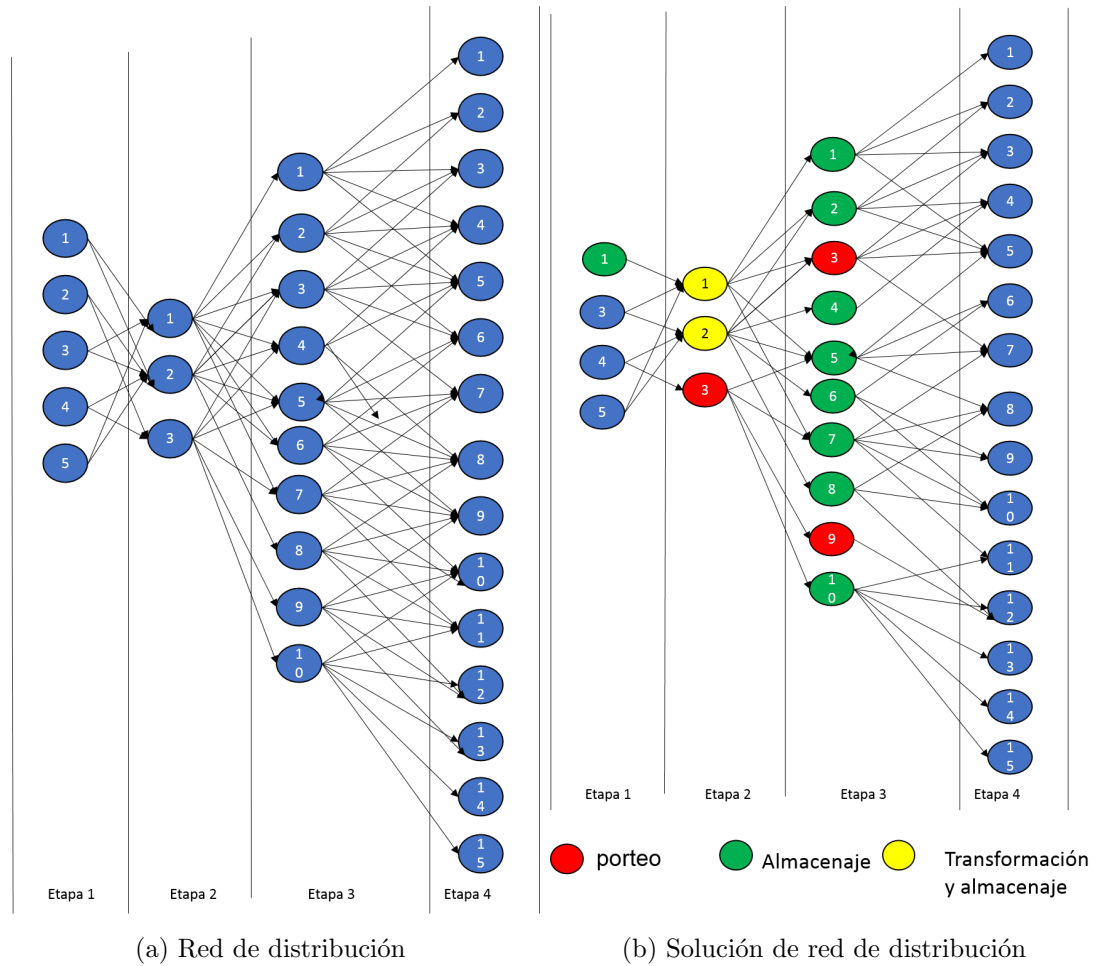


Figura 4.3: Instancia PG3 PD3 M.

La red de distribución para la instancia PG3 PD5 M se muestra en la figura 4.3a y la solución se muestra en la figura 4.3b, en la solución óptima, no suministra de una fábrica de las cinco fábricas consideradas. En dos de los centros de distribución se establecieron las actividades de transformación de producto e inventario y último el centro de distribución se usó siendo exclusivamente de porteo, y solamente dos de los diez almacenes regionales se establecieron para actividades de porteo. De esta manera quedó establecida la estrategia de atrasamiento para esta instancia de tamaño mediano.

En la Figura 4.4 se muestra la solución de la instancia PG3 PD5 M, esta muestra que el proceso de diferenciación es conveniente hacerlo cuando el costo total del precio promedio es menor al 35%. A partir de este punto se observa la conveniencia de adoptar la diferenciación conforme el costo es más bajo. También observamos que el costo de inventario se reduce y con este proceso de diferenciación se mantiene constante la cobertura de mercado, mejorándose el margen.

