

**MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN DE
COMPRAS PARA UN SISTEMA MRP CON
RESTRICCIONES DE CONTENERIZACIÓN**

EDGAR FERNANDO ESLAVA FLECHAS

**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2017**

MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN DE COMPRAS PARA UN SISTEMA MRP CON RESTRICCIONES DE CONTENERIZACIÓN

EDGAR FERNANDO ESLAVA FLECHAS

Trabajo de grado para optar el título de
Magíster en Ingeniería Industrial

Director
PhD. IGNACIO PEREZ VELEZ
Ingeniero Industrial

Codirector
Msc. DANILO ABRIL HERNANDEZ
Ingeniero Industrial

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Decanatura de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Industrial
Bogotá D.C., Colombia
2017

© Únicamente se puede usar el contenido de las publicaciones para propósitos de información. No se debe copiar, enviar, recortar, transmitir o redistribuir este material para propósitos comerciales sin la autorización de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Cuando se use el material de la Escuela se debe incluir la siguiente nota “Derechos reservados a Escuela Colombiana de Ingeniería” en cualquier copia en un lugar visible. Y el material no se debe notificar sin el permiso de la Escuela.

Publicado en 2017 por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Avenida 13 No 205 - 59, Bogotá. Colombia
TEL: +57 – 1 668 36 00

RECONOCIMIENTOS O AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por brindarme la sabiduría y la capacidad para enfrentar grandes retos en mi vida personal y profesional, plasmados en el desarrollo de la maestría y especialmente en este proyecto de grado que con gran esfuerzo y dedicación ha finalizado satisfactoriamente.

A mis padres, mi hermano y demás familiares por su amor, apoyo incondicional y su voz de aliento para cumplir con los objetivos trazados y superar las adversidades presentadas a lo largo del tiempo.

Un agradecimiento especial a Ignacio Pérez Vélez director del proyecto y docente de la Universidad, y a Danilo Abril Hernández amigo y codirector del proyecto, quienes me han brindado todo su conocimiento, experiencia y soporte en el desarrollo de este proyecto.

Y para finalizar, este proyecto no habría sido posible si no tuviera presente día a día mi razón de ser y de existir en este mundo, mi hijo Juan Felipe quien me ha venido dando una inmensa alegría desde hace 7 años, es la razón principal por la que cada vez quiero ser una mejor persona, un gran profesional y un ejemplo a seguir.

CONTENIDO

ILUSTRACIONES	6
TABLAS	6
1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	8
2.1. OBJETIVO GENERAL	8
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	8
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	9
4. REVISIÓN ESTADO DEL ARTE	9
4.1. METODOLOGÍA DE REVISIÓN	9
4.2. PLANEACIÓN DE REQUERIMIENTO DE MATERIALES (MRP)	16
4.3. MRP CON DECISIONES DE TRANSPORTE	20
4.4. FENÓMENO DE NERVIOSISMO EN EL MRP	21
5. SISTEMA DE INFORMACIÓN	24
6. MODELO MATEMATICO MRP – CONTENERIZACION	25
6.1. SUPUESTOS DEL MODELO	26
6.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA	27
6.2.1. BALANCE DE INVENTARIOS MATERIAS PRIMAS	29
6.2.2. CAPACIDAD ALMACENAMIENTO MATERIAS PRIMAS	29
6.2.3. BALANCE VOLUMEN CONSUMO MATERIALES - PRODUCTOS FINALES	30
6.2.4. BALANCE VOLUMEN PRODUCCIÓN – ALMACEN PRODUCTOS FINALES	30
6.2.5. BALANCE DE INVENTARIOS PRODUCTO FINAL	31
6.2.6. CAPACIDAD ALMACENAMIENTO PRODUCTOS FINALES	31
6.2.7. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN – PRODUCTOS FINALES	31
6.2.8. COTAS DE REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN	32
6.2.9. ACTIVACIÓN ORDEN DE COMPRA DE MATERIALES POR PROVEEDOR	32
6.2.10. COMPRA DE MATERIALES EN PRECIOS LIMITE CON DESCUENTO	33
6.2.11. ACTIVACIÓN ORDEN DE COMPRA CON DESCUENTO	33
6.2.12. RESTRICCIONES DE CONTENERIZACIÓN	33
6.2.13. FUNCIÓN OBJETIVO	34
6.2.14. RESTRICCIONES NO NEGATIVIDAD Y VALOR BINARIO	34
7. ANALISIS DE RESULTADOS	35

7.1.	TIEMPOS DE EJECUCIÓN	35
7.2.	RESULTADOS MODELO	36
7.3.	EVALUACIÓN DE ESCENARIOS	40
8.	VENTAJAS MODELO MRP - C	42
9.	CONCLUSIONES	42
10.	RECOMENDACIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA	43
11.	BIBLIOGRAFIA	44
12.	ANEXOS	46

ILUSTRACIONES

<i>Distribución de artículos MRP publicados por año.</i>	10
<i>Distribución de artículos por análisis de decisiones en modelos MRP.</i>	11
<i>Distribución de artículos MRP por restricciones de modelos de tamaño de lote.</i>	11
<i>Número de artículos por revista científica.</i>	12
<i>Esquema agentes involucrados modelo MRP - C.</i>	26
<i>Esquema balance de inventario de materias primas</i>	29
<i>Balance de flujo volumen de producción - productos finales.</i>	30
<i>Balance de inventario productos finales.</i>	31
<i>Esquema restricción de activación de compra y contenerización.</i>	33
<i>Costo de compra de materias primas por periodo.</i>	37
<i>Costo de inventario por periodo de planeación.</i>	37
<i>Número de órdenes de compra de materias primas por periodo</i>	38
<i>Cantidad total de compra de materias primas.</i>	38
<i>Compra de materias primas MP-4 y MP-15 sistema real vs modelo MRP-C.</i>	39
<i>Cantidad de compra materia prima por contenedor en Almacén PER</i>	39
<i>Cantidad de compra materia prima por contenedor en Almacén COL</i>	39
<i>Costo total del sistema por periodo en los escenarios</i>	41
<i>Costo de compra y producción por periodo de los escenarios.</i>	42

TABLAS

<i>Tabla 1. Resumen revisión de literatura por rango de años.</i>	10
<i>Tabla 2. Descripción modelos de tamaño de lote (Lot Sizing).</i>	12
<i>Tabla 3. Resumen del estado del arte MRP.</i>	15
<i>Tabla 4. Descripción modelos de optimización.</i>	15
<i>Tabla 5. Descripción variaciones modelos tamaño de lote.</i>	16
<i>Tabla 6. Estudios de nerviosismo en sistemas MRP.</i>	23
<i>Tabla 7. Estructura sistema de información modelo MRP-C.</i>	25
<i>Tabla 8. Costo total modelo MRP - C vs sistema real</i>	36
<i>Tabla 9. Tiempos de computación análisis de escenarios.</i>	40
<i>Tabla 10. Costos detallados por escenario (\$USD)</i>	40
<i>Tabla 11. Variación porcentual costos escenarios vs costo real.</i>	41

1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos en el mercado global y el acelerado desarrollo que se ha venido presentando en las organizaciones demandan de manera continua la implementación de sistemas de soporte de decisiones (DSS, por sus siglas en inglés) con el objetivo de minimizar los costos de operación y/o maximizar las utilidades a lo largo de la cadena de abastecimiento, mediante decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo.

En la actualidad, las compañías deben enfrentar grandes cambios y variabilidad en el comportamiento de los mercados y la demanda, debido al crecimiento competitivo, altos costos en la cadena de producción, logística y transporte, cortos ciclos de vida de los productos y un cambio radical en el comportamiento del cliente que se representa en la complejidad del mercado. Los principales retos de las organizaciones apuntan a cumplir las órdenes de compra de los clientes manteniendo óptimos niveles de inventario, menores tiempos de entrega, un alto nivel de servicio y bajos costos operativos.

Los DSS se soportan en modelos matemáticos que están inmersos y/o vinculados con sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*), compuestos por planes maestros de producción (MPS), planeación de pronósticos de demanda, planeación de requerimientos de materiales (MRP I) y de manufactura (MRP II), definición de políticas de inventario y definición de las órdenes de compras y producción. Esto permite tomar decisiones de una manera integrada con todos los agentes de la cadena de abastecimiento con el objetivo de acercarse a los planes de requerimientos de oferta y demanda definidos.

En su forma clásica, el MRP es una técnica de planeación y control de inventario, desarrollada para cubrir demanda de inventarios dependientes. Un sistema MRP consiste en tres componentes básicos: Plan maestro de producción (MPS), una lista de materiales (BOMs) de los productos finales y gestión de inventarios de materiales, componentes, partes y productos finales (Orlicky, 1975).

El MRP es considerado a menudo como un método para coordinar los planes de producción detallada que involucran uno o varios productos, sub-ensambles componentes y/o materiales. Su estructuración se consolida a partir del plan maestro de producción (MPS) de uno o varios productos finales, que se traduce en cantidades conocidas de componentes y tiempos necesarios de producción basado en la explosión o listado de materiales (BOMs) y la información de los tiempos de entrega donde se visualizan varias dificultades como la incertidumbre del tiempo de entrega (lead time), disponibilidad de los materiales y la demanda. Según (Rota, et al., 1997) un sistema MRP tiene como función principal activar las órdenes de suministro desde los proveedores, de subcontratación y las órdenes de producción con el fin de cumplir los requerimientos de demanda de sistemas de manufactura multi-producto y multi-nivel y multi-periodo.

Por consiguiente, autores como (Billington, et al., 1983), (Stadtler, 1995), (Rota, et al., 1997), (Clark, 2002), (Yenisey, 2005), (Mula, et al., 2005), (Gharakhani, 2011) y (Madroñero, et al., 2015), entre otros, materializaron los conceptos del MRP a través del diseño de modelos de programación matemática con el fin de obtener soluciones óptimas que busquen minimizar los costos operativos. La definición y estructuración de estos modelos se construyen a partir de restricciones de políticas de inventarios, gestión de compras y tamaños de lote, planeación de

la producción y demanda, que brindan soluciones específicas en la toma de decisiones de las organizaciones industriales.

En la estructuración de un modelo para un sistema MRP se pueden evaluar restricciones de transporte y contenerización de materias primas que permitan tomar decisiones con diferentes combinaciones de pequeños y/o grandes envíos de carga y generar menores costos de distribución y/o abastecimiento. Autores como (Lee, et al., 2005) desarrollaron un modelo de tamaño de lote dinámico considerando simultáneamente el tamaño de la orden de compra de producto y un tipo estándar de transporte, por cada orden de compra montada en un periodo de tiempo, esta es inmediatamente enviada en contenedores con capacidad limitada y el costo es proporcional al número de contenedores usados; debido a la complejidad del modelo se propuso un algoritmo heurístico y se analiza el rendimiento del mismo mediante experimentos de simulación, los resultados obtenidos presentan eficiencias en problemas de menor tamaño y altas probabilidades de funcionar eficientemente en sistemas reales.

Finalmente, en la logística de transporte se encuentran algunas ventajas en la consolidación de carga mediante la combinación de varios pedidos ya que puede reducir su costo total de transporte, sin embargo, se deben tener en cuenta algunas variables como características del producto y del transporte, zonas geográficas (origen – trayecto – destino), solicitudes específicas del cliente, entre otros, y para ello, es fundamental establecer políticas y estrategias de entrega de carga consolidada que conlleven a reducir costos de transporte e inventarios, cumplir nivel de servicio solicitado por el cliente, minimizar daños y pérdidas de la carga, mejorar la utilización de los equipos y los recursos de transporte (Higginson & Bookbinder, 1994).

La contenerización de las mercancías permite a las organizaciones obtener flexibilidad de los espacios y eficiencia de distribución obteniendo ventajas de estandarización, flexibilidad en almacenamiento, disminución de costos, mayor velocidad y seguridad del producto (Rodrigue & Notteboom, 2013).

2. OBJETIVOS Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo matemático que conlleve a la optimización de compras bajo un enfoque MRP con restricciones de contenerización, que permita minimizar los costos de gestión de inventarios, proceso de compras, producción y transporte.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 2.2.1. Desarrollar una revisión de la literatura académica de los modelos matemáticos diseñados para sistemas MRP y el efecto del fenómeno de nerviosismo en dichos modelos, de tal manera, que se pueda estructurar un modelo pertinente a las condiciones reales de las organizaciones.
- 2.2.2. Diseñar el modelo matemático de planeación de requerimiento de materiales con restricciones de balance de inventarios, reglas de negociación de compra,

requerimientos de producción, penalización por demanda no cumplida (backorder) y restricciones de contenerización que permitan minimizar los costos totales de operación.

- 2.2.3. Analizar los resultados obtenidos a partir del modelo matemático mediante software de optimización, teniendo en cuenta los costos y variables de solución en comparación con los datos y costos reales de una organización.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cómo diseñar y programar un modelo matemático que permita realizar una toma de decisiones enfocada a la optimización de compras para un sistema de planeación de requerimiento de materiales (MRP) que incluya restricciones de contenerización de tal manera que al consolidar los contenedores por proveedor se pueda optimizar la capacidad de uso de transporte y por ende minimizar los costos de adquisición, mantenimiento y transporte de materiales, y de esta manera pueda brindarle soluciones factibles en su gestión de la cadena de abastecimiento?

4. REVISIÓN ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presenta una revisión a la literatura académica de los modelos matemáticos diseñados para un sistema de planeación de requerimientos de materiales (MRP), abordando modelos con diferentes restricciones enfocadas a decisiones de compras, inventarios, transporte, entre otros, que permitan determinar la importancia que tiene dentro de una organización un modelo matemático de optimización de compras con restricciones de contenerización.

4.1. METODOLOGÍA DE REVISIÓN

Se utilizó una metodología de revisión de literatura descriptiva para hacer un análisis del desarrollo e implementación de modelos de optimización en sistemas MRP. Mediante un procedimiento cronológico como guía para el análisis, se presentan las contribuciones y referencias bibliográficas.

La búsqueda de artículos científicos y revisiones de literatura sobre los modelos de optimización en sistemas MRP se realizó a través de las principales bases de datos especializadas como Science Direct, JStor, Scopus, EBSCOHost. Los filtros de búsqueda de texto utilizados fueron: Planeación de requerimiento de materiales, modelos de optimización, modelos de compras, tamaño de lote, programación lineal, etc.

El proceso de búsqueda permitió seleccionar 102 artículos de revistas científicas, se presenta un resumen de revisión de la literatura, la distribución por análisis de otras decisiones del MRP y restricciones de los modelos de tamaño de lote (Lot Sizing) en sistemas MRP:

FECHA	N° ARTÍCULOS
1975-1980	3
1981-1985	4
1986-1990	3
1991-1995	7
1996-2000	12
2001-2005	18
2006-2010	23
2011-2016	32

Tabla 1. Resumen revisión de literatura por rango de años.
Fuente: Información propia.

En la *Tabla 1* e *Ilustración 1* se presenta la información del número de artículos publicados cada 5 años desde 1975 hasta 2016.

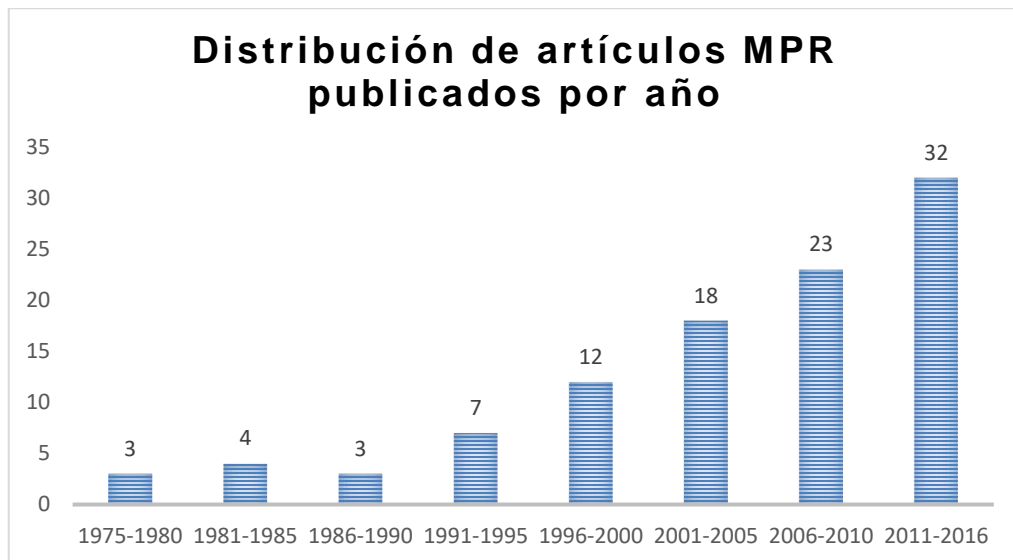
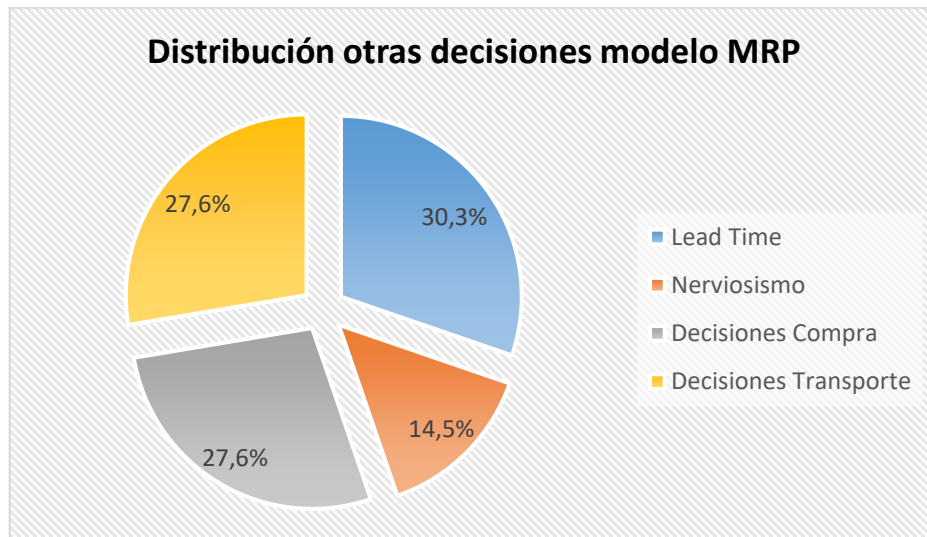


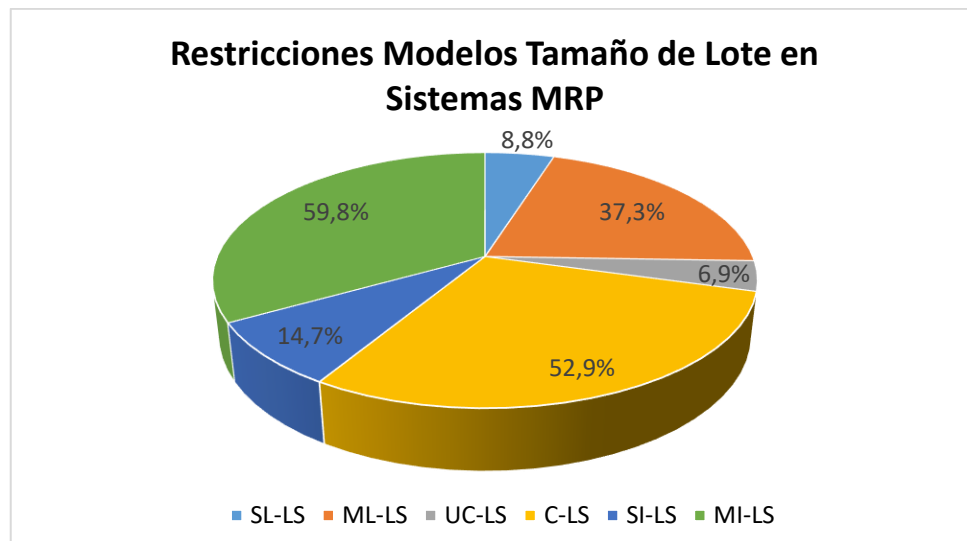
Ilustración 1. Distribución de artículos MRP publicados por año.
Fuente: Información Propia.

En la *Ilustración 2* se visualiza el porcentaje de artículos en los cuales los sistemas MRP incluyen decisiones sobre: a) Tiempos de entrega, b) Compras (volúmenes e instantes de lanzamiento), d) Transporte, y e) nerviosismo.



*Ilustración 2. Distribución de artículos por análisis de decisiones en modelos MRP.
Fuente: Información Propia.*

La *Ilustración 3* presenta la distribución porcentual de los modelo de tamaño de lote para el sistema MRP, clasificados por: 1) Nivel (único nivel o múltiple nivel de compra o producción), 2) Capacidad (modelo con o sin restricciones de capacidad de compra o producción) y 3) Producto (modelo para un solo producto o varios productos); finalmente, en la *Ilustración 4* se presenta el número de artículos analizados por revista científica encontrada en las bases de datos.



*Ilustración 3. Distribución de artículos MRP por restricciones de modelos de tamaño de lote.
Fuente: Información Propia.*

NIVEL		CAPACIDAD		PRODUCTOS	
SL-LS	ML-LS	UC-LS	C-LS	SI-LS	MI-LS
Tamaño de Lote Único Nivel	Tamaño de Lote Múltiple Nivel	Tamaño de Lote sin Capacidad	Tamaño de Lote con Capacidad	Tamaño de Lote Único Producto	Tamaño de Lote Múltiple Producto

Tabla 2. Descripción modelos de tamaño de lote (Lot Sizing).
Fuente: Información Propia

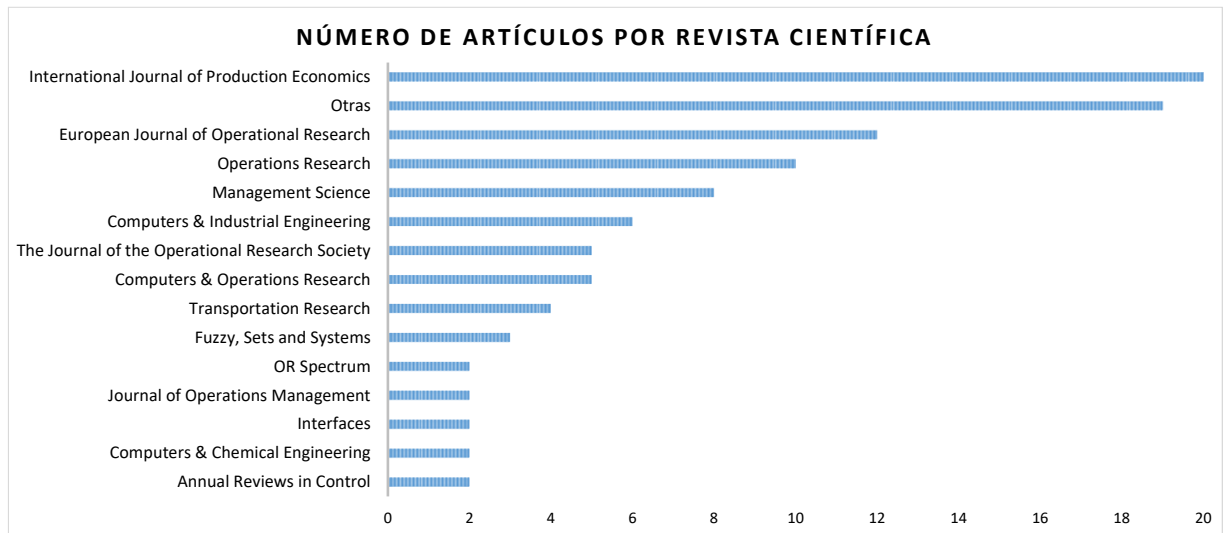


Ilustración 4. Número de artículos por revista científica.
Fuente: Información Propia

En la *Tabla 3* se presenta el resumen detallado de la revisión bibliográfica de cada artículo científico analizado.

Año	Autor	Restricciones											Método Solución		
		LEVEL		CAPACITATED		ITEM		Lead Time	Nervio sismo	Decisión Compra	Decisión Transporte	Modelo Matemático	Exacto	Heurística	Meta-Heurística
		SL-LS	ML-LS	UC-LS	C-LS	SI-LS	MI-LS								
	Porcentaje Distribución Artículos	8,8%	37,3%	6,9%	52,9%	14,7%	59,8%	22,5%	10,8%	20,6%	20,6%		21,6%	46,1%	6,9%
1975	J. Orlicky (1975)											MRP			
1979	Robert C. Carlson, James V. Jucker and Dean H. Kropp (1979)	X		X		X			X			W-W Algoritmo	X		
1980	Earle Steinberg, Albert Napier (1980)		X		X		X					MIP		X	
1982	John O. McClain, William L. Maxwell, John A. Muckstadt, L. Joseph Thomas and Elliott N. Weiss (1982)		X				X					MILP		X	
1983	Peter J. Billington, John O. McClain and L. Joseph Thomas (1983)		X		X		X	X				ILP		X	
1984	Harish C. Bahl and Larry P. Ritzman (1984)		X		X		X	X				MINLP		X	
	Dean H. Kropp and Robert C. Carlson (1984)		X			X			X			W-W Algoritmo	X		
1986	Joseph D. Blackburn, Dean H. Kropp and Robert A. Millen (1986)								X			W-W Algoritmo	X		
1987	Harish C. Bahl, Larry P. Ritzman and Jatinder N. D. Gupta (1987)	X	X	X	X	X	X					W-W, SM, otros		X	
1989	T.C.E Cheng, S.Li (1989)											W-W, SM, otros		X	
1993	Maria Grazia Speranza, Walter Ukovich (1993)										X	MILP			
	Moustapha Diaby and Alain Martel (1993)									X	X	MILP		X	
1994	Nejib Ben-Khedher, Candace A. Yano (1994)				X		X				X	MIJR		X	
1995	Sydney C.K. Chu (1995)						X					LP	X		
	Hartmut Stadler (1995)		X		X		X					MILP		X	
	Sukran N. Kadipasaoglu, V. Sridharan (1995)		X						X			EOQ, SM	X		
	Candace Arai Yano and Hau L. Lee (1995)											W-W, SM, EOQ	X		
1996	Anders Segerstedt (1996)		X				X	X	X			LP			
	Horst Tempelmeier, Matthias Derstroff (1996)		X	X			X					MILP		X	
	K. S. Hindi (1996)	X			X		X					MIP		X	
	Chia-Shin Chung, Sin-Hoon Hum, Omer Kirca (1996)						X			X		MIP		X	
1997	K. Rota, C. Thierry, G. Bel (1997)		X		X		X			X	X	MILP		X	
	Xiande Zhao, Kokin Lam (1997)		X						X			EOQ, SM, otros	X		
1998	W.E. Wilhelm, Pradip Som (1998)	X				X		X				EOQ	X		
1999	Jamal Ouenniche, Fayez F. Boctor (1999)		X		X		X					LP		X	
	Chrwany-jyh Ho and Shih-Jen Kathy Ho (1999)							X	X			EOQ, PPB, otros	X		
2000	Reinaldo Morabito, Silvia Regina Morales, Joao Alexandre Widmer (2000)										X	Formulas	X		
	Vassilis Moustakis (2000)											MRP			
2001	Gaetan Belvaux, Laurence A. Wolsey (2001)		X		X		X					MIP		X	
	K.H. van Donselaar, B.J. Gubbels (2001)								X			POQ, FOQ, otros	X		
	S.N. Sanchez, E. Triantaphyllou, D.B. Webster, T.W. Liao (2001)			X			X					FOQ, LFL, otros		X	
2001	Yves Pochet (2001)		X		X		X					MIP		X	
2002	Sila Cetinkaya, James H. Bookbinder (2002)										X	Algoritmos		X	
	Alistair R. Clark (2002)		X		X		X					MIP		X	
	Chung-Yee Lee, Sila Cetinkaya, Wikrom Jaruphongsa (2002)				X						X	MILP		X	
2003	B. Karimi, S.M.T. Fatemi Ghomi, J.M. Wilson (2003)	X			X	X						MILP		X	

	Chung-Lun Li, Vernon Ning Hsu, Wen-Qiang Xiao (2003)			X						X	BOELP		X	
	Gail Hohner, John Rich, Ed Ng, Grant Reid, Andrew J. Davenport, Jayant R.Kalagnanam, Ho Soo Lee and Chae An (2003)						X			X	MIP			
	Osman Alp, Nesim K. Erkip and Refik Güllü (2003)				X	X		X			MILP		X	
	Deniz Aksen, Kemal Altinkemer, Suresh Chand (2003)			X		X					W-W Algoritmo		X	
2004	Alex Bangash, Ramesh Bollapragada, Rachele Klein, Narayan Raman, Herbert B. Shulman and Donald R. Smith (2004)										IRP			
	Chung-Piaw Teo and Jia Shu (2004)									X	MIP		X	
2005	Johnny C. Ho, Adriano O. Solis, Yih-Long Chang (2005)	X		X		X					LP		X	
	Mehmet Mutlu Yenisey (2005)		X		X		X	X			MILP	X		
	Woon-Seek Lee, Jong-Han Han, Sung-Jin Cho (2005)				X		X			X	MILP		X	
	Linda van Norden, Steef van de Velde (2005)				X		X	X		X	MILP	X		
2006	J. Mula, R. Poler, J.P. Garcia-Sabater (2006)		X		X		X	X			MILP			X
	M.A. Hoque, B.G. Kingsman (2006)		X		X		X				Algoritmos		X	
2006	Sila C., Etinkaya, Eylem Tekin, Chung-Yee Lee (2006)				X		X	X		X	Algoritmos		X	
	Julien Briton, Cédric Hutt (2006)		X		X		X				MIP		X	
2007	Vincent A. Mabert (2007)										MRP			
	J. Mula, R. Poler, J.P. Garcia-Sabater (2007)		X		X		X	X			MILP			X
2007	Alexandre Dolgui, Caroline Prodhon (2007)							X	X		MRP			
	Awı Federgruen, Joern Meissner and Michal Tzur (2007)				X		X	X			MILP		X	
	Najla Aissaoui, Mohamed Haouari, Elkafi Hassini (2007)										MRP			
	Zhiying Liao, Jens Rittscher (2007)									X	X		PMP	X
2008	Charles Sung, Christos T. Maravelias (2008)	X			X		X	X			MIP			
	Ozden Ustun, Ezgi Aktar Demirtas (2008)	X					X			X	MOMILP		X	
2009	G. P. Kiesmuller (2009)				X		X			X	X	Algoritmos	X	
	Can Yildirmaz, Selçuk Karabati, Serpil Sayin (2009)					X				X		Algoritmos	X	
	Florian Sahling, Lisbeth Buschkuhl, Horst Tempelmeier, Stefan Helber (2009)		X		X		X	X			MILP		X	
	Bhaba R. Sarker, Ahmad Diponegoro (2009)		X		X		X	X		X	MINLP	X		
	A. Akbalik, Y. Pochet (2009)				X	X					MILP		X	
	Charles R. Sox, Peter L. Jackson, Alan Bowman, John A. Muckstadt (1999)		X		X		X				Algoritmos	X		
	Zhang Kun, Li Zhuang, Teng Guo Ku (2009)										W-W Algoritmo	X		
2010	Christian Almeder (2010)		X		X		X				MILP			X
	Robert W. Grubbstrom, Marija Bogataj, Ludvik Bogataj (2010)		X				X				Algoritmos		X	
	Hark-Chin Hwang (2010)				X	X				X	Algoritmos	X		
	V.S. Tonaki and F.M.B Toledo (2010)				X		X				MIP		X	
	C. Oztürk, A.M. Ornek (2010)		X		X		X	X			MIP			
2011	Emre Sancak, F. Sibel Salman (2011)				X		X			X	X	MIP		X
	Devendra Choudhary, Ravi Shankar (2011)					X				X		MIP		
	Tao Wu, Leyuan Shi, Joseph Geunes, Kerem Akartunalı (2011)		X		X		X			X		MILP		X
	Davood Gharakhani (2011)				X		X					PMP		
	Bregni Alfredo; Davino marco & Schiraldi Massimiliano m. (2011)								X			MRP		
	Jafar Rezaei, Mansoor Davoodi (2011)				X		X			X		MOMINLP		X
	R Fildes and B Kingsman (2011)											Algoritmos	X	
2012	Martin Darío Arango, Jose Alejandro Cano, Karla Cristina Álvarez (2012)		X		X		X			X		MILP		
	Cemalettin Öztürk, Arslan M. Örnek (2012)		X		X		X	X		X		MIP		X
	Huseyin Tunc, Onur A. Kilic, S. Armagan Tarim, Burak Eksioglu (2012)								X			Algoritmos		
	RJ Milne, C-T Wang, C-KA Yen and K Fordyce (2012)		X				X					LP		X

	Gómez-Herrera Juan Alejandro, Figueroa-Cabrera Álvaro, Escobar John Willmer (2012)			X		X					MILP			
	Stefan Helber, Florian Sahling, Katja Schimmelpfeng (2012)	X		X		X					MILP		X	
	Robert W. Grubbstrom, Ou Tang (2012)		X			X					Algoritmos			
	Romain Guillaume, Przemysław Kobylanski, Paweł Zielinski (2012)				X						MIP		X	
	George Ioannou, Stavrianna Dimitriou (2012)		X	X		X	X				Algoritmos		X	
2013	Mohamed-Aly Louly, Alexandre Dolgui (2013)				X		X				Algoritmos	X		
	Devendra Choudhary, Ravi Shankar (2013)			X	X			X	X		MILP			
	Hartmut Stadler, Florian Sahling (2013)		X	X		X	X				MILP		X	
2014	Christoph H. Glock, Eric H. Grosse, Jörg M. Ries (2014)										Lot Sizing			
	Giuseppe Bruno, Andrea Genovese, Carmela Piccolo (2014)			X		X			X		MILP			
	Shine-Der Lee, Yen-Chen Fu (2014)			X		X		X	X		DLSP	X		
2015	R. John Milne, Santosh Mahapatra, Chi-Tai Wang (2015)		X	X		X	X				MIP			
	Horst Tempelmeier, Timo Hilger (2015)			X		X					DLSP		X	
	Manuel Díaz-Madroño; Josefa Mula, Mariano Jiménez (2015)		X	X		X					PLIMOF			
	Christian Almeder, Diego Klabjan, Renate Traxler, Bernardo Almada-Lobo (2015)		X	X		X	X		X		MILP			
	Haoxun Chen (2015)		X	X		X					MIP			X
	Leopoldo Eduardo Cárdenas-Barrón, José Luis González-Velarde, Gerardo Treviño-Garza (2015)					X			X		MILP			X
2016	Julia Funke; Herbert Kopfer (2016)									X	MICT			
	Joohyun Shin, Jay H. Lee (2016)					X					MILP		X	
	Watcharapan Sukkerd, Teeradej Wuttipornpun (2016)		X	X		X					LP			X
	Fanny Hein, Christian Almeder (2016)			X		X			X	X	CLSVRP			

Tabla 3. Resumen del estado del arte MRP.