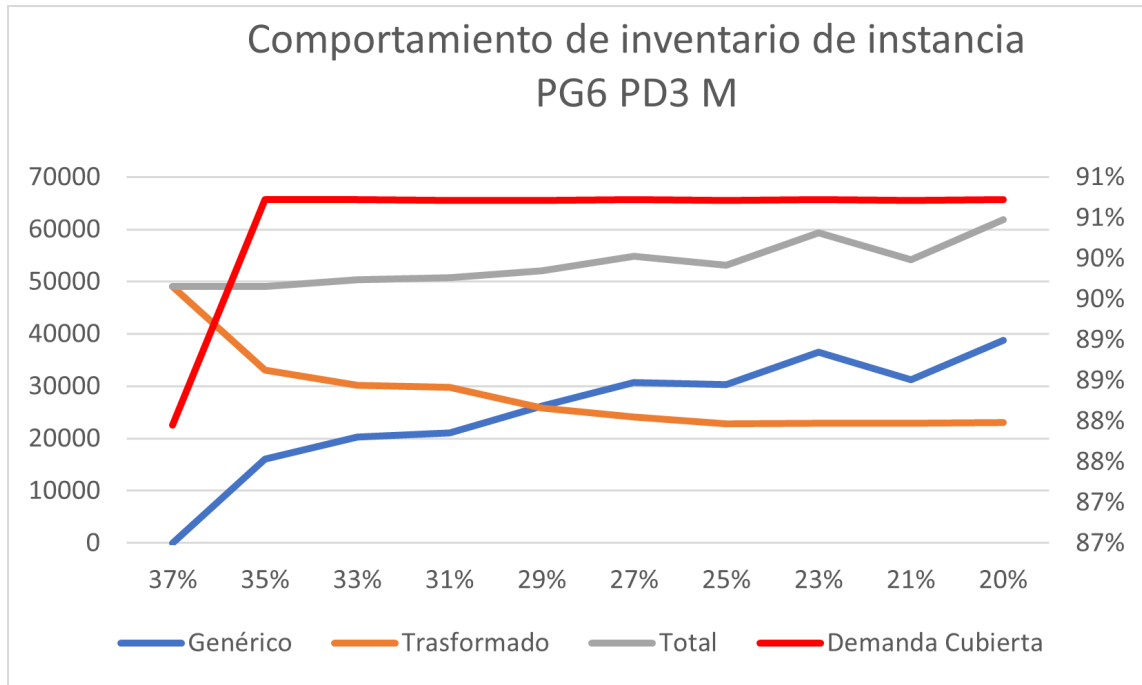


Figura 4.4: Comportamiento de inventario de instancia PG3 PD5 M.

En la Figura 4.5a mostramos la red de distribución resultante después de la optimización de la instancia PG3 PD5 G en la Figura 4.5b, se muestra la red antes de ser optimizada. En la solución óptima se observa que seis de las siete fábricas disponibles se establecen actividades de inventario. De los siete centros de distribución disponibles solamente se requirieron seis estableciéndose en ellos las actividades de transformación de producto y todos llevan inventario. En el tercer nivel se tienen diez almacenes regionales disponibles en ninguno de ellos se recomienda hacer la diferenciación de producto, solamente en tres se recomienda mantener inventario y los siete restantes se usa solamente para porteo. Es notable la diferencia entre la red original y la recomendación que hace el modelo.