Fuente: Información Propia

SIGLAS	DESCRIPCIÓN
MIP	Programación Entera Mixta
ILP	Programación Lineal Entera
MILP	Programación Lineal Entera Mixta
MINLP	Programación No Lineal Entera Mixta
W-W Algoritmo	Algoritmo Wagner – Within
SM Algoritmo	Algoritmo Silver Meal
MIJR	Aprovisionamiento Multi-producto Conjunto
BOELP	Problema de tamaño de lote económico de pedido por bache
IRP	Planeación de Requerimiento de Inventario
PMP	Programación Multi – Objetivo
MOMILP	Programación Lineal Entera Mixta Multi – Objetivo
GP	Programación por Objetivos
MOMINLP	Programación no Lineal Entera Mixta Multi – Objetivo
DLSP	Problema de tamaño de lote dinámico
PLIMOF	Programación Lineal Entera Multi - Objetivo Dispersa
MICT	Problema de transporte interno de contenedores multi-tamaño
CLSVRP	Problema integrado de ruteo de vehículos desde Abastecimiento y tamaño de lote capacitado

Tabla 4. Descripción modelos de optimización.

Fuente: Información Propia

SIGLAS	DESCRIPCIÓN
SL-LS	Tamaño de Lote Único Nivel
ML-LS	Tamaño de Lote Múltiple Nivel
UC-LS	Tamaño de Lote sin Capacidad
C-LS	Tamaño de Lote con Capacidad
SI-LS	Tamaño de Lote Único Producto
MI-LS	Tamaño de Lote Múltiple Producto

Tabla 5. Descripción variaciones modelos tamaño de lote.
Fuente: Información Propia

4.2. PLANEACIÓN DE REQUERIMIENTO DE MATERIALES (MRP)

La literatura de los modelos, métodos y sistemas de planeación de requerimiento de materiales inicia en el año 1970 mediante las primeras publicaciones realizadas por la Sociedad Americana de Control de Producción e Inventarios (American Production and Inventory Control Society - APICS) por parte de profesionales como J. Orlicky, O. Wight, G. Plossl y W. Goddard.

A mediados de los 70' (Orlicky, 1975) establece los primeros conceptos y relaciona técnicas asociadas a la planeación de requerimiento de materiales, entre ellas el modelo (Wagner & Whitin, 1958) que permite determinar el tamaño de lote dinámico en condiciones de demanda determinística. Inicialmente, esta técnica no encontraba soluciones óptimas a problemas de programación de producción en sistemas reales, debido a la sensibilidad de la solución ante cambios en las estimaciones de valores futuros de los parámetros del sistema, entre ellas la demanda. Este fenómeno es conocido como nerviosismo en el MRP (Carlson, et al., 1979), la sensibilidad de este fenómeno tuvo mejores resultados a partir de la implementación de heurísticas como Silver Meal, costo unitario mínimo, periodo parcial de equilibrio, entre otros.

El MRP es definido por (Orlicky, 1975) como una técnica de planeación y control de inventario, desarrollada para cubrir la demanda de los productos dependientes y por tanto, es un sistema de gestión de información usado comúnmente en la industria para determinar la programación de la producción en sistemas multi-nivel y multi-producto.

(Grubbstrom & Tang, 2011) usa cuatro fuentes de información para determinar la cantidad de materiales a ser ordenados y cuando deben colocarse las órdenes de compra/producción (Moustakis, 2000):

1. El Plan Maestro de Producción (MPS) que describe cuando un producto es programado para ser manufacturado.
2. El Listado de Materiales (BOM's) que detalla las partes de materiales requeridas para fabricar cada producto.
3. Los Tiempos de ciclos de producción y necesidades de materiales de cada fase del ciclo de producción.
4. Los Tiempos de entrega (Lead Time) de proveedores.

El plan maestro y el listado de materiales indican que materiales deberían ser ordenados; el plan maestro, los tiempos de ciclo de producción y los tiempos de entrega de los proveedores determinan en conjunto cuando deben ser colocadas las órdenes.

El MPS es la programación de requerimientos de producto elaborado a partir de las órdenes de los clientes y los pronósticos de demanda, esto es una lista de demanda de productos finales en cada uno de los periodos de tiempo sobre el horizonte de planeación. A partir del MPS, se derivan los requerimientos de partes y componentes que son obtenidos del BOM's, el neto de

requerimientos de materiales son computados y finalmente las órdenes de compras son colocadas (Cheng & Li, 1990).

Generalmente estos elementos trabajan bien para un ambiente determinístico. Sin embargo, con el fin de adaptar un modelo a un ambiente de incertidumbre se deben incluir otros parámetros:

- Inventario de seguridad
- Planeación de tiempos de entrega
- Reglas de tamaño de lote
- Congelación del MPS
- Horizonte de Planeación

Los inventarios de seguridad y la planeación de los tiempos de entrega son importantes para la producción, ya que tienen como objetivo eludir los factores aleatorios. Tiene un impacto doble en el sistema: reduce el riesgo de escasez y aumenta el costo; por lo tanto, se debe minimizar los costos de escasez y mantenimiento de inventario, y cumplir satisfactoriamente con el nivel de servicio.

Las decisiones de reglas de tamaño de lote permiten minimizar los costos de operación, los pedidos lote por lote (LFL), es decir, los requerimientos de pedidos necesarios para cubrir sólo las necesidades netas de un periodo permiten reducir el inventario, sin embargo, no toma en consideración los aspectos económicos y las limitaciones de la organización, es decir, los costos y restricciones de capacidad de ordenar, respectivamente.

En algunas ocasiones, los costos de pedido son mayores a los de mantenimiento, por lo tanto, el tamaño del lote es importante. Las principales reglas de tamaño de lote son:

- Cantidad de pedido económico (EOQ)
- Cantidad de pedido periódico (POQ)
- Algoritmo de Wagner – Within (W-W)

El algoritmo W – W (Wagner & Whitin, 1958) es un proceso que determina el costo de pedido mínimo para una demanda determinística dinámica sin restricciones de capacidad. Dado que este algoritmo consume mucho tiempo para problemas de tamaño real, varias heurísticas han sido desarrolladas:

- Heurística Silver Meal (SM)
- Costo unitario mínimo (LUC)
- Periodo parcial de equilibrio (PPB)

La implementación de esta técnica en los diferentes ambientes industriales no contemplaba un proceso de optimización. Para ello autores como (Segerstedt, 1996) utilizaban fórmulas básicas que permitían realizar los cálculos de los requerimientos de materiales. Sin embargo, con el objetivo de obtener soluciones óptimas enfocadas a la minimización de costos, autores como (Billington, et al., 1983) y (Rota, et al., 1997) diseñaron modelos asociados a sistemas MRP utilizando la programación matemática. El primer autor estableció un MRP determinístico de minimización de costos con restricciones de capacidad, mientras que el segundo formuló un modelo MRP con restricciones de tamaño de lote (lot sizing), estos modelos serán referenciados y analizados más adelante.

Igualmente, se fueron desarrollando modelos aplicados a sistemas de producción de múltiple nivel (sistemas precedentes) y múltiples productos (Steinberg & Napier, 1980). Pero, ante la ausencia de resultados óptimos, (McClain, et al., 1982) desarrollaron un modelo MRP a partir de la programación matemática con restricciones en los sistemas de producción y objetivos de minimización de costos como alternativa al modelo de Steinberg y Napier. (Bahl & Ritzman, 1984) propusieron un modelo que integraba al MRP el plan maestro de producción, y las decisiones de tamaño de lote permitiendo decisiones integrales en sistemas productivos.

Una decisión importante en los modelos MRP es determinar los tamaños de lotes de producción a partir de los requerimientos netos. El problema de determinar las cantidades de partes a ser procesadas en un bache de producción y sus tiempos de operación hacen referencia al *problema de tamaño de lote* definido por (Wagner & Within, 1958). Los supuestos básicos de este problema son:

- La demanda es conocida sobre el horizonte de planeación finito de N periodos.
- La demanda debe ser satisfecha en el periodo en que esta ocurre y no se permiten faltantes.
- No hay lead time de producción y los materiales están disponibles para cubrir la demanda en el mismo periodo en que un bache es producido.
- El costo de almacenar es una función lineal del tamaño del inventario y es independiente del tiempo.
- El costo de mantener inventario incurre solo al final del periodo de inventarios.

En relación a los problemas de tamaños de lote, se diseñaron heurísticas para problemas de único nivel sin restricciones de capacidad (Kropp & Carlson, 1984); en contraste, apareció el problema de tamaño de lote económico restringido (ELSP) que considera múltiples productos pero limitado a tasas de demanda constante (Elmargharby, 1978). Sin embargo, para eliminar estas limitaciones se estableció el problema de tamaño de lote con capacidad (CLSP) en donde la demanda varía periódicamente, y el objetivo es determinar un nivel de producción para cada producto en cada periodo del horizonte de planeación (Diabi, et al., 1993).

Por otro lado, (Steinberg & Napier, 1980) estructuraron un sistema de inventarios y producción multi-nivel y multi-producto en un horizonte de planeación visualizando la complejidad de las iteraciones en las decisiones de tamaños de lote para todos los componentes del sistema mediante una red generalizada de arcos y nodos. Este modelo implica establecer un gran número de restricciones para " n " cantidad de componentes, que genera una solución compleja del modelo. Para ello, (McClain, et al., 1982) propusieron una mejora al modelo reduciendo el número de restricciones para la producción de cada " i " producto, aproximadamente a la mitad de las definidas en el modelo de Steinberg & Napier.

Para hacer aún más real la implementación de un modelo matemático en la toma de decisiones de un sistema MRP, (Billington, et al., 1983) estructuraron un modelo matemático de programación lineal entera mixta que tiene en cuenta los costos de configuración y "overtime" de producción incluyendo en el modelo restricciones de capacidad para cada línea de producción. Los tiempos de entrega en producción son analizados detalladamente ya que pueden generar infactibilidad al modelo. Las decisiones de tamaño de lote (Wagner & Within, 1958) también se podrían desarrollar a partir de heurísticas, como la propuesta por (Cheng & S.Li, 1989), obteniendo resultados óptimos pero con limitaciones a un problema de tamaño de lote de único nivel que requiere varias corridas para una gran lista de materiales (BOMs).

Los tiempos de configuración y producción del sistema analizado implican una definición clara del modelo dependiendo del sistema de producción y secuenciación. Un proceso de ensamble puede tener tiempos de esperar mínimos que pueden asumirse como cero, pero existen sistemas en que la siguiente etapa de producción puede tardar días o semanas, haciendo más complejo el modelo; (Stadtler, 1995) propone la solución de un problema de tamaño de lote con capacidad multi-producto multi-nivel dinámico (MLCLSP) similar al modelo de (Billington, et al., 1983), con la diferencia de no incluir el tiempo de entrega en el proceso de producción; los resultados obtenidos en comparación con otros modelos y la implementación de heurísticas para su solución mostraron una gran ventaja en sus tiempos de solución.

(Rota, et al., 1997) integró al problema de tamaño de lote restringido (CLSP) otras restricciones de mayor naturaleza de incertidumbre y complejidad en el ambiente industrial, tales como el pronóstico de demanda y oferta, adicional a ello, se incluyó el análisis de variaciones al modelo estándar, así como también la inclusión de restricciones de subcontratación y gestión de proveedores. Por otro lado, (Clark, 2002) realizó una aproximación de optimización a la planeación de requerimiento de materiales utilizando una solución heurística "relax and fix" (búsqueda branch & bound) y (Ho, et al., 2005) realizó una evaluación de los efectos de inventario deteriorado en la determinación de los tamaños de lote para un sistema MRP.

La incertidumbre generada en la definición y aplicación de los modelos en las industrias u organizaciones, permitieron que autores como (Mula, et al., 2005) y (Mula, et al., 2007) estructuraran modelos de programación matemática con restricciones y coeficientes difusos. De esta manera, (Dolgui & Prodhon, 2007) realizaron un estado del arte de sistemas MRP bajo ambiente de incertidumbre en la planeación, esto incluye demanda y/o tiempos de entrega aleatoria de alta importancia en sistemas de producción de ensamble. Adicional a ello, (Aissaoui, et al., 2007) e (Ustun & Demirtas, 2008) incluyeron en su revisión de la literatura políticas y modelos de selección de proveedores.

A partir del año 2010 y hasta la fecha, las publicaciones basadas en modelos MRP tienen la característica de generar mejores resultados del esquema matemático definido cuando se incluyen métodos de optimización como heurísticas, meta-heurísticas, métodos exactos y en algunos casos modelos híbridos (Almeder, 2010).

Un análisis más completo de la cadena de abastecimiento fue desarrollado por (Hwang, 2010) al integrar el problema de tamaño de lote económico con decisiones de operación de producción y transporte, modelando economías de escala en los sistemas de producción y el efecto de la consolidación de carga en el transporte. Así mismo, (Sancak & Salman, 2011) diseñaron un modelo de tamaño de lote dinámico multi-producto con políticas de transporte con retrasos, es decir, una entrega de una carga o compra establecida con el proveedor menor a la capacidad full del camión en el siguiente periodo, y utilizando las existencias de seguridad si fuese necesario. Los resultados mostraron que la política propuesta reduce los costos de inventario y transporte sin generar riesgo de agotados.

La planeación de requerimiento de materiales también puede evaluarse con otros métodos de optimización, por ejemplo, el modelo de programación por objetivos que permite demostrar los resultados y utilidades en la minimización de costos con dicho método (Gharakhani, 2011); (Rezaei & Davoodi, 2011) desarrollaron dos modelos de programación no lineal entera mixta involucrando múltiples proveedores y productos: el primer modelo en el cual se restringe la escasez y el segundo modelo en el cual los agotados de demanda quedan pendientes, debido a la complejidad del modelo se implementan algoritmos genéticos para encontrar una mejor solución.

Por otro lado, (Arango, et al., 2012) desarrollaron y evaluaron modelos de sistemas MRP con incertidumbre aplicando lógica difusa a las restricciones de cada uno de los modelos e igualmente (Guillaume, et al., 2012) consideró un problema de MRP con demandas inciertas modeladas con intervalos difusos, es decir, intervalos con distribuciones de probabilidad que describen para cada valor de la demanda, la medida en que es un valor posible. Por otro lado, (Choudhary & Shankar, 2013) estructuraron un modelo de toma de decisiones conjunta de adquisición o compras de materiales por tamaño de lote y la selección de un conjunto de proveedores con sistemas de descuento de compra por cantidades y un costo de transporte que varía por capacidad y distancia con los proveedores.

Los efectos generados por los tiempos de entrega o “lead time” toman relevancia en los resultados de los modelos matemáticos implementados en los sistemas MRP. Por ello, (Ioannou & Dimitriou, 2012) estima los tiempos de espera en sistema de producción con ambientes “make to order” de fabricación en múltiples máquinas y múltiples productos sin configuraciones especiales de sus recursos. Por otra parte, (Stadtler & Sahling, 2013) presentaron una formulación de programación y tamaños de lote para sistemas con líneas de flujo multi-etapa sin compensación de tiempo de entrega garantizando un flujo continuo, como resultado se presenta un 10% menos de costos en contraste con los modelos que usan compensación de tiempos de entrega.

Finalmente, autores como (Glock, et al., 2014) y (Bruno, et al., 2014) presentaron en sus contribuciones los grandes beneficios de los modelos de tamaño de lote a través de una revisión de la literatura como una herramienta de alto potencial en la toma de decisiones de sistemas reales y complejos de cadenas de abastecimiento.

4.3. MRP CON DECISIONES DE TRANSPORTE

Los artículos e investigaciones analizados anteriormente apuntan a decisiones alrededor de un sistema MRP que se enfocan principalmente a la minimización de costos. Sin embargo, las decisiones de compras, producción y gestión del inventario permiten la inclusión y relación con otro tipo de decisiones que se acerquen a las necesidades de las organizaciones industriales, como lo son las decisiones de transporte y contenerización.

Estas dos últimas variables presentan un gran impacto en las cadenas de abastecimiento ya que los costos logísticos de transporte representan entre el 10 y el 35% del valor de venta final de los productos en Colombia comparado con un 6% promedio en países Europeos (ANIF, 2014) y la contenerización de los productos (materias primas, productos intermedios o productos terminados) permite optimizar las decisiones de transporte en cuanto al tipo de flota, capacidad utilizada, número de entregas, ruteo de vehículos, etc.

Para ello, diferentes autores han incluido dentro del modelo MRP, decisiones de transporte y contenerización con el objetivo de optimizar el uso de la capacidad de los recursos de transporte. (Speranza & Ukovich, 1993) propuso un modelo de programación lineal entera que permite minimizar costos de transporte y de inventarios dentro de un ambiente multi-producto evaluando diferentes estrategias de entrega mediante la consolidación de mercancías en diferentes circunstancias como: ventanas de tiempo, clases de vehículo con diversas capacidades de almacenamiento. Así mismo, (Ben-Khedher & Yano, 1994) propusieron un modelo de decisión de entrega conjunta (multi-item joint replenishment) con restricciones que evalúan capacidad de contenedores y uso óptimo de vehículos que cumpla con los requerimientos de demanda.

(Lee, et al., 2002) analizaron el problema de tamaño de lote dinámico estructurado en un modelo de reaprovisionamiento de inventario integrado desde una planta a un TPW (Third-Party Warehouse) y desde allí a centros de distribución incluyendo políticas de distribución de entrega bajo requerimientos de demanda dinámica, este modelo fue desarrollado mediante programación estocástica al igual que los modelos de entrega de carga consolidada de (Cetinkaya & Bookbinder, 2002) que buscan minimizar los costos de mantenimiento de inventario, reaprovisionamiento, costos de despacho, costos de penalización por pre-entrega y retrasos.

Así mismo, (Li, et al., 2003) propusieron un modelo de tamaño de lote dinámico desarrollado mediante un algoritmo de programación dinámica que incluye órdenes de producción por baches y una estructura de costos de adquisición o compra, y (Lee, et al., 2005) desarrolló un algoritmo heurístico para un problema de tamaño de lote multi-producto en el cual se toman decisiones simultáneas de cantidades de pedido a comprar y el tipo de contenedores a utilizar; los costos son proporcionales a las cantidades de contenedores utilizados y el modelo busca minimizar sus costos totales.

Por otro lado, (Kiesmuller, 2009) desarrolló una heurística para la solución de un problema de reaprovisionamiento de inventario multi-producto bajo políticas de inventarios, tomando decisiones sobre las cantidades de producto a comprar al proveedor y optimizando el uso de la capacidad de los camiones buscando realizar la entrega con camiones llenos con el objetivo de obtener beneficios de economías de escala. La heurística permite obtener inicialmente el número de vehículos necesarios y como segunda medida la capacidad disponible para los diferentes productos en términos de volumen.

(Sancak & Salman, 2011) presentaron un modelo de programación entera mixta MIP para un problema de tamaño de lote dinámico con políticas de transporte con retraso que busca establecer la coordinación e integración entre el plan de órdenes de compra a los proveedores con el plan de producción de la empresa. En este caso, la demanda de productos es determinística a partir de un sistema MRP usando estrategia PUSH y debido a la cercanía del proveedor con el productor se establece un tiempo de entrega igual a cero. Esto con el fin de asegurar los planes de producción y que las unidades compradas que no lleguen sean cubiertas por el stock de seguridad, su objetivo principal es minimizar los costos de transporte o envío y los costos de mantenimiento de inventario, así como también busca optimizar la capacidad de cargue de los camiones.

Finalmente, (Choudhary & Shankar, 2013) formularon un modelo de toma de decisiones conjunta de compra de materiales por tamaño de lote que incluye la selección de un conjunto de proveedores mediante sistemas de negociación de descuento por cantidades y un costo de transporte que varía según la capacidad y la distancia con los proveedores, se presentan los resultados del modelo mediante un análisis de sensibilidad ante la variación de los parámetros del sistema que permitan a los tomadores de decisiones desarrollar estrategias efectivas de compra.

4.4. FENÓMENO DE NERVIOSISMO EN EL MRP

Un aspecto importante por revisar antes de llegar a un proceso de diseño e implementación de un sistema MRP es el fenómeno del “nerviosismo”, que influye principalmente por dos razones: la posible variación del horizonte de planeación en ambientes de incertidumbre, es decir, cambios en la programación de la producción (reprogramación) en el horizonte de planeación resultarán en tamaños de lote de pedidos sub-óptimos; y la segunda razón, se debe a cambios en los datos que afectarán los resultados obtenidos y se verán reflejados a lo largo de la cadena de

abastecimiento mediante variaciones en los requerimientos de demanda, cantidades a pedir y tiempos de entrega; esto es conocido en la literatura como NERVIOSISMO en un sistema MRP.

El problema fundamental de los estudios estáticos y dinámicos es que muchos algoritmos del tamaño de lote son sensibles al horizonte - un simple cambio en el número de períodos de demanda que se están considerando provocará cambios en algunas, si no todas, de las decisiones de pedidos. Esta inestabilidad de los pedidos planificados, es llamado "nerviosismo", es un problema continuo para los usuarios de sistemas de Planificación de Requerimientos de Materiales (MRP) visualizado desde la inestabilidad hasta un momento en el proceso de producción que tiende a propagarse por todo el sistema (Ho & Ho, 1999).

Para ello diferentes autores proponen la utilización de reglas de tamaño de lote mediante algoritmos como Wagner-Within o Silver-Meal analizando los posibles cambios en costos de nerviosismo representado en una nueva configuración de la programación de la producción (Carlson, et al., 1979) o también analizando el costo de cancelar una programación previamente programada (Kropp & Carlson, 1984). Estas reglas, pueden generar un mayor nerviosismo que otras, realizando pequeños o grandes cambios, y para ello (Blackburn, et al., 1986) propuso cinco estrategias para amortiguar el nerviosismo en sistemas MRP evaluando el impacto en costos, horizonte de planeación, estructura y ensamble del producto, selección del método de tamaño de lote, entre otros. Por ejemplo, la regla de congelación del horizonte de planeación que tiende a ser dominante sobre las otras estrategias, sin embargo, es susceptible a la incertidumbre del pronóstico de demanda a largo plazo.

Por otro lado, (Donselaar & Gubbels, 2001) evaluó directamente el nerviosismo de un sistema MRP contra un sistema LRP (Line Requirements Planning) mediante diferentes escenarios incluyendo políticas de tamaño de lote tipo FOQ (Fixed Order Quantity) y POQ (Period Order Quantity), órdenes WCS (with complete series) y órdenes WOCS (without complete series) al igual, incluyendo escenarios de baja y alta variación de la demanda, el resultado se representa en minimizar el nerviosismo y el inventario y se encuentra que un modelo LRP se desempeña mejor que un MRP por su nivel de agregación.

En la Tabla 6 se presentan algunos trabajos de autores que han desarrollado modelos que tratan la inestabilidad o nerviosismo de los sistemas MRP bajo condiciones de incertidumbre de demanda:

AUTOR	CRITERIO	PARÁMETROS	TIPO DE SISTEMA	COMENTARIOS
Carlson et al. (1979)	Costo de inventario, configuración y reprogramación	Horizonte de planeación, efecto en pronóstico	Único nivel, Incertidumbre de Demanda	No permite faltantes, Algoritmo W-W
Carlson et al. (1984)	Costo de inventario, configuración y reprogramación, cancelación y agregación de configuraciones	Horizonte de planeación, efecto en pronóstico	Único nivel, Incertidumbre de Demanda	No permite faltantes, Algoritmo W-W, otros costos de configuración
Blackburn et al. (1986)	Sistema de inventario y costo de ordenar	Cinco estrategias (Congelación, Pronóstico, ...)	Múltiple nivel, Incertidumbre de Demanda	
Sridharan and Berry (1990)	Sistema de inventario y costo de ordenar, Nivel de Servicio	Congelación, Replanificación	Único nivel, Incertidumbre de Demanda	No permite faltantes
Zhao and Lee (1993)	Costos de mantenimiento, configuración y agotados de inventario	Congelación, Replanificación, Horizonte de planeación	Múltiple nivel, Incertidumbre de Demanda	No permite faltantes, incrementa el costo, disminuye el nivel de servicio

AUTOR	CRITERIO	PARÁMETROS	TIPO DE SISTEMA	COMENTARIOS
Ho and Lau (1994)	Costos de reprogramación, inventario extra, configuración y transporte	Tamaño de lote	Múltiple nivel, Incertidumbre de tiempos de entrega	Cinco reglas de tamaño de lote: PPB/SM mejor contra el nerviosismo
Sridharan and Laforge (1994)	Nivel de Servicio	Congelación	Único producto, Incertidumbre de Demanda	Disminución del nivel de servicio
Anders Segerstedt (1996)	Sistema de inventario y costo de ordenar, configuración de producción	Tamaño de lote y órdenes de compra	Multinivel, multi-producto, tiempos de entrega	Punto de reorden, POQ, Inventario remanente
Xiande Zhao, Kokin Lam (1997)	Sistema de inventario y costo de ordenar, configuración de producción	Congelación, Estimación de Demanda, Horizonte de planeación, Periodo de reaprovisionamiento	Multinivel, multi-producto	Reglas de tamaño de lote: SM, MSM, PPB, EOQ, POQ, LFL
Ho and Ireland (1998)	Costos de transporte, inventario y configuración	Tamaño de lote	Múltiple nivel, Incertidumbre de tiempos de entrega y la demanda	Cuatro reglas de tamaño de lote: PPM/SM mejor que EOQ/LFL con grandes errores de pronóstico
Gomaa, Hussein and Zahran (1999)	Costos de agotados, mantenimiento y configuración	Tamaño de lote	Múltiple nivel, Incertidumbre de tiempos de entrega o la demanda	Nueve reglas de tamaño de lote entre 10 factores: PPB aconsejado
Jeunet and Jonard (2000)	Costos de configuración y transporte	Tamaño de lote	Único nivel, Incertidumbre de Demanda	Nueve reglas de tamaño de lote: Usa POQ/LUC/PPQ con sistemas no flexibles y método exacto (WW) con sistemas flexibles
Kazan, Nagi and Rump (2000)	Costos de mantenimiento, configuración y de cambio	Tamaño de lote	Único nivel, Incertidumbre de Demanda	Tres reglas de tamaño de lote: Usa SM con costos modificados
Bai, Davis, Kanet, Cantrell and Patterson (2002)	Costos de mantenimiento, configuración y de cambio, nivel de servicio	Congelación, tamaño de lote, inventario de seguridad, replanificación	Múltiple nivel, Incertidumbre de Demanda	
Alexandre Dolgui, Caroline Prodhon (2007)	Costos de transporte, inventario y configuración	Inventario de seguridad, lead time de seguridad, lead time de planeación, congelación, horizonte de planeación	Multinivel, multi-producto	Incertidumbre del tiempo de entrega, Reglas de tamaño de lote: EOQ, POQ, WW, PPB, LUC
Tunc et al. (2012)	Costos de reaprovisionamiento, inventario y penalización	Patrón de demanda, horizonte de planeación, coeficiente de variación de la demanda		Estrategias de incertidumbre estática y dinámica

*Tabla 6. Estudios de nerviosismo en sistemas MRP.
Fuente: Adaptado de (Dolgui & Prodhon, 2007)*

La revisión y análisis de los artículos enfocados al nerviosismo en el MRP, tiene como idea inicial conocer y anticipar los posibles problemas de este fenómeno en el diseño y construcción del modelo matemático objetivo del tema de investigación enfocado la toma de decisiones con restricciones de contenerización.

A partir de la revisión del estado del arte del MRP se identificó una oportunidad para diseñar un modelo matemático que permita tomar decisiones de compras, producción y transporte mediante un sistema de planeación de requerimientos de materiales (MRP) incluyendo restricciones de contenerización con el objetivo de optimizar el uso de la capacidad de los contenedores en el proceso de adquisición de materiales y por ende minimizar los costos de compras, inventario y transporte.

5. SISTEMA DE INFORMACIÓN

En la Tabla 7 se presenta la estructura del sistema de información que tiene como objetivo establecer los parámetros que alimentan la base de datos del modelo matemático. Esta base de datos es diseñada de tal manera que sea compatible con el sistema de información manejado por las organizaciones usuarias del modelo.

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FUENTE	OBSERVACIONES
1	Costo mantenimiento de inventario de materiales	\$USD/und	Materias Primas	Costo unitario de mantenimiento de inventario de materiales (materias primas y/o productos en proceso) en almacenes de materias primas
2	Costo mantenimiento de inventario de productos finales	\$USD/und	Almacenamiento/Logística	Costo unitario de mantenimiento de inventario de productos finales en almacenes de producto terminado
3	Costo de activación orden de compra materiales	\$USD/orden	Compras	Costo de activación de la orden de compra de materiales por proveedor
4	Costo de producción unitario de productos finales	\$USD/und	Producción	Costos unitarios de producción de los productos finales por recurso o línea de producción en planta.
5	Costos de transporte de contenedores	\$USD/cont	Proveedor	Costo fijo (trámites, fletes, importación, entre otros) de transporte por contenedor movilizado en medio de transporte
6	Costo de demanda no cumplida de productos finales	\$USD/und	Planeación	Costo de penalización por incumplimiento de la demanda (backorder) de productos finales
7	Costo de compra de materiales con descuentos	\$USD/und	Compras/Proveedor	Costo de compra de materiales con precio de descuento definido por cada proveedor
8	Lead time de entrega de materiales	días	Compras/Materias Primas	Tiempos de entrega de materiales por parte del proveedor generados a partir de las órdenes de pedido hasta su llegada a almacenes de materias primas
9	Lista de requerimiento de materiales – productos finales (BOMs)	und/und	Planeación MRP/MPS	El plan maestro de producción (MPS) establece el volumen de producción agregado definiendo las cantidades de materiales requeridos para la producción de productos finales
10	Demanda de productos finales	unds	Planeación/Comercial	Se establece el pronóstico de la demanda de productos finales para el período de planeación en cada centro de distribución
11	Tiempo configuración de recursos de producción de productos finales	hrs/und-recurso	Producción	Tiempos de preparación o configuración de los recursos o máquinas para la producción de productos finales
12	Tiempos de producción de productos finales por recurso o máquina	horas/und-recurso	Producción	Tiempos de producción unitario de productos finales por recursos o máquinas de producción
13	Capacidad de producción de recurso o máquina	hrs/recurso	Producción	Capacidad en horas de producción de productos finales del recurso o máquina por periodo
14	Capacidad de almacenamiento de materiales	kgs	Materias Primas	Capacidad de almacenamiento de materiales en almacenes de materias primas

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FUENTE	OBSERVACIONES
15	Capacidad de almacenamiento de productos finales	kgs	Almacenamiento/Logística	Capacidad de almacenamiento de productos finales en almacenes de productos finales
16	Inventario inicial de materiales	unds	Producción	Se deben definir para los períodos de planeación los inventarios iniciales para cada corrida del modelo MRP
17	Inventario inicial de productos finales	unds	Almacenamiento/Logística	Se deben definir para los períodos de planeación los inventarios iniciales para cada corrida del modelo MRP
18	Capacidad máxima de almacenamiento del contenedor	kgs/cont	Proveedor	Información de la capacidad máxima de almacenamiento y transporte del contenedor
19	Peso unitario de materias primas	kgs	Proveedor	Peso unitario de materias primas en kilogramos
20	Peso unitario de productos finales	kgs	Investigación & Desarrollo	Peso unitario de productos finales en kilogramos
21	Listado de rangos en que ocurre cambio de precio por descuento de materiales	unds	Proveedor	Información por parte del proveedor de descuentos de precio de compra de materiales por cantidades

Tabla 7. Estructura sistema de información modelo MRP-C.

Fuente: Información Propia

6. MODELO MATEMATICO MRP – CONTENERIZACION

Para llevar a cabo un proceso de toma de decisiones a nivel estratégico y/o táctico y cumplir con los requerimientos de demanda se pretende establecer un modelo de optimización de compra de materiales que permita definir las cantidades a comprar de acuerdo a lotes mínimos, estrategias de negociación con proveedores y unidades de compra previamente definidas.

Los requerimientos de demanda interna (materias primas, sub-ensambles y/o productos en proceso), consumos de materiales (BOM's), los tiempos de entrega desde el proveedor, la capacidad de los recursos de producción, y la activación de compra de materiales estructuran las restricciones del modelo planteado, así como también, compras de materiales con reglas de negociación, la optimización en el uso y la capacidad de los contenedores requeridos de los diferentes proveedores, de tal manera que se puedan cumplir con los requerimientos de demanda.

El modelo MRP – C (Material Requirements Planning with contenerization por sus siglas en inglés) es formulado como un modelo de programación lineal entera mixta que tiene como objetivo minimizar los costos de inventario de materias primas y productos finales, costo de activación de órdenes de compra de materiales, costo de configuración de la producción, costo de transporte por número de contenedores requeridos, costos de cantidades compradas con descuento (estrategias de negociación) y costos generados por el incumplimiento de la demanda (Backorder).

El modelo tiene un enfoque táctico – estratégico en el que se involucran restricciones asociados a proveedores "I", almacenes de materiales, producto terminado y plantas de producción "a-b", y permite flujos a lo largo y ancho de la cadena de abastecimiento para determinar cada una de las variables del modelo dentro del periodo de planeación asociadas a la función objetivo de minimización de costos.