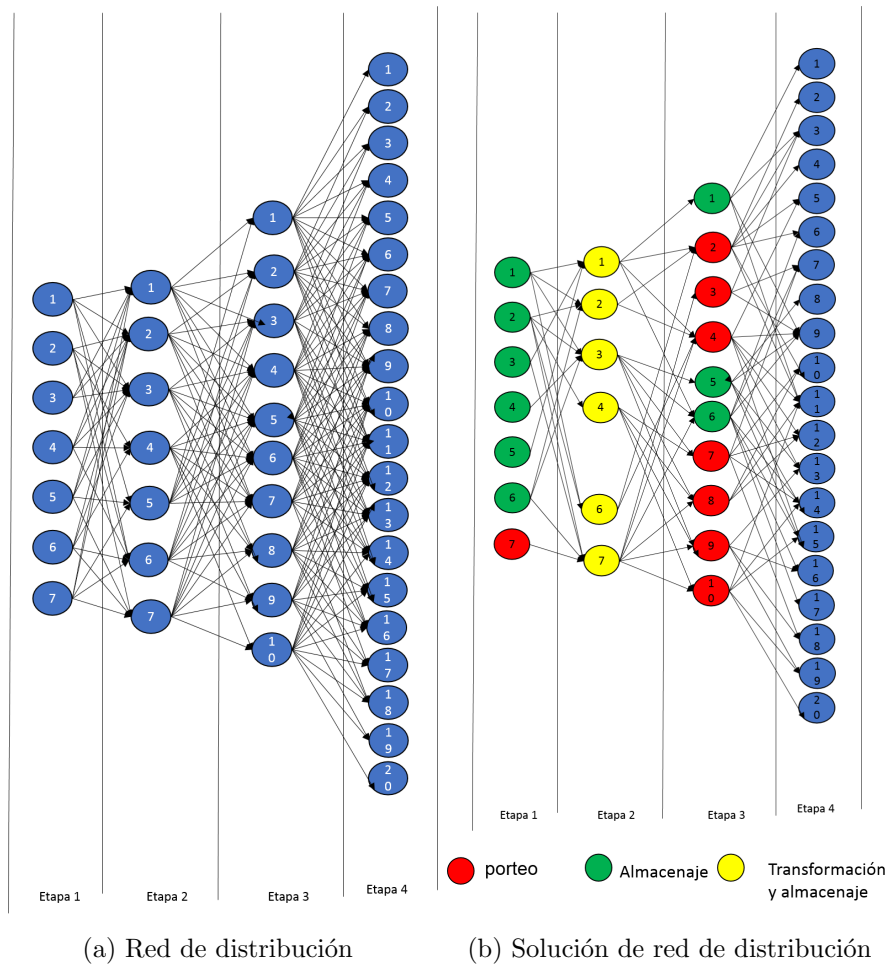


Figura 4.5: Instancia PG3 PD3 G.

Analizando la Figura 4.6 podemos observar que el proceso de diferenciación es conveniente hacerlo cuando el costo de diferenciación y distribución es menor de 33 % un costo menor a comparación de la red de distribución mediana. A partir de este punto se observa que el proceso la conveniencia de adoptar la diferenciación conforme el costo es más bajo. También observamos que el costo de inventario se incrementa sin embargo, con éste proceso de diferenciación se logra una mejor cobertura de demanda en las zonas comerciales y mejor inventario.