AGENTES INVOLUCRADOS EN EL MODELO

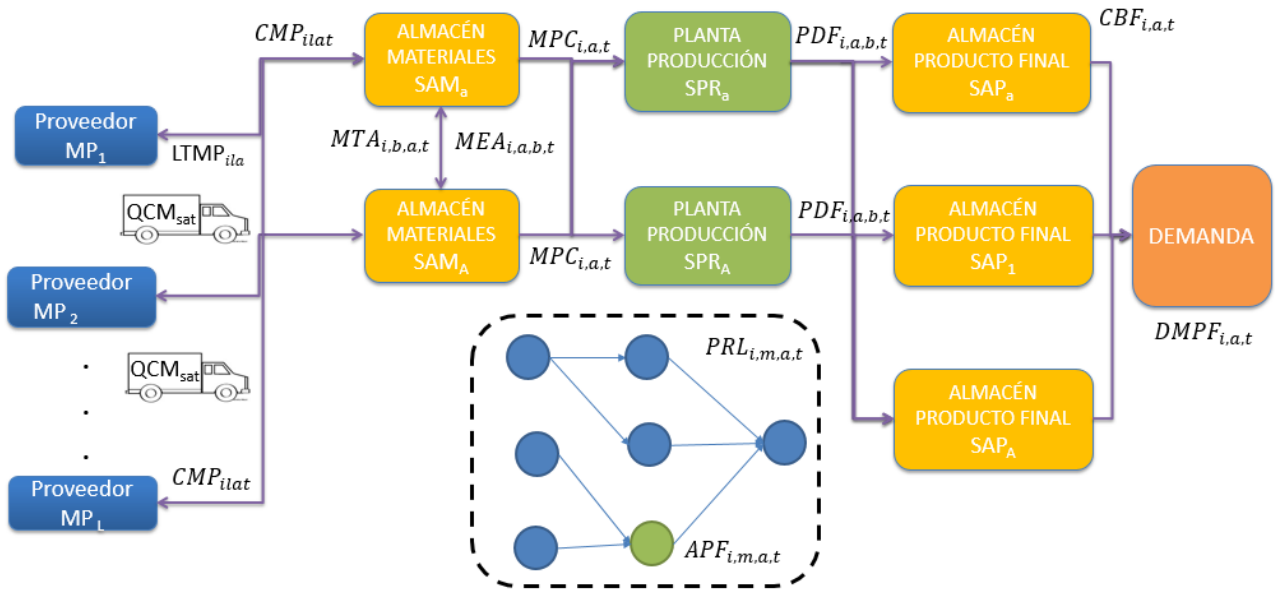


Ilustración 5. Esquema agentes involucrados modelo MRP - C.
Fuente: Información Propia

El modelo matemático descrito a continuación permite establecer el modelo estratégico de requerimiento de materiales y por ende la toma de decisiones de compras a un costo mínimo.

6.1. SUPUESTOS DEL MODELO

El modelo propuesto está restringido por los siguientes supuestos:

1. La demanda de productos finales es conocida con certeza para cada periodo sobre el horizonte de planeación.
2. Los costos de almacenamiento, producción, transporte y compra de materiales no varían en el tiempo.
3. El modelo incluye un costo por faltante o incumplimiento de la demanda (Backorder)
4. El costo de una orden de compra aplica para cada periodo en el cual es puesta una orden a cada proveedor.
5. La compra e importación de materias primas se puede consolidar por uno o varios proveedores.

6.2. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Índices

I	Total de materiales (materias primas, productos en proceso y/o productos finales)
T	Total de número de periodos de tiempo en el horizonte de planeación
L	Total de proveedores de materiales
M	Total de líneas de producción o recursos
S	Total de medios de transporte de materiales
A	Total de sitios (Almacén de materiales, productos finales y plantas de producción)
C	Total intervalos de cantidades de compra límite con precios de descuento
i, j	índices de materiales – $i, j \in [1, \dots I]$
l	índice de proveedores – $l \in [1, \dots L]$
t, k	índices de periodos de tiempo – $t, k \in [1, \dots T]$
m	índice de recursos de producción o máquinas – $m \in [1, \dots M]$
s	índice de medio de transporte – $s \in [1, \dots S]$
c	índice de intervalo de cantidades límite con precios de descuento – $c \in [1, \dots C]$
a, b	índice de sitios (origen o destino) – $a, b \in [1, \dots A]$

Conjuntos

BOM_i	Conjunto de materiales i sucesores de productos en proceso
BMF_i	Conjunto de materiales i sucesores de productos finales
MMP_i	Conjunto de materiales que son materias primas compradas i
MPF_i	Conjunto de materiales que son productos producidos i
MCC_{il}	Conjunto de materias primas i compradas al proveedor l que se pueden consolidar
PVI_l	Conjunto de proveedores l de importación
MMP_{ila}	Conjunto de materias primas i compradas al proveedor l en almacen de materiales a
MPI_{ilc}	Conjunto de materias primas i compradas al proveedor l en el intervalo c
MMQ_{im}	Conjunto de materias primas i que se producen en el recurso o máquina m
SAM_a	Conjunto de sitios a en el que se almacenan materiales
SAP_a	Conjunto de sitios a en el que se almacenan productos finales
SPR_a	Conjunto de sitios a en el que se producen productos finales
MPA_{ia}	Conjunto de materiales i que son almacenados en almacen de materiales a
MIA_{iab}	Conjunto de materiales i que ingresan de almacenes b a los almacenes a
MSA_{iab}	Conjunto de materiales i que salen de almacenes a hacia almacenes b
PRM_{iab}	Conjunto de materias primas i enviadas desde el almacen de materiales a hacia plantas de producción b
LPP_{ma}	Conjunto de líneas de producción o recursos m en planta de producción a
MPL_{ia}	Conjunto de materiales i que son producidos en plantas de producción a
PSC_{iab}	Conjunto de productos finales i enviados desde plantas de producción a hacia centros de distribución b
PIC_{iab}	Conjunto de productos finales i que ingresan a centros de distribución a desde plantas de producción b
PAC_{ia}	Conjunto de productos finales i que son almacenados en centros de distribución a

Parámetros

$CIMP_{ia}$	Costo mantener inventario de materiales i en almacén de materiales a (\$USD/und)
$CIPF_{ia}$	Costo mantener inventario de productos finales i en centro de distribución a (\$USD/und)
$CACM_{il}$	Costo activación orden de compra materiales i por proveedor l (\$USD/orden)
$CPRF_{ia}$	Costo de producción unitario de productos finales i en planta de producción a (\$USD/und)
$CTRC_{sa}$	Costo fijo de transporte de contenedor en almacén de materiales a (\$USD/cont)
$CBLP_{ia}$	Costo demanda no cumplida productos finales i por centro de distribución a (\$USD/und)
$CCMP_{ilc}$	Costo de compra de materiales i a precio descuento c por proveedor l (\$USD/und)
$LTMP_{ila}$	Lead time entrega de materias primas i del proveedor l en almacén a (días)
$BMPF_{ija}$	Consumo materiales i por productos finales j en planta producción a (und/und)
$DMPF_{ia}$	Demanda de productos finales i en centro de distribución a por periodo t (und)
$TCPM_{ima}$	Tiempo de configuración del recurso m para la producción de productos finales i en planta de producción a (horas/und – recurso)
$TPRM_{ima}$	Tiempo de producción unitario de productos finales i en recursos m perteneciente a plantas de producción a (horas/und – recurso)
$CMPF_{ma}$	Capacidad de producción del recurso m de la planta de producción a (horas/recurso)
$CAMP_a$	Capacidad de almacenamiento de materias primas del sitio a (kgs)
$CAPF_a$	Capacidad de almacenamiento de productos finales del sitio a (kgs)
$CPEC_s$	Capacidad en peso de almacenamiento del contenedor s (kgs/cont)
$CMPR_{icl}$	Cantidad de materiales i en que ocurre cambio de precio c por proveedor l (und)
$IIMP_{ia}$	Inventario inicial de materias primas i en almacen de materiales a (und)
$IIPF_{ia}$	Inventario inicial de productos finales i en centro de distribución a (und)
$PEMP_i$	Peso unitario de la materia prima i (kgs/und)
$PEPF_i$	Peso unitario de producto terminado i (kgs/und)

Variables

IMP_{iat}	Inventario de materias primas i en almacen de materiales a en periodo t (und)
IPF_{iat}	Inventario de productos finales i en almacen de productos finales a en periodo t (und)
MTA_{iabt}	Cantidad de materiales i trasladados desde almacen a hacia almacen b en periodo t (und)
MEA_{iabt}	Cantidad de materiales i que entran al almacen a desde almacen b en periodo t (und)
MPC_{iabt}	Cantidad de materiales i enviados de almacen a hasta planta producción b en periodo t (und)
PRL_{imat}	Cantidad de productos finales i producidos en recurso m de planta a en periodo t (und)
PDF_{iabt}	Cantidad de productos finales i enviados de planta a hacia centro distribución b en periodo t (und)
CMP_{ilat}	Cantidad materias primas i compradas al proveedor l en almacen a en periodo t (und)
QCM_{sat}	Cantidad de contenedores s requeridos en almacen de materiales a en periodo t (cont)
CBF_{iat}	Cantidad de faltante de productos finales i en centro de distribución a en periodo t (und)
QMP_{iclt}	Cantidad de materiales i comprada a precio de descuento c al proveedor l en periodo t (und)
CMS_{ilsat}	Materiales i por proveedor l consolidadas en contenedor s para almacen a en periodo t (und)

Variables binarias

APF_{imat}	Activación producción productos finales i en recurso m de la planta a en periodo t (0 ó 1)
OCM_{ilt}	Activación de orden de compra de materiales i por proveedor l en periodo t (0 ó 1)
OQM_{iclt}	Activación orden compra materiales i a precio descuento c al proveedor l en periodo t (0 ó 1)

El modelo está sujeto a las siguientes restricciones:

6.2.1. BALANCE DE INVENTARIOS MATERIAS PRIMAS

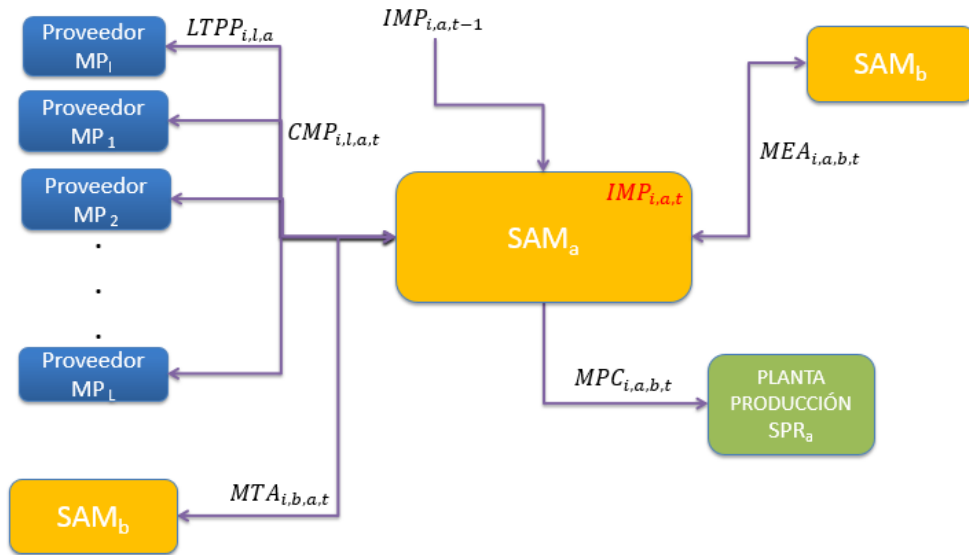


Ilustración 6. Esquema balance de inventario de materias primas
Fuente: Información propia

El balance de inventario de materias primas en el periodo t es equivalente al inventario del periodo anterior ($t-1$) sumado a la compra de materias primas (en t menos el tiempo de entrega), el traslado de materias primas entre almacenes menos los requerimientos de materias primas en plantas de producción y el envío de materias primas a otros almacenes.

$$(1) \quad IMP_{i,a,t} = IMP_{i,a,t-1} + \sum_{l \in MPP_{i,l,a}}^{L} CMP_{i,l,a(t-LTPP_{i,l,a})} + \sum_{b \in MIA_{i,a,b}}^{B} MEA_{i,a,b,t} - \sum_{b \in MSA_{i,a,b}}^{B} MTA_{i,a,b,t} - \sum_{b \in PRM_{i,a,b}}^{B} MPC_{i,a,b,t} \quad \forall i \in MPAA \quad \forall a \in SAMa \quad \forall t \in T$$

6.2.2. CAPACIDAD ALMACENAMIENTO MATERIAS PRIMAS

La sumatoria de las materias primas debe ser menor o igual a la capacidad de los almacenes a los cuales son destinados.

$$(2) \quad \sum_{i \in MPAA}^{I} PEMP_i * IMP_{i,a,t} \leq CAMP_a \quad \forall a \in SAMa \quad \forall t \in T$$

6.2.3. BALANCE VOLUMEN CONSUMO MATERIALES - PRODUCTOS FINALES

El balance en el consumo de materiales se presenta con la equivalencia entre cantidades de materias primas que ingresan a plantas de producción y la demanda interna de materiales para la producción de productos finales.

$$(3) \quad \sum_{b \in MRA_{i,a,b}}^B MPC_{i,b,a,t} = \sum_{j \in MML_{j,m,a}}^J \sum_{m \in MML_{j,m,a}}^M BMPF_{i,j,a} * PRL_{j,m,a,t}$$

$$\forall i \in MPL_a \quad \forall a \in SPR_a \quad \forall t \in T$$

6.2.4. BALANCE VOLUMEN PRODUCCIÓN – ALMACEN PRODUCTOS FINALES

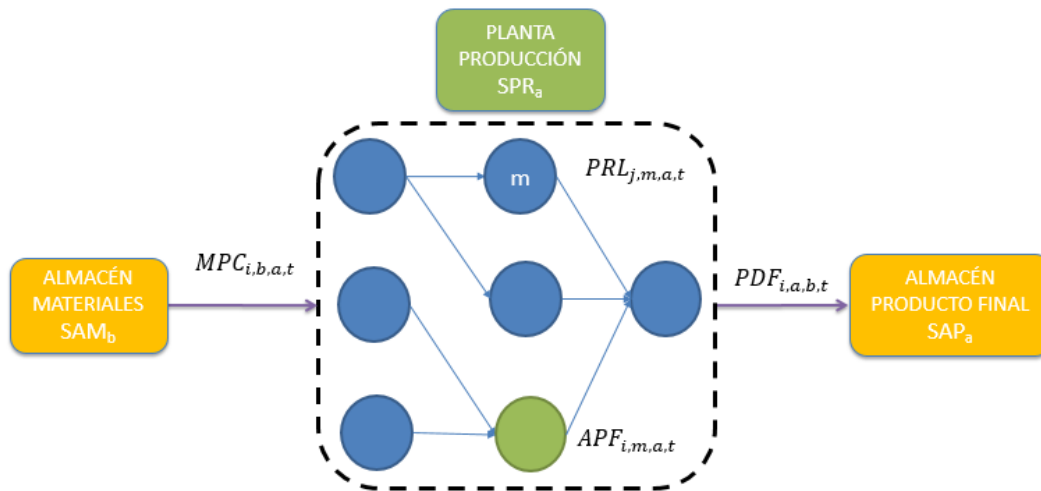


Ilustración 7. Balance de flujo volumen de producción - productos finales.
Fuente: Información propia

La cantidad total de productos finales i enviados desde la planta de producción a hacia los centros de distribución b debe ser igual a la cantidad de productos finales i producidas en las líneas de producción o recursos m de cada una de las plantas.

$$(4) \quad PRL_{i,m,a,t} = \sum_{b \in PSC_{i,a,b}}^B PDF_{i,a,b,t}$$

$$\forall i \in MML_{i,m,a} \quad \forall a \in SPR_a \quad \forall t \in T$$

6.2.5. BALANCE DE INVENTARIOS PRODUCTO FINAL

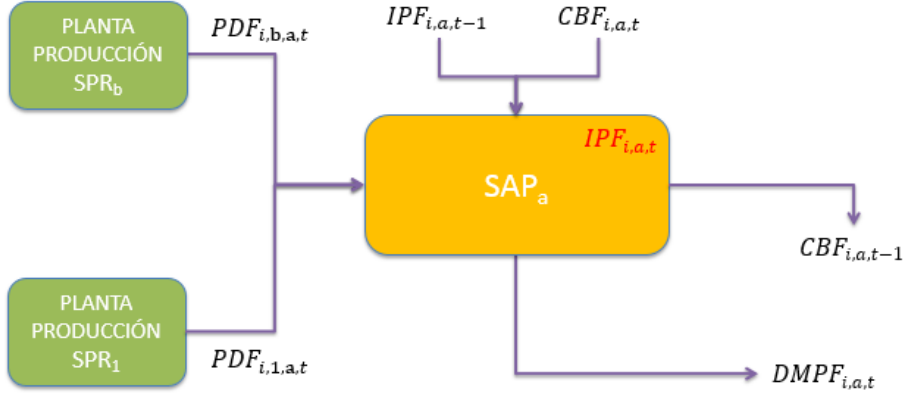


Ilustración 8. Balance de inventario productos finales.
Fuente: Información propia

El inventario de productos finales i es equivalente al inventario del periodo anterior sumado a las cantidades enviadas desde planta de producción hacia los centros de distribución menos la demanda de los mismos en cada centro de distribución, teniendo en cuenta que en el modelo se incluirá una penalización por el incumplimiento de la demanda, estas cantidades (backorders) sumarán al inventario en el periodo actual y se descontarán las cantidades del periodo anterior.

$$(5) \quad IPF_{i,a,t} = IPF_{i,a,t-1} + \sum_{b \in PIC_{i,a,b}}^{B} PDF_{i,b,a,t} + CBF_{i,a,t} - CBF_{i,a,t-1} - DMPF_{i,a,t}$$

$$\forall i \in PAC_a \quad \forall a \in SAP_a \quad \forall t \in T$$

6.2.6. CAPACIDAD ALMACENAMIENTO PRODUCTOS FINALES

La sumatoria de productos finales debe ser menor o igual a la capacidad de los almacenes a los cuales son destinados.

$$(6) \quad \sum_{i \in PDC_a}^{I} PEPF_i * IPF_{i,a,t} \leq CAPF_a \quad \forall a \in SAP_a \quad \forall t \in T$$

6.2.7. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN – PRODUCTOS FINALES

La capacidad de producción de los recursos en cada una de las plantas para la fabricación de productos finales se mide por los tiempos de procesamiento en las líneas de producción o recursos m y los tiempos de configuración del recurso m si se activa o no una producción en el periodo de planeación.

$$(7) \quad \sum_i^I TPRM_{i,m,a} * PRL_{i,m,a,t} + \sum_i^I TCPM_{i,m,a} * APF_{i,m,a,t} \leq CMPF_{m,a,t}$$

$$\forall m \in LPP_a \quad \forall a \in SPR_a \quad \forall t \in T$$

6.2.8. COTAS DE REQUERIMIENTOS DE PRODUCCIÓN

La variable binaria de activación de la producción tomará valor de uno sí y solo sí se requiere una cantidad de producto que estará limitada por la cota mínima entre la capacidad máxima de producción y la capacidad máxima global de las plantas de producción.

$$(8) \quad PRL_{i,m,a,t} \leq CMNP_{i,m,a,t} * APF_{i,m,a,t} \\ \forall i \in PFLa \quad \forall i \in MMQ_{im} \quad \forall m \in MML_{ima} \quad \forall t \in T$$

$$(9) \quad PRL_{i,m,a,t} \leq CMXP_{i,a,t} * APF_{i,m,a,t} \\ \forall i \in PFLa \quad \forall i \in MMQ_{im} \quad \forall m \in MML_{ima} \quad \forall t \in T$$

Parámetros calculados en el modelo:

$$(10) \quad CMNP_{i,m,a,t} = \left[\frac{CMPF_{m,a,t} - TCPM_{i,m,a}}{TPRM_{i,m,a}} \right] \\ \forall i \in PFLa \quad \forall m \in MML_{ima} \quad \forall t \in T$$

$$(11) \quad CMXP_{j,a,t} = \left[M * \sum_{i \in BOMi} BMPF_{i,j,a} \right] \\ \forall j \in PFLa \quad \forall k \in K$$

6.2.9. ACTIVACIÓN ORDEN DE COMPRA DE MATERIALES POR PROVEEDOR

La cantidad de compra de materiales con descuento por proveedor es diferente de cero si y solo si en el periodo t se lanza una orden de compra y se genera un costo por su emisión, en caso contrario deber ser cero. La emisión del costo puede estar determinada por un valor M muy grande como la capacidad máxima de producción en las plantas en todo el periodo de planeación.

$$(12) \quad \sum_{c \in MPI_{i,l,c}} QMP_{i,c,l,t} \leq \left[\sum_{k=t}^T \sum_{j \in BOMi} BMDM_{ijk} \right] * OCM_{i,l,t} \\ \forall i \in MMPi \quad \forall l \in MCC_{il} \quad \forall t \in T$$

La sumatoria de las cantidades de materiales compradas al precio c deben ser iguales a la cantidad total comprada por cada proveedor en cada uno de los almacenes de materiales.

$$(13) \quad \sum_{c \in MPI_{ilc}} QMP_{i,c,l,t} = \sum_{a \in SAM_a} CMP_{i,l,a,t} \\ \forall i \in MMPi \quad \forall l \in MPP_{ila} \quad \forall t \in T$$

6.2.10. COMPRA DE MATERIALES EN PRECIOS LIMITE CON DESCUENTO

Las cantidades de material i a comprar estarán dentro del intervalo ofrecido a los precios de descuento c por cada proveedor l en el periodo t .

$$(14) \quad \begin{aligned} \text{CMPR}_{i,l,c-1} * \text{OQM}_{i,c,l,t} \leq \text{QMP}_{i,c,l,t} \leq \text{CMPR}_{ilc} * \text{OQM}_{i,c,l,t} \\ \forall i \in \text{MMPi} \quad \forall c \in \text{MPI}_{ilc} \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

6.2.11. ACTIVACIÓN ORDEN DE COMPRA CON DESCUENTO

La sumatoria de materiales compradas al precio c debe ser menor o igual a la activación de orden de compra al proveedor, teniendo en cuenta que esta restricción asocia variables binarias, será seleccionada un solo precio de descuento por proveedor.

$$(15) \quad \begin{aligned} \sum_{c \in \text{MPI}_{ilc}}^c \text{OQM}_{i,c,l,t} \leq \text{OCM}_{i,l,t} \\ \forall i \in \text{MMPi} \quad \forall l \in \text{MCC}_{il} \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

6.2.12. RESTRICCIONES DE CONTENERIZACIÓN

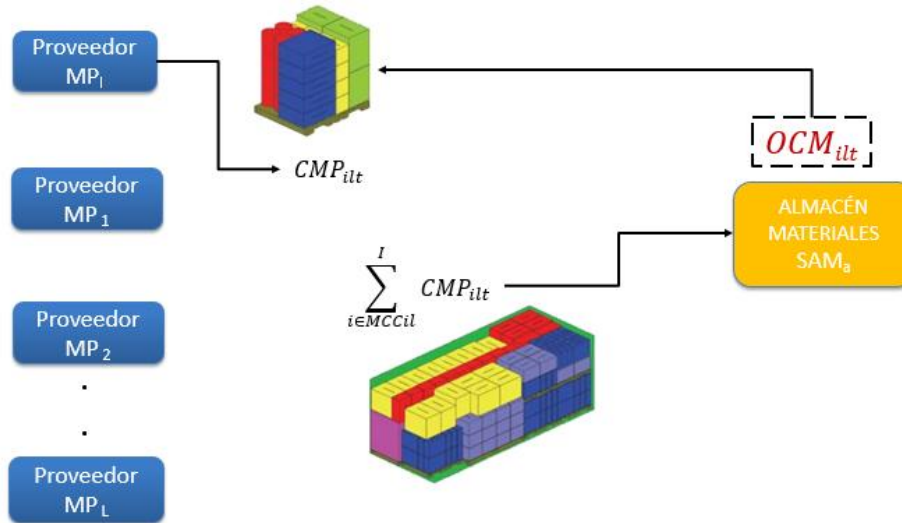


Ilustración 9. Esquema restricción de activación de compra y contenerización.
Fuente: Información propia

Las cantidades de compra de materiales que pueden ser contenerizadas y consolidadas por proveedor deben ser menores o iguales a la capacidad del contenedor que determina el número de contenedores necesario en el periodo t . El uso óptimo de la capacidad del contenedor o medio de transporte estará restringido por el peso de las materias primas transportadas.

$$(16) \quad \begin{aligned} \sum_{i \in \text{MCC}_{il}}^I \text{PEMP}_i * \text{CMS}_{i,l,s,a,t} \leq \text{CPEC}_s * \text{QCM}_{s,a,t} \\ \forall s \in S \quad \forall l \in \text{PVI}_l \quad \forall a \in \text{SAMA} \quad \forall t \in T \end{aligned}$$

$$(17) \quad \sum_{i \in MCC_{il}}^I PEMP_i * CMS_{i,l,s,a,t} \geq CPEC_s * (QCM_{s,a,t} - 1)$$

$$\forall s \in S \quad \forall l \in PVI_l \quad \forall a \in SAMa \quad \forall t \in T$$

$$(18) \quad CMP_{i,l,a,t} = \sum_s^S CMS_{i,l,s,a,t}$$

$$\forall i \in MMPi \quad \forall l \in PVI_l \quad \forall a \in SAMa \quad \forall t \in T$$

6.2.13. FUNCIÓN OBJETIVO

$$(19) \quad Min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 + Z_6 + Z_7$$

$$Z_1(\text{Costo de Inventario}) = \sum_t^T \sum_{a \in SAMa}^A \sum_{i \in MMPi}^I CIMP_{ia} * IMP_{iat} + \sum_t^T \sum_{a \in SAPa}^A \sum_{i \in MMPi}^I CIPF_{ia} * IPF_{iat}$$

$$Z_2(\text{Costo Activación de Compra}) = \sum_t^T \sum_l^L \sum_{i \in MMPi}^I CACM_{il} * OCM_{ilt}$$

$$Z_3(\text{Costo configuración de Producción}) = \sum_t^T \sum_{a \in LPPa}^A \sum_{m \in LPPma}^M \sum_{i \in MPFi}^I CPRF_{ima} * PRL_{i,m,a,t}$$

$$Z_4(\text{Costo de transporte}) = \sum_t^T \sum_{a \in SAMa}^A \sum_s^S CTRC_{sa} * QCM_{sat}$$

$$Z_5(\text{Costo de Compra materiales con descuento}) = \sum_t^T \sum_c^C \sum_l^L \sum_{i \in MMPi}^I CCMP_{icl} * QMP_{ict}$$

$$Z_6(\text{Costo de Demanda no cumplida}) = \sum_t^T \sum_{a \in SAPa}^A \sum_{i \in MPFi}^I CBLP_{ia} * CBF_{iat}$$

En la función objetivo se cuantifican los costos de mantenimiento de inventarios de materias primas y productos finales, costo de activación de orden de compra de materiales, costo de configuración de la producción en cada planta, el costo de cantidad de contenedores necesarios para el transporte de los materiales y el costo en que incurre el incumplimiento de la demanda en cada periodo de planeación.

6.2.14. RESTRICCIONES NO NEGATIVIDAD Y VALOR BINARIO

$$IMP_{iat}, IPF_{iat}, MTA_{ibat}, MEA_{iabt}, MPC_{iabt}, PRL_{imat}, PDF_{iabt}, CMP_{ilat}, QCM_{sat}, CBF_{iat}, QMP_{ict}, CMS_{ilsat} \geq 0$$

$$0 \leq CBF_{iat} \leq DMPF_{iat}$$

$$OCM_{ilt}, APF_{imat}, OQM_{ict} = 0 \text{ ó } 1$$

7. ANALISIS DE RESULTADOS

Para llevar a cabo la validación de la lógica matemática del modelo MRP – C planteado anteriormente, se construye un caso a partir de información real de una organización dedicada a la producción y distribución de cosméticos, y de esta manera comparar las variables de decisión de compras, transporte y costos de operación bajo diferentes escenarios. El modelo matemático es construido en software de optimización GAMS versión 24.1.3.

Es importante resaltar que este modelo es diseñado para la toma de decisiones a nivel estratégico – táctico en empresas donde los procesos de compra y/o importación de materias primas influye fuertemente en la planeación del MRP.

Para el caso desarrollado se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones y parámetros:

- Cinco (5) productos finales
- Veinticuatro (24) materias primas
- Diecisiete (17) proveedores de materia prima
- Cuatro (4) plantas de producción
- Nueve (9) líneas de producción
- Cuatro (4) almacenes de materias primas
- Catorce (14) almacenes de producto terminado
- Tres (3) medios de transporte
- Doce (12) periodos de planeación

7.1. TIEMPOS DE EJECUCIÓN

Los resultados generados por el optimizador del software GAMS genera los siguientes tiempos y número de iteraciones en la búsqueda del valor óptimo:

Resumen ejecución en GAMS

MIP emphasis: balance optimality and feasibility.

MIP search method: dynamic search.

Parallel mode: none, using 1 thread.

Tried aggregator 1 time.

No LP presolve or aggregator reductions.

Tiempos ejecución con optimización (Root + Branch and Cut)

Iteration: 2157 Dual objective = 4094331.248376

Implied bound cuts applied: 9

Flow cuts applied: 571

Mixed integer rounding cuts applied: 503

Gomory fractional cuts applied: 133

Real time = 2.98 sec. (748.23 ticks)

Sequential b&c:

Real time = 11.39 sec. (12750.60 ticks)

Total (root+branch&cut) = 14.37 sec. (13498.83 ticks)

MIP status(101): integer optimal solution

Cplex Time: 14.37sec (det. 13498.83 ticks)

Resultados después de optimización (Root + Branch and Cut)

LP Presolve eliminated 5818 rows and 8053 columns.

Aggregator did 1167 substitutions.

Reduced LP has 1344 rows, 2421 columns, and 6342 nonzeros.

Iteration: 729 Dual objective = 4134591.125920

Markowitz threshold set to 0.2

Fixed MIP status(1): optimal

Cplex Time: 0.08sec (det. 20.84 ticks)

MIP Solution: 4135389.525712 (15937 iterations, 1276 nodes)

Final Solve: 4135389.511172 (777 iterations)

Best possible: 4135389.525712

Absolute gap: 0.000000

Relative gap: 0.000000

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO

Las características del equipo de cómputo, en el cual se ejecutó el modelo en GAMS cumplió con los requerimientos necesarios para obtener resultados en tiempos deseables.

INTEL ® CORE™ i5 – 6200U CPU @ 2.30 GHz

MEMORIA RAM 8.00 GB

SISTEMA OPERATIVO 64 BITS

7.2. RESULTADOS MODELO

A continuación, se presentan los resultados generados por el modelo MRP – C y se realiza un análisis comparativo con los datos del sistema real:

COSTOS	MODELO	REAL
ACT_COMPRA	\$ 21,840.00	\$ 10,960.00
COMPRA	\$ 1,668,128.94	\$ 3,888,322.32
TRANSPORTE	\$ 19,790.00	\$ 248,190.79
PRODUCCION	\$ 665,241.51	\$ 695,319.67
BACKORDER	\$ 7,462.00	\$ -
INVENTARIO	\$ 1,752,917.52	\$ 1,502,352.41
COSTO TOTAL	\$ 4,135,389.52	\$ 6,345,145.19

Tabla 8.Costo total modelo MRP - C vs sistema real

En la Tabla 8 se presentan los resultados del costo total de operación del sistema real versus el modelo MRP – C propuesto, se refleja una reducción del 34,82% del costo total con la implementación del modelo, con un alto impacto del costo de compra con una reducción del 57,1% respecto al costo del sistema real. Cabe resaltar que el sistema real se caracteriza por manejar un costo variable de compra en el que se incluye el costo del proceso de compra y el costo logístico de importación.

Es importante analizar el comportamiento de cada uno de los costos a lo largo del periodo de planeación para ambos modelos. Inicialmente (Ilustración 10) se analiza el comportamiento de los costos de compra en donde se observa un alto costo del sistema real “costo variable – unitario” en comparación con el costo del modelo MRP – C que maneja un sistema de compra por reglas de negociación y descuento por cantidades, de esta manera se puede validar una mejora en la relación beneficio/costo del modelo propuesto, las economías de escala generan excelentes beneficios en la toma de decisiones del sistema de compras.

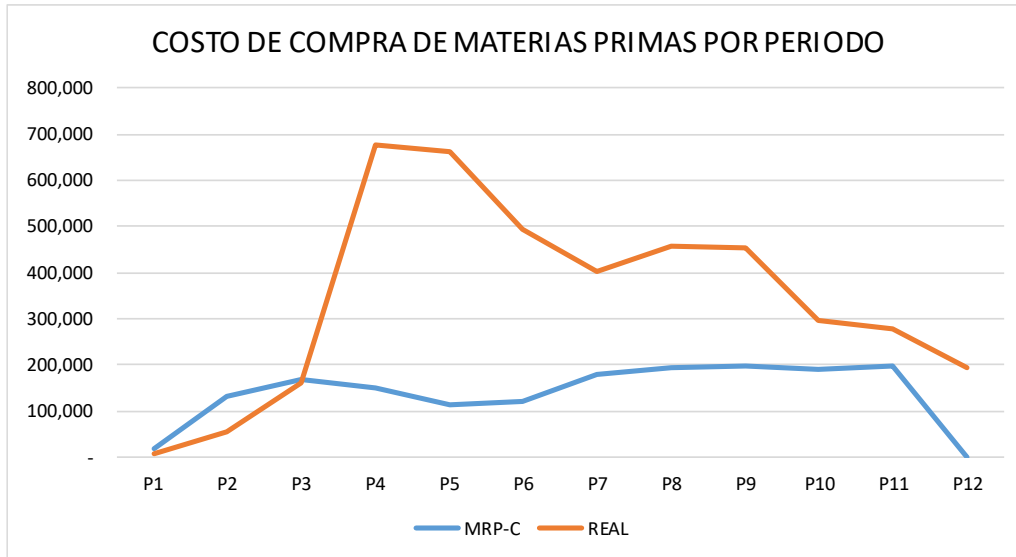


Ilustración 10. Costo de compra de materias primas por periodo.

Para el modelo MRP- C los costos de inventarios tienden a aumentar en cada uno de los periodos mientras que en el sistema real este costo tiende a ser muy elevado en algunos periodos de tiempo debido a la secuencia de la colocación de órdenes de compra, como se observa en la Ilustración 11.