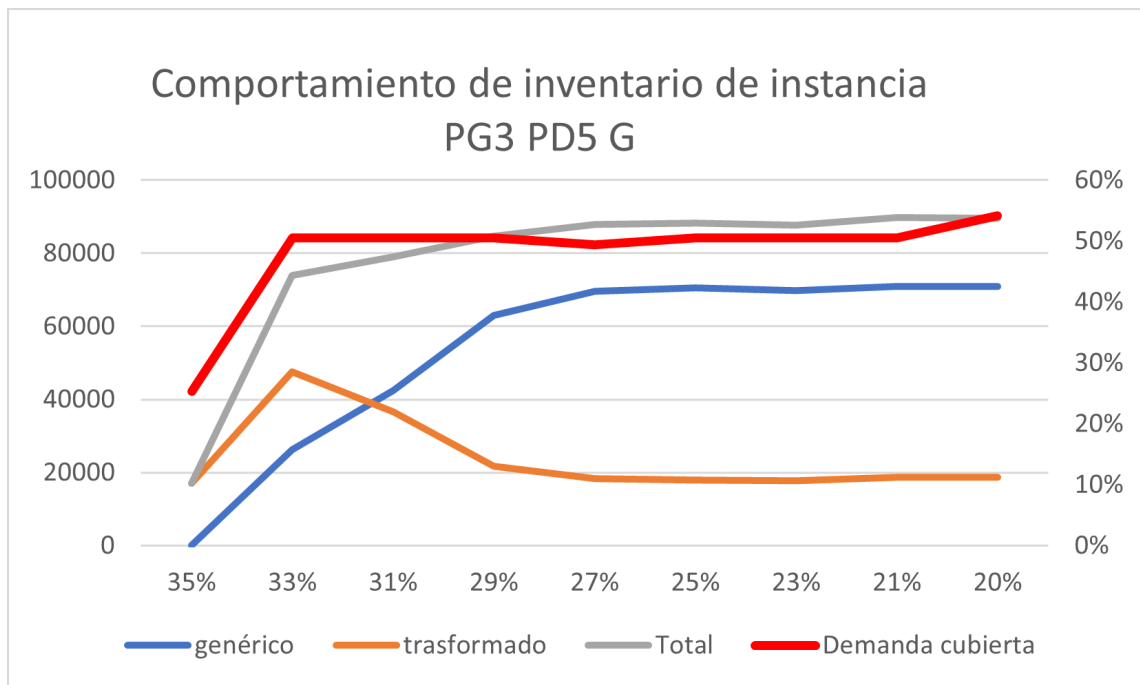


Figura 4.6: Comportamiento de inventario de instancia PG3 PD5 G.

4.3.1 COMPORTAMIENTO DE LOS COSTOS

En la Tabla 4.4 se presentan los costos incurridos sin diferenciar y diferenciado el producto en la red de distribución. En la instancia pequeña no se recomienda utilizar la diferenciación, en la mediana observamos que el diferenciado el producto se obtiene una mejora en la función objetivo de 0.077 %, la cobertura de la demanda es la misma pero hay un pequeño beneficio en los costos de inventario y de transporte (estos últimos no se muestran en la tabla). En la instancia grande si notamos un incremento importante en la función objetivo (88.1 %). Los costos de inventario y la cobertura de la demanda se mejoran sustancialmente.

instancia		Inventario de producto			Costo de inventario			Porcentaje	Función objetivo
		genérico	trasformado	Total	genérico	trasformado	Total		
PG6 PD5 C	Sin Producto genérico	0	32115	32115	0	979507.5	979507.5	30.78 %	11028765
	Con Producto genérico	0	32115	32115	0	979507.5	979507.5	30.78 %	11028765
PG3 PD3 M	Sin Producto genérico	0	49136	49136	0	1498648	1498648	90.72 %	16616332
	Con producto genérico	16018	33118	49136	121416.44	1010099	1131515.44	90.72 %	16741355
PG3 PD6 G	Sin Producto genérico	0	17018	17018	0	519049	519049	25.28 %	16117491
	Con Producto genérico	26330	47671	74001	199581.4	1453965.5	1653546.9	50.56 %	30316398

Tabla 4.4: Tabla de costos de inventarios.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló un modelo de optimización, que sirve como una herramienta cuantitativa para ayudar a establecer el tipo de estrategia atrasamiento más conveniente para implementar en una red de distribución si se considera el uso de la estrategia de atrasamiento de manufactura en la red de distribución y el nivel de la red en que es conveniente instalar el proceso de diferenciación son convenientes utilizar para generar mayor beneficios y una mejor cobertura de la demanda.

Se encontraron los márgenes de costo de manufactura al igual que los costos de distribución para que sea conveniente la estrategia de atrasamiento de manufactura, este margen influye en más en el tamaño de la red y no en las familias de productos. El tamaño de la red tiene mayor influencia cuando se trata en mejorar el margen que las familias.

El modelo de optimización muestra que a pesar de que hay un incremento de costos por el proceso de diferenciación y el uso de los contenedores retornables, los beneficios de uso más eficiente de los inventarios y la mejor cobertura resultan en una mejora del margen, este margen será mayor en porcentaje cuando más grande sea la red de distribución.

5.1 TRABAJO A FUTURO

El modelo que se presenta en esta investigación se puede utilizar en el nivel estratégico, para el diseño de la red y en el nivel táctico, para el movimiento y diferenciación del producto en el día a día dentro de la red de distribución. Como trabajo a futuro sería conveniente separar la parte técnica de la operativa y, sobre todo para el modelo táctico, para el caso de redes muy grandes, es conveniente utilizar métodos de descomposición buscando mejorar los tiempos de solución con el objetivo de que los tiempos de solución sean adecuados para que se puede planear las operaciones de manera expedita.