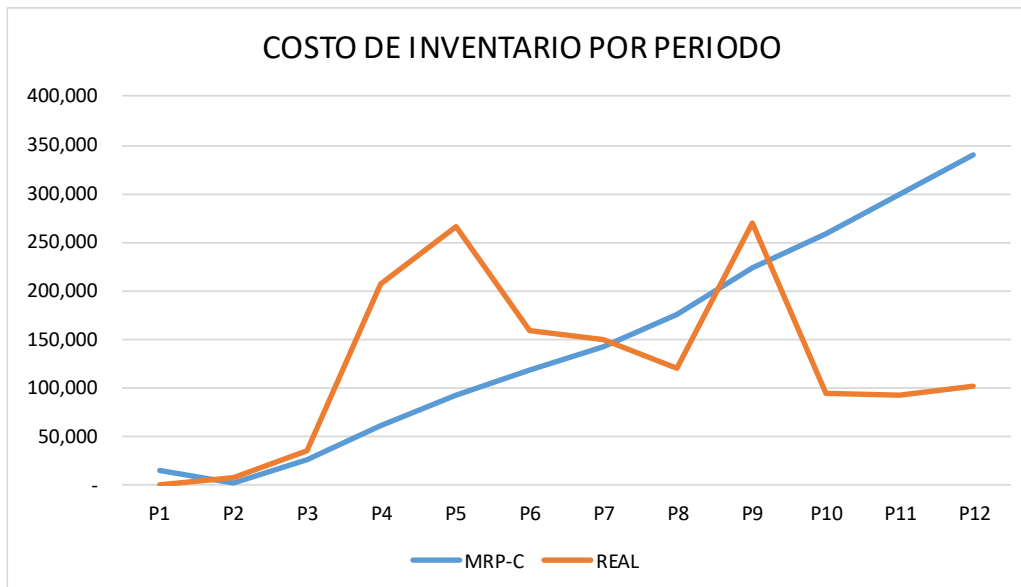


Ilustración 11. Costo de inventario por periodo de planeación.

En contraste, en la Ilustración 12 se pueden observar las diferencias en la solicitud de órdenes de compra por periodo para ambos modelos, el modelo MRP – C permite realizar el proceso de compras de una manera más estable con las cantidades suficientes para el cumplimiento de la demanda, mientras que el modelo del sistema real realiza menos órdenes de compra pero en mayores cantidades de materiales en la mayoría de periodos generando sobrestock de los mismos, y por otro lado, riesgo de disponibilidad de materias primas en otros periodos. Aquellos periodos en los que se presenta un alto número de órdenes de compra se observa un alto costo de inventario.

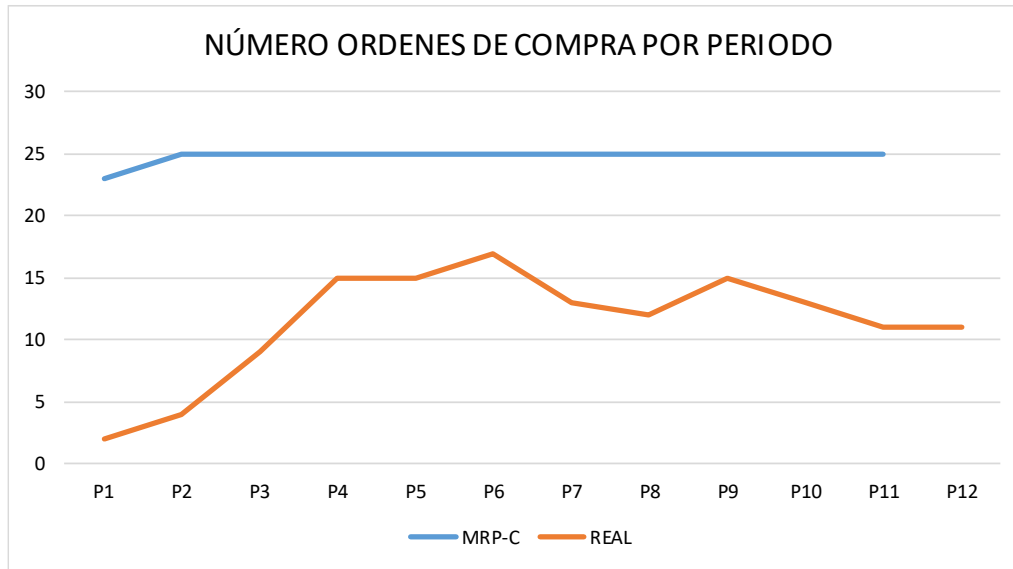


Ilustración 12. Número de órdenes de compra de materias primas por periodo

En la Ilustración 13 se presenta el comportamiento de compra de materiales del sistema real y el generado por el modelo MRP – C, allí se puede observar una mayor estabilidad en los requerimientos de materiales mediante el modelo planteado, la contenerización permite que las compras se realizan utilizando la capacidad óptima del medio de transporte y se planea con mayor eficiencia el proceso de compra, importación y transporte. En la Ilustración 14 se muestran algunos perfiles de compra de materias primas en donde se reflejan las diferencias en los dos modelos, que para el sistema real en algunos periodos de planeación genera altos costos.

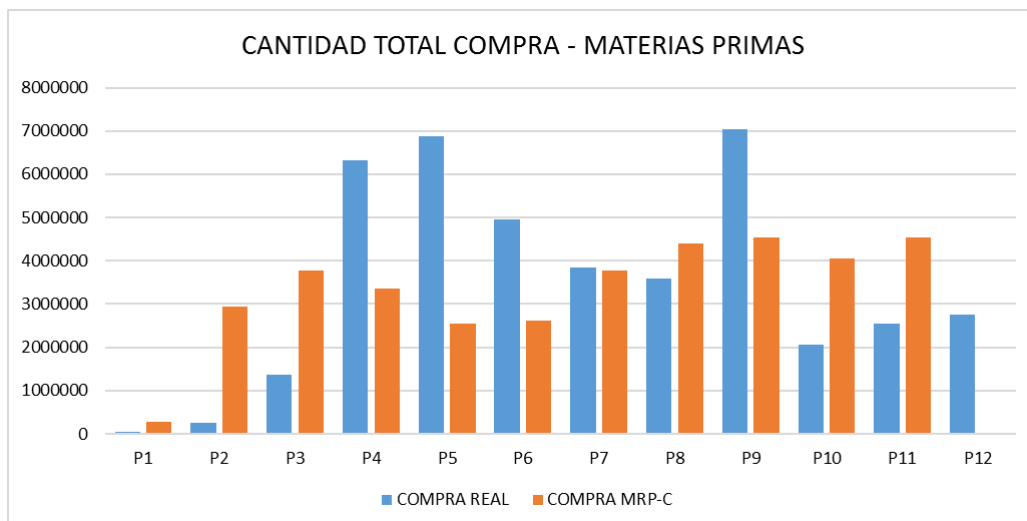


Ilustración 13. Cantidad total de compra de materias primas.

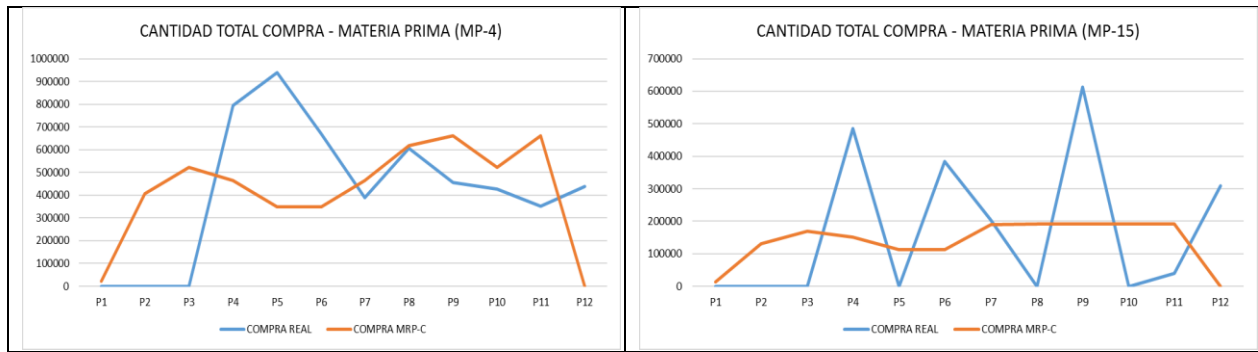


Ilustración 14. Compra de materias primas MP-4 y MP-15 sistema real vs modelo MRP-C.

Finalmente, se analiza la ocupación de la capacidad del medio de transporte utilizado para la compra consolidada por medio de transporte, en la Ilustración 15 e Ilustración 16 se presenta el comportamiento de utilización de la capacidad del medio de transporte en la compra de materiales de dos almacenes, el primero con un porcentaje de ocupación del 60% teniendo en cuenta que el número de materias primas para este almacén es mínimo con respecto al volumen requerido, y el segundo con un porcentaje de ocupación hasta del 97% debido a que un mayor número de proveedores de materiales se encuentran ubicados en la región de este almacén y por lo tanto un mayor número de materias primas.

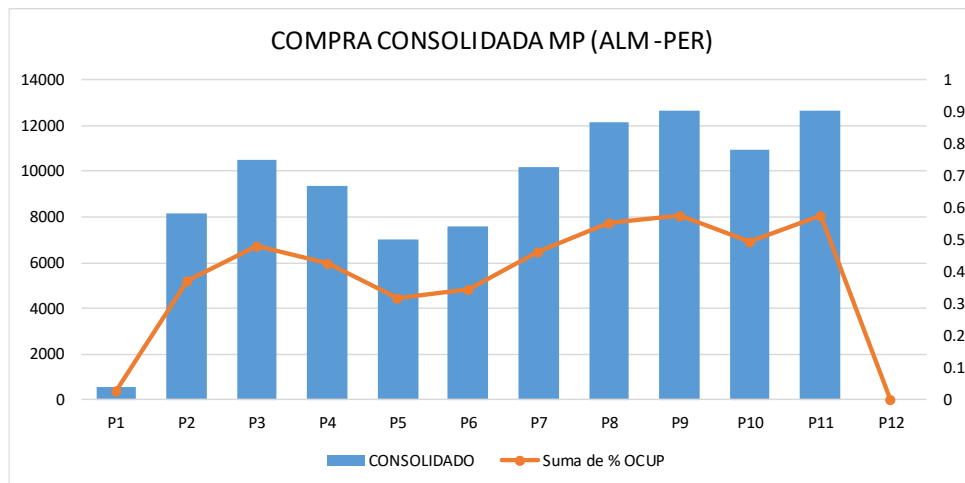


Ilustración 15. Cantidad de compra materia prima por contenedor en Almacén PER

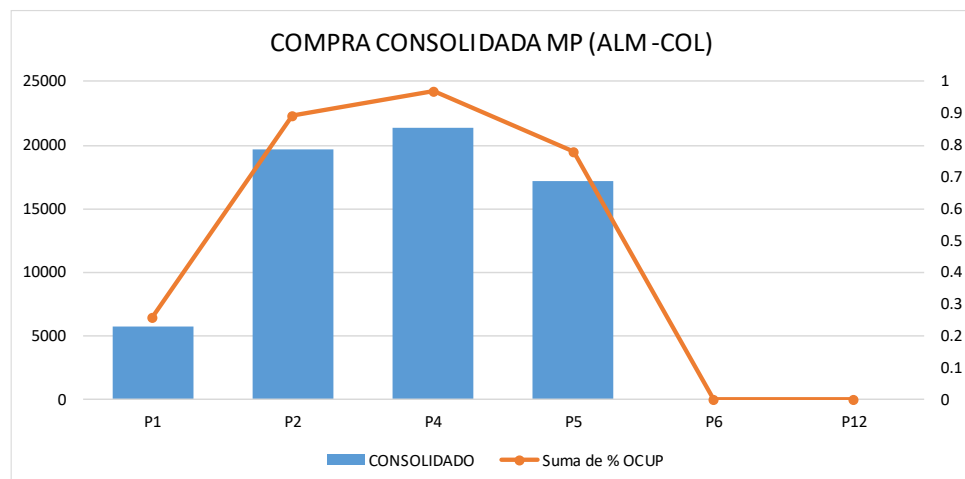


Ilustración 16. Cantidad de compra materia prima por contenedor en Almacén COL

7.3. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

A continuación, se presenta el análisis de resultados a partir de otros escenarios o instancias que permitan evaluar la sensibilidad ante los ajustes en parámetros del modelo.

Las instancias corridas en GAMS son:

- Escenario 0 -> Modelo GAMS sistema real
- Escenario 1 -> 1.05 DEM: Aumento del 5% de la demanda
- Escenario 2 -> 1.1 DEM: Aumento del 10% de la demanda
- Escenario 3 -> DEM-COST2%: Aumento de 2% sobre los costos del modelo con demanda modelo real
- Escenario 4 -> 1.05 DEM-COST2%: Aumento de 2% sobre los costos del modelo con 5% de aumento en la demanda
- Escenario 5 -> 1.1 DEM-COST2%: Aumento de 2% sobre los costos del modelo con 10% de aumento en la demanda

Los tiempos y detalles de computación se presentan en la *Tabla 9*:

Escenario	Tiempo ejecución	Iteraciones	Nodos
Escenario 0 (Real)	14.37 seg	15.937	1.276
Escenario 1	10.25 seg	11.997	1.255
Escenario 2	6.71 seg	9.725	697
Escenario 3	13.67 seg	16.108	2.202
Escenario 4	10.31 seg	11.922	1.224
Escenario 5	6.44 seg	12.422	1.068

*Tabla 9. Tiempos de computación análisis de escenarios.
Fuente: Resultados Software GAMS*

En la *Tabla 10* se presentan los costos detallados para cada uno de los escenarios:

COSTOS	REAL	ESC 0	ESC 1	ESC 2	ESC 3	ESC 4	ESC 5
ACT_COMPRA	\$ 10,960	\$ 21,840	\$ 21,840	\$ 21,840	\$ 22,277	\$ 22,277	\$ 22,277
BACKORDER	-	\$ 7,462	\$ 3,594	\$ 5,366	\$ 1,856	\$ 3,666	\$ 5,473
COMPRA	\$ 3,888,322	\$ 1,668,129	\$ 1,765,574	\$ 1,860,598	\$ 1,703,645	\$ 1,800,898	\$ 1,897,807
INVENTARIO	\$ 1,502,352	\$ 1,752,918	\$ 1,836,615	\$ 1,948,148	\$ 1,759,729	\$ 1,873,348	\$ 1,987,115
PRODUCCION	\$ 695,320	\$ 665,242	\$ 700,303	\$ 734,975	\$ 678,923	\$ 714,314	\$ 749,672
TRANSPORTE	\$ 248,191	\$ 19,790	\$ 16,380	\$ 16,630	\$ 16,412	\$ 16,646	\$ 16,901
TOTAL	\$ 6,345,145	\$ 4,135,380	\$ 4,344,306	\$ 4,587,557	\$ 4,182,841	\$ 4,431,149	\$ 4,679,245

Tabla 10. Costos detallados por escenario (\$USD)

El escenario 0 (modelo inicial) presenta el menor costo total del sistema respecto al costo real del sistema y los escenarios evaluados, sin embargo, el costo de backorder del escenario es mayor en comparación con los costos de los escenarios.

Es importante resaltar que el costo del sistema real no tiene costo de backorder, ya que en las decisiones estratégicas de compañía no se permite cometer incumplimiento de la demanda, lo

que genera un aumento en los costos de compra y transporte. Al evaluar los escenarios en GAMS se está generando costo de backorder, sin embargo, este aumento no castiga el costo total del sistema.

En la *Tabla 11* se presentan la variación en costo de los escenarios respecto al costo real del sistema. El costo de activación de compra presenta un aumento promedio de 200% en los diferentes escenarios respecto al costo del sistema real, ya que como se presenta en la *Ilustración 12* el número de órdenes de compra es mayor al del sistema real.

Por el contrario, el costo de compra se reduce en aproximadamente el 44% promedio respecto al sistema real, por efecto de la implementación de reglas de negociación en la compra y economía de escala. Respecto al costo de transporte, el modelo de contenerización planteado permite una reducción importante en los costos respecto al sistema real, lo que genera oportunidades de mejora a las compañías en los sistemas de transporte implementados.

COSTOS	REAL	ESC 0	ESC 1	ESC 2	ESC 3	ESC 4	ESC 5
ACT_COMPRA	\$ 10,960	199.27%	199.27%	199.27%	203.26%	203.26%	203.26%
BACKORDER	\$ -	-	-	-	-	-	-
COMPRA	\$ 3,888,322	42.90%	45.41%	47.85%	43.81%	46.32%	48.81%
INVENTARIO	\$ 1,502,352	116.68%	122.25%	129.67%	117.13%	124.69%	132.27%
PRODUCCION	\$ 695,320	95.67%	100.72%	105.70%	97.64%	102.73%	107.82%
TRANSPORTE	\$ 248,191	7.97%	6.60%	6.70%	6.61%	6.71%	6.81%
TOTAL	\$ 6,345,145	65.17%	68.47%	72.30%	65.92%	69.84%	73.75%

Tabla 11. Variación porcentual costos escenarios vs costo real.

En la *Ilustración 17* e *Ilustración 18* se puede observar el comportamiento por periodo de los costos totales, de compra y de producción en los diferentes escenarios.

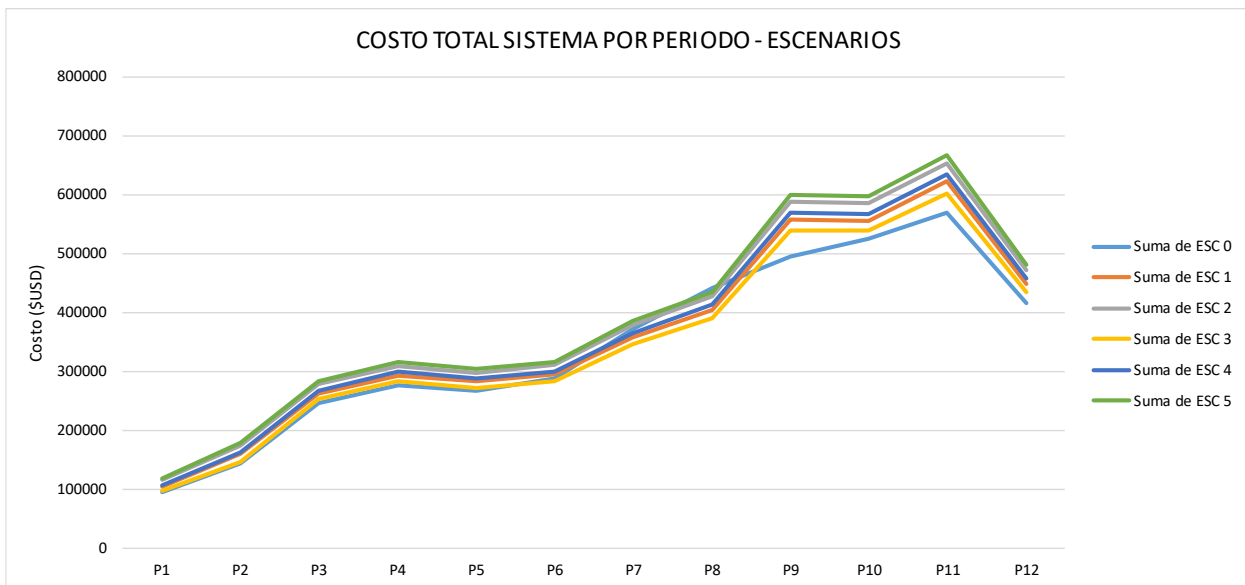


Ilustración 17. Costo total del sistema por periodo en los escenarios

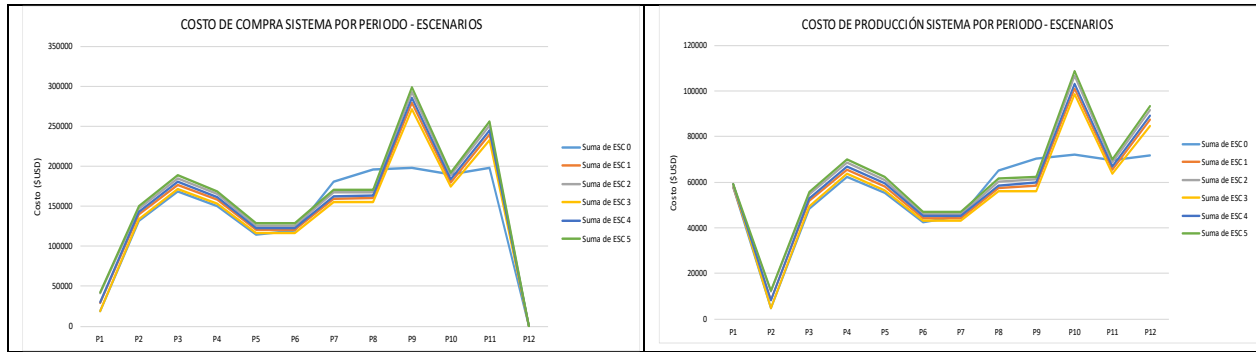


Ilustración 18. Costo de compra y producción por periodo de los escenarios.

8. VENTAJAS MODELO MRP - C

Con base en los resultados generados en el desarrollo del modelo matemático para la planificación de requerimientos de materiales con restricciones de contenerización, se presentan algunas ventajas en los procesos de planeación para las organizaciones:

- La estructura del modelo planteado se puede incluir dentro de los procesos de planeación MRP en las organizaciones que llevan a cabo un alto porcentaje de compra de materiales por importación mediante la compra y consolidación minimizando los costos logísticos.
- El modelo está definido para la toma de decisiones a nivel estratégico y/o táctico para diversas organizaciones en los procesos de compra, producción y transporte.
- El proceso de compra y transporte por consolidación de materias primas permite minimizar los costos de operación y optimizar la capacidad de almacenamiento de carga.
- Las compras realizadas a partir de estrategias de negociación y descuentos por volumen propuesto en el modelo, presentan mejores resultados con respecto al sistema de costo variable unitario manejado en el sistema real y permite reducir más de un 50% de los costos totales.

9. CONCLUSIONES

- ✓ La revisión bibliográfica de los modelos de optimización en sistemas de planeación de requerimiento de materiales (MRP) realizada permitió encontrar una oportunidad de investigación para incluir restricciones de contenerización y estrategias de negociación por descuento, y de esta manera brindar soluciones de modelos de negocio más reales.
- ✓ El sistema de planeación de requerimiento de materiales (MRP) para una organización, tiene una alta importancia y peso sobre las decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo que permite suplir las necesidades de demanda bajo restricciones de capacidad, tiempos de entrega, configuraciones de producción, entre otros, buscando minimizar costos.
- ✓ El modelo MRP – C propuesto permite estructurar un sistema de toma de decisiones a nivel estratégico y táctico, teniendo en cuenta que se ha desarrollado de manera extensa en la cadena de abastecimiento, es decir, con uno o varios nodos de la cadena (proveedores, almacenes de materiales, plantas de producción y centros de distribución).

- ✓ A diferencia de otros modelos de optimización de sistemas MRP, el modelo MRP – C propuesto se adapta a organizaciones en las cuales los procesos de compra e importación de materiales tienen un alto valor e impacto en la cadena de abastecimiento.
- ✓ Los resultados del modelo MRP – C en comparación con los del sistema real, generaron una disminución del 34,8% del costo total, con un alto impacto en los procesos de compra de materiales con descuento y consolidación de carga en medio de transporte.
- ✓ El proceso de compra de materiales muestra mayor estabilidad a lo largo del periodo de planeación en cuanto al comportamiento de las cantidades por periodo disminuyendo el riesgo de tener bajos o altos niveles de inventario, y, por ende, un mayor control en los costos totales de la organización.
- ✓ Se requiere hacer un análisis detallado de los tiempos de ejecución y la formulación matemática para validar los problemas que pueda tener de simetría para encontrar una solución más rápida del cero gap.

10. RECOMENDACIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

- Analizar el modelo MRP – C asociado al contexto de un sistema a gran escala, teniendo en cuenta que el problema fue validado con 5 productos finales. Esto permitiría ampliar economías de escala que contribuyan a la optimización de los costos asociados al modelo.
- Incluir análisis de incertidumbre y nerviosismo en el modelo como se identificó en la revisión de la literatura científica.
- Incluir restricciones de nivel de servicio y costos de venta perdida, que permita ampliar la aplicabilidad del modelo a sistemas reales.
- Incluir en la formulación del modelo el enfoque de optimización robusta.

11. BIBLIOGRAFIA

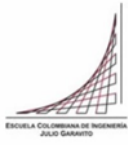
- Aissaoui, N., Haouari, M. & Hassini, E., 2007. Supplier selection and order lot sizing modeling: A review. *Computers & Operations Research*, Volumen 34, p. 3516 – 3540.
- Almeder, C., 2010. A hybrid optimization approach for multi-level capacitated lot-sizing problems. *European Journal of Operational Research*, Volumen 200, p. 599–606.
- ANIF, 2014. *Costos de transporte, Multimodalismo y la competitividad de Colombia*, Bogotá: Cámara Colombiana de la Infraestructura.
- Arango, M. D., Cano, J. A. & Alvarez, K. C., 2012. Modelos de sistemas MRP cerrados integrando incertidumbre. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, Issue 18, pp. 61-76.
- Bahl, H. C. & Ritzman, L. P., 1984. An Integrated Model for Master Scheduling, Lot Sizing and Capacity Requirements Planning. *The Journal of the Operational Research Society*, 35(5), pp. 389-399.
- Ben-Khedher, N. & Yano, C. A., 1994. The Multi – ítem joint replenishment problem with transportation and container effects. *Transportation Science*.
- Billington, P., McClain, J. & Thomas, L., 1983. Mathematical programming approaches to capacity constrained MRP systems: Review, formulation and problem reduction. *Management Science*, pp. 1126 - 1141.
- Blackburn, J. D., Kropp, D. H. & Millen, R. A., 1986. A Comparison of Strategies to Dampen Nervousness in MRP Systems. *Management Science*, 32(4), pp. 413-429.
- Bruno, G., Genovese, A. & Piccolo, C., 2014. The capacitated Lot Sizing model: A powerful tool for logistics decision making. *International Journal of Production Economics*, p. 380–390.
- Carlson, R. C., Jucker, J. V. & Kropp, D. H., 1979. Less Nervous MRP Systems: A Dynamic Economic Lot-Sizing Approach. *Management Science*, 25(8), pp. 754-761.
- Cetinkaya, S. & Bookbinder, J. H., 2002. Stochastic models for the dispatch of consolidated shipments. *Transportation Research*, pp. 747 - 768.
- Cheng, T. & Li, S., 1989. A decision support system for materials requirements planning lot sizing. *Mathematical and Computer Modelling*, 13(4), pp. 61-72.
- Choudhary, D. & Shankar, R., 2013. Joint decision of procurement lot-size, supplier selection, and carrier selection. *Journal of Purchasing & Supply Management*, Volumen 19, p. 16–26.
- Clark, A. R., 2002. Optimization approximations for capacity constrained material requirements planning. *International Journal of Production Economics*, p. 115–131.
- Diabi, M., Bahl, H., Harwan, M. & Zionts, S., 1992. A lagrangian relaxation approach for very large scale capacited lot-sizing. *Management Science*.
- Dolgui, A. & Prodron, C., 2007. Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. *Annual Reviews in Control*, Volumen 31, p. 269–279.
- Donselaar, K. v. & Gubbels, B., 2001. How to release orders in order to minimise system inventory and system nervousness?. *International Journal of Production Economics*, pp. 335 - 343.
- Elmargharby, S., 1978. The Economic Lot Scheduling Problem (ELSP) : review and extension. *Management Science*, pp. 587-598.
- Gharakhani, D., 2011. Optimization of material requirement planning by goal programming model. *Asian Journal of Management Research*.
- Glock, C. H., Grosse, E. H. & Ries, J. M., 2014. The lot sizing problem: A tertiary study. *International Journal of Production Economics*, Volumen 155, p. 39–51.
- Grubbstrom, R. W. & Tang, O., 2011. The space of solution alternatives in the optimal lot sizing problem for general assembly systems applying MRP theory. *Int. J. Production Economics*.
- Guillaume, R., Kobylanski, P. & Zielinski, P., 2012. A robust lot sizing problem with ill-known demands. *Fuzzy Sets and Systems*, Volumen 206, p. Fuzzy Sets and Systems.
- Higginson, J. & Bookbinder, J., 1994. Policy recommendations for a shipment consolidation program. *J. Bus. Logis.*, pp. 87 - 112.

- Ho, C. J. & Ho, S. -J. K., 1999. Evaluating the effectiveness of using lot-sizing rules to cope with MRP system nervousness. *Production Planning & Control*, pp. 150 - 161.
- Ho, J. C., Solis, A. O. & Chang, Y.-L., 2005. An evaluation of lot-sizing heuristics for deteriorating inventory in material requirements planning systems. *Computers & Operations Research*, p. 2562 – 2575.
- Hwang, H.-C., 2010. Economic Lot-Sizing for Integrated Production and Transportation. *Operations Research*, 58(2), pp. 428-444.
- Ioannou, G. & Dimitriou, S., 2012. Lead time estimation in MRP/ERP for make-to-order manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, Volumen 139, p. 551–563.
- Kiesmuller, G. P., 2009. A multi-item periodic replenishment policy with full truckloads. *Faculty of Technology Management*.
- Kropp, D. H. & Carlson, R. C., 1984. A Lot-Sizing Algorithm for Reducing Nervousness in MRP Systems. *Management Science*, pp. 240 - 244.
- Lee, C.-Y., Cetinkaya, S. & Jaruphongsa, W., 2002. A dynamic model for inventory lot sizing and outbound shipment scheduling at a third-party warehouse. *Operations Research - INFORMS*, pp. 735 - 747.
- Lee, W.-S., Han, J.-H. & Cho, S.-J., 2005. A heuristic algorithm for a multi-product dynamic lot-sizing and shipping problem. *International Journal of Productions Economics*, pp. 204 - 2014.
- Li, C.-L., Hsu, V. N. & Xiao, W.-Q., 2003. Dynamic Lot Sizing with Batch Ordering and Truckload Discounts. *Operations Research - INFORMS*, pp. 639 - 654.
- Madroñero, M. D., Mula, J. & Jiménez, M., 2015. Material Requirement Planning under Fuzzy Lead Times. *IFAC Papers Online*, pp. 242 - 247.
- McClain, J. O. y otros, 1982. On MRP Lot Sizing. *Management Science*, pp. 582-584.
- Moustakis, V., 2000. *Material Requirements Planning MRP*. Technical University of Crete: s.n.
- Mula, J., Poler, R. & Garcia, J. P., 2005. MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach. *Fuzzy Sets and Systems*, Volumen 157, p. 74–97.
- Mula, J., Poler, R. & Garcia-Sabater, J., 2007. Material Requirement Planning with fuzzy constraints and fuzzy coefficients. *Fuzzy Sets and Systems*, Volumen 158, p. 783 – 793.
- Orlicky, J., 1975. *Material Requirements Planning*. New York: McGraw Hill.
- Rezaei, J. & Davoodi, M., 2011. Multi-objective models for lot-sizing with supplier selection. *International Journal of Production Economics*, Volumen 130, p. 77–86.
- Rodrigue, J. P. & Notteboom, T., 2013. *The Geography of transport systems*. New York: Routledge.
- Rota, K., Thierry, C. & Bel, G., 1997. *Capacity-constrained MRP system: a mathematical programming model integrating firm orders, forecasts and suppliers*. Département d'Automatique: Université Toulouse II Le Mirail.
- Sahling, F., Buschkuhl, L., Tempelmeier, H. & Helber, S., 2009. Solving a multi-level capacitated lot sizing problem with multi-period setup carry-over via a fix-and-optimize heuristic. *Computers & Operations Research*, pp. 2546 - 2553.
- Sancak, E. & Salman, F. S., 2011. Multi-item dynamic lot-sizing with delayed transportation policy. *International Journal of Production Economics*, Volumen 131, p. 595–603.
- Segerstedt, A., 1996. Formulas of MRP. *International Journal of Production Economics*.
- Sox, C., Jackson, P., Bowman, A. & Muckstadt, J., 1999. A review of the stochastic lot scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, p. 181–200.
- Speranza, M. G. & Ukovich, W., 1993. Minimizing transportation and inventory costs for several products on a single link. *Operations Research*.
- Stadtler, H., 1995. Mixed integer programming model formulations for dynamic multi-item multi-level capacitated lotsizing. *European Journal of Operational Research*, pp. 561-581.

- Stadler, H. & Sahling, F., 2013. A lot-sizing and scheduling model for multi-stage flow lines with zero lead times. *European Journal of Operational Research*, p. 404–419.
- Steinberg, E. & Napier, H. A., 1980. Optimal Multi-Level Lot Sizing for Requirements Planning Systems. *Management Science*, 26(12), pp. 1258-1271.
- Tempelmeier, H. & Derstroff, M., 1996. A Lagrangean-Based Heuristic for Dynamic Multilevel Multiitem Constrained Lotsizing with Setup Times. *Management Science*, pp. 738 - 757.
- Tempelmeier, H. & Hilger, T., 2015. Linear programming models for a stochastic dynamic capacitated lot sizing problem. *Computers & Operations Research*, pp. 119 - 125.
- Ustun, O. & Demirtas, E. A., 2008. Multi-period lot-sizing with supplier selection using achievement scalarizing functions. *Computers & Industrial Engineering*, Volumen 54, p. 918–931.
- Wagner, H. J. & Within, T. M., 1958. Dynamic version of the economic lot size model. *Management Science*, pp. 89 - 96.
- Yenisey, M. M., 2005. A flow-network approach for equilibrium of material requirements planning. *International Journal of Production Economics*, pp. 317 - 332.
- Zhao, X. & Lee, T., 1996. Freezing the Master Production Schedule in multi-level material requirement planning systems under demand uncertainty. *Journal of Operations Management*, pp. 144-161.

12. ANEXOS

- MODELO MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN DE COMPRAS PARA UN SISTEMA MRP CON RESTRICCIONES DE CONTENERIZACIÓN DESARROLLADO EN GAMS.



DECANATURA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
FORMATO DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO

Fecha de entrega: 02 de febrero de 2018

Estudiante: EDGAR FERNANDO ESLAVA FLECHAS

Director: IGNACIO PEREZ VELEZ

Codirector: DANILO ABRIL HERNANDEZ

El presente documento avala la entrega del trabajo de grado por parte del director y codirector.

Documentos anexos Modelo desarrollado en software GAMS

Firma Director

Firma Codirector

Firma Estudiante