BIBLIOGRAFÍA

- ALDERSON, W. (2006), «Marketing efficiency and the principle of postponement», en *A Twenty-First Century Guide to Aldersonian Marketing Thought*, Springer, págs. 109–113.
- APPELQVIST, P. y E. GUBI (2005), «Postponed variety creation: case study in consumer electronics retail», *International Journal of Retail & Distribution Management*.
- AVIV, Y. y A. FEDERGRUEN (2001), «Design for postponement: A comprehensive characterization of its benefits under unknown demand distributions», *Operations Research*, **49**(4), págs. 578–598.
- BANDALY, D. C. y H. F. HASSAN (2020), «Postponement implementation in integrated production and inventory plan under deterioration effects: a case study of a juice producer with limited storage capacity», *Production Planning & Control*, **31**(4), págs. 322–337.
- BRUN, A. y M. ZORZINI (2009), «Evaluation of product customization strategies through modularization and postponement», *International Journal of Production Economics*, **120**(1), págs. 205–220.
- BUCKLIN, L. P. (1965), «Postponement, speculation and the structure of distribution channels», *Journal of marketing research*, **2**(1), págs. 26–31.
- CHENG, T. E., J. LI, C. J. WAN, S. WANG *et al.* (2010), *Postponement strategies in supply chain management*, tomo 143, Springer.

- CHOLETTE, S. (2009), «Mitigating demand uncertainty across a winery's sales channels through postponement», *International Journal of Production Research*, **47**(13), págs. 3587–3609.
- CHRISTOPHER, M. (2000), «The agile supply chain: competing in volatile markets», *Industrial marketing management*, **29**(1), págs. 37–44.
- ERNST, R. y B. KAMRAD (2000), «Evaluation of supply chain structures through modularization and postponement», *European journal of operational research*, **124**(3), págs. 495–510.
- FERREIRA, K. A., R. N. TOMAS y R. L. C. ALCÂNTARA (2015), «A theoretical framework for postponement concept in a supply chain», *International Journal of Logistics Research and Applications*, **18**(1), págs. 46–61.
- FORZA, C., F. SALVADOR y A. TRENTIN (2008), «Form postponement effects on operational performance: a typological theory», *International Journal of Operations & Production Management*.
- GARCÍA-DASTUGUE, S. J. y D. M. LAMBERT (2007), «Interorganizational time-based postponement in the supply chain», *Journal of Business Logistics*, **28**(1), págs. 57–81.
- GOUDENEGE, G., C. CHU y Z. JEMAI (2013), «Reusable containers management: from a generic model to an industrial case study», en *Supply Chain Forum: An International Journal*, tomo 14, Taylor & Francis, págs. 26–38.
- GRAMAN, G. A. (2010), «A partial-postponement decision cost model», *European Journal of Operational Research*, **201**(1), págs. 34–44.
- GUERICKE, S., A. KOBERSTEIN, F. SCHWARTZ y S. VOSS (2012), «A stochastic model for the implementation of postponement strategies in global distribution networks», *Decision Support Systems*, **53**(2), págs. 294–305.

- HANAFY, M. y H. ELMARAGHY (2015), «Developing assembly line layout for delayed product differentiation using phylogenetic networks», *International Journal of Production Research*, **53**(9), págs. 2633–2651.
- HSUAN MIKKOLA, J. y T. SKJØTT-LARSEN (2004), «Supply-chain integration: implications for mass customization, modularization and postponement strategies», *Production Planning & Control*, **15**(4), págs. 352–361.
- JUNIOR, M. W. J. S., P. A. CARDOSO, M. M. DA COSTA CRUZ y M. H. M. PAIVA (2018), «Mathematical model for supply chain design with time postponement», *TRANSPORTES*, **26**(4), págs. 1–15.
- KHAKDAMAN, M., K. Y. WONG, B. ZOHOORI, M. K. TIWARI y R. MERKERT (2015), «Tactical production planning in a hybrid Make-to-Stock–Make-to-Order environment under supply, process and demand uncertainties: a robust optimisation model», *International Journal of Production Research*, **53**(5), págs. 1358–1386.
- KUTHAMBALAYAN, T. S., P. MEHTA y K. SHANKER (2014), «Integrating operations and marketing decisions using delayed differentiation of products and guaranteed delivery time under stochastic demand», *European Journal of Operational Research*, **237**(2), págs. 617–627.
- LEE, H. L. y C. S. TANG (1997), «Modelling the costs and benefits of delayed product differentiation», *Management science*, **43**(1), págs. 40–53.
- LI, J., T. E. CHENG y S. WANG (2007), «Analysis of postponement strategy for perishable items by EOQ-based models», *International Journal of Production Economics*, **107**(1), págs. 31–38.
- MA, S., W. WANG y L. LIU (2002), «Commonality and postponement in multistage assembly systems», *European Journal of Operational Research*, **142**(3), págs. 523–538.

- MUKHERJEE, K. (2016), «An integrated approach of sustainable procurement and procurement postponement for the multi-product, assemble-to-order (ATO) production system», *Production*, **26**(2), págs. 249–260.
- OLHAGER, J. (2003), «Strategic positioning of the order penetration point», *International journal of production economics*, **85**(3), págs. 319–329.
- PAGH, J. D. y M. C. COOPER (1998), «Supply chain postponement and speculation strategies: how to choose the right strategy», *Journal of business logistics*, **19**(2), pág. 13.
- RIETZE, S. M. (2006), *Case studies of postponement in the supply chain*, Tesis Doctoral, Massachusetts Institute of Technology.
- SHAO, X.-F. y J.-H. JI (2008), «Evaluation of postponement strategies in mass customization with service guarantees», *International Journal of Production Research*, **46**(1), págs. 153–171.
- SIMÃO, L. E., M. B. GONÇALVES y C. M. T. RODRIGUEZ (2016), «An approach to assess logistics and ecological supply chain performance using postponement strategies», *Ecological indicators*, **63**, págs. 398–408.
- SWAMINATHAN, J. M. y H. L. LEE (2003), «Design for postponement», *Handbooks in Operations Research and Management Science*, **11**, págs. 199–226.
- SWAMINATHAN, J. M. y S. R. TAYUR (1998), «Managing broader product lines through delayed differentiation using vanilla boxes», *Management Science*, **44**(12-part-2), págs. S161–S172.
- TANG, D. (2011), «Managing finished-goods inventory under capacitated delayed differentiation», *Omega*, **39**(5), págs. 481–492.
- VAN HOEK, R. I. (2001), «The rediscovery of postponement a literature review and directions for research», *Journal of operations management*, **19**(2), págs. 161–184.

- WALLER, M. A., P. A. DABHOLKAR y J. J. GENTRY (2000), «Postponement, product customization, and market-oriented supply chain management», *Journal of Business Logistics*, **21**(2), págs. 133–160.
- WANG, S. y C. LIU (2009), «A postponement model to determine the customisation degree applied to the notebook computer industry», *International Journal of Production Research*, **47**(19), págs. 5449–5473.
- WESKAMP, C., A. KOBERSTEIN, F. SCHWARTZ, L. SUHL y S. VOSS (2019), «A two-stage stochastic programming approach for identifying optimal postponement strategies in supply chains with uncertain demand», *Omega*, **83**, págs. 123–138.
- WONG, H., A. POTTER y M. NAIM (2011), «Evaluation of postponement in the soluble coffee supply chain: A case study», *International Journal of Production Economics*, **131**(1), págs. 355–364.
- WU, J., G. DU y R. J. JIAO (2019), «Dynamic Postponement Design for Crowdsourcing in Open Manufacturing: A Hierarchical Joint Optimization Approach», *IIE Transactions*, (just-accepted), págs. 1–31.
- YANG, B., N. D. BURNS y C. J. BACKHOUSE (2004), «Postponement: a review and an integrated framework», *International Journal of Operations & Production Management*, **24**(5), págs. 468–487.
- YAO, J., H. SHI y C. LIU (2020), «Optimising the configuration of green supply chains under mass personalisation», *International Journal of Production Research*, págs. 1–19.
- YU, C., S. MOU, Y. JI, X. XU y X. GU (2018), «A delayed product differentiation model for cloud manufacturing», *Computers & Industrial Engineering*, **117**, págs. 60–70.
- ZHOU, W., R. ZHANG y Y. ZHOU (2013), «A queuing model on supply chain with the form postponement strategy», *Computers & Industrial Engineering*, **66**(4), págs. 643–652.

ZINN, W. (2019), «A historical review of postponement research», *Journal of Business Logistics*, **40**(1), págs. 66–72.

ZINN, W. y D. J. BOWERSOX (1988), «Planning physical distribution with the principle of postponement», *Journal of Business Logistics*, **9**(2).

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Carlos Gustavo Martínez Gómez

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

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

ATRASAMIENTO DE FORMA Y TIEMPO EN LA RED DE
DISTRIBUCIÓN

Nació el 29 de enero de 1993 en Toluca, Estado de México, Hijo de Carlos Gustavo Martínez Rueda y Patricia Romana Gómez Ortiz, Titulado en Ingeniería en Logística en 2018 por parte del Instituto Tecnológico de Toluca, cuenta con 6 meses de experiencia de actividades de almacenaje e inventario.