



Universidad Autónoma del Estado de México
FACULTAD DE INGENIERÍA



“PLANEACIÓN AGREGADA DE LA PRODUCCIÓN: UN ESTADO DE LA CUESTIÓN”

TRABAJO TERMINAL DE GRADO

PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

PRESENTA:

ING. VICTOR MANUEL MEDINA LÓPEZ

TUTOR ACADÉMICO:

DR. RENÉ MUCIÑO CASTAÑEDA

TUTORES ADJUNTOS:

DR. JAVIER GARCÍA GUTIÉRREZ

DR. JENARO NOSEDAL SANCHEZ

TOLUCA, MEXICO

SEPTIEMBRE DE 2021

CONTENIDO

RESUMEN	VIII
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN.....	3
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVOS PARTICULARES	5
METODOLOGÍA	6
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	7
1.1. PLANEACIÓN AGREGADA DE LA PRODUCCIÓN EN LA ADMINISTRACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	7
1.2. MODELOS BÁSICOS.....	12
1.3. PRIMEROS MODELOS	15
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	17
2.1. PAÍSES DE ORIGEN DE LAS INVESTIGACIONES E INDUSTRIAS DE APLICACIÓN	18
2.2. VARIABLES CONSIDERADAS.....	21
2.3. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS.....	26
2.4. NUEVOS ENFOQUES.....	34
2.5. FUNCIONES OBJETIVO ENCONTRADAS	41

CAPÍTULO 3. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PARA TRABAJO FUTURO Y

CONCLUSIONES44

REFERENCIAS49

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Principales operaciones y actividades de planeación de suministros.....	8
<i>Figura 2</i> Entradas requeridas para la planeación agregada de la producción.	11
<i>Figura 3.</i> Cantidades de publicaciones por país.	19
<i>Figura 4.</i> Publicaciones con o sin ejemplo de aplicación.	19
<i>Figura 5.</i> Frecuencia de uso de herramientas matemáticas.....	28
<i>Figura 6.</i> Funciones objetivo encontradas.	41

Lista de Tablas

Tabla 1. Industrias de aplicación de propuestas encontradas en la literatura.....	20
Tabla 2. Variables consideradas por cada autor.....	22
Tabla 3 Variables adicionales.....	24
Tabla 4. Herramientas matemáticas y autores.....	26
Tabla 5. Ventajas y desventajas de las herramientas usadas.....	29
Tabla 6. Heurísticos y metaheurísticos en la planeación agregada de la producción.	31
Tabla 7. Lista de autores que consideran procesos deterministas y estocásticos.....	32
Tabla 8. Autores que consideran procesos de adquisiciones y/o distribución.	38
Tabla 9. Clasificación por cantidad de funciones objetivo.	43

Resumen

El objetivo del presente trabajo es proporcionar un análisis del estado de la cuestión de la planeación agregada, desarrollado a partir de la revisión de la literatura disponible en revistas científicas y académicas de los años de 2010 a 2019 con la finalidad de ordenar el conocimiento disponible e identificar tendencias, avances y líneas de investigación pendientes de este tema. En la primera parte de este documento se aborda la problemática relacionada con la planeación agregada de la producción, se realiza un breve esbozo histórico y se analizan los puntos principales del tema, incluyendo la ubicación de la planeación agregada como parte del área de estudio de la ingeniería de la cadena de suministro a fin de identificar su importancia y aplicabilidad en los diferentes entornos dentro del ámbito de la planeación y la toma de decisiones empresariales.

Se identifican algunos de los métodos que han sido utilizados al abordar el problema de la planeación agregada de la producción, dado que se considera importante identificar la forma en que se recopila la información, posteriormente se introducen las variables a considerar para este análisis, así como los tipos de datos y su integración en los modelos aplicados. En este trabajo se emplea la metodología de investigación documental, se realiza una búsqueda de artículos publicados en revistas científicas encontrados a través de diversos motores de búsqueda científicos y académicos y de los recursos de la biblioteca virtual de la Universidad Autónoma del Estado de México, se revisó el índice de citación para determinar la relevancia de cada publicación posteriormente y mediante un proceso secuencial de análisis crítico de cada artículo se decidió si se consideraba e

incluía en el este estudio del estado de la cuestión, se tiene el objetivo de emitir, posterior al análisis, un juicio crítico que haga hincapié en las fortalezas y debilidades del planteamiento de cada autor.

Con base en el análisis de los artículos existentes se pretende determinar los problemas a resolver en el futuro dentro de esta área, y se procura realizar una clasificación de estos problemas de acuerdo con la importancia y el plazo en el que se considera deben, o pueden, ser resueltos. El presente trabajo pretende ser de utilidad para investigadores y profesionales del área para determinar los enfoques requeridos para abordar el problema de la planeación agregada de la producción en diferentes situaciones.

Introducción

El problema de la planeación agregada de la producción consiste en determinar los niveles de producción, inventario y fuerza de trabajo necesarios para satisfacer la demanda de una familia de productos con demanda variable a lo largo de un horizonte de planeación situado en el mediano plazo. Dada la naturaleza del mismo, éste ha sido abordado a lo largo del tiempo mediante la aplicación de múltiples herramientas de apoyo para la toma de decisiones. En el presente trabajo se proporciona un reporte de la revisión de la literatura relacionada con la planeación agregada de la producción, con el objetivo de analizar los cambios que han ocurrido a lo largo del tiempo en la forma de abordar el tema, se hace una revisión de las investigaciones publicadas acerca del tema en los últimos diez años. Se considera que la importancia de este proceso de planeación para los de producción está en vincular los planes y objetivos estratégicos de las compañías con las actividades necesarias en otros niveles para cumplirlos, por lo que, los trabajos publicados acerca del tema se clasifican por el tipo de enfoque aplicado, por las variables y los parámetros que se consideran, teniendo en cuenta que estos elementos determinan el enfoque de planeación al que se apega el modelo o método de solución que se propone para el problema de la planeación agregada de la producción, se proporciona un análisis de las publicaciones académicas disponibles no obstante que, como mencionan Nam y Logendran (1992), la frecuencia de aparición de una estrategia método o modelo en la literatura no implica su importancia en el entorno productivo real.

Este trabajo se enfoca principalmente en la revisión de la literatura académica publicada sobre la planeación agregada de la producción en la última década, aunque, es un tema que aparece por primera vez en revistas científicas (*journals*) en 1954 (Hoffman y Jacobs, 1954). La

búsqueda de artículos acerca del tema se llevó a cabo mediante el uso de los motores de búsqueda como Scencedirect, Emerald y otros disponibles en los recursos digitales de la Universidad Autónoma del Estado de México. Las palabras clave empleadas para la búsqueda incluyeron “Aggregate planning” y “Planeación agregada de la producción” así como combinaciones de éstas, sin embargo, estas búsquedas arrojaron resultados de áreas diferentes a la de interés. En tanto la búsqueda con la combinación de palabras “Aggregate production planning”, fue la que arrojó los mejores resultados, ya que, aun cuando se encontraron algunos artículos escritos por autores de América latina, estos fueron publicados en inglés. De los artículos encontrados con las palabras clave mencionadas, se seleccionaron los que fueron publicados entre los años 2010 y 2019, posteriormente mediante la revisión de los títulos de las publicaciones, se realizó un cribado de los documentos encontrados para identificar y conservar solo aquellos efectivamente relacionados con la cadena de suministro.

Del total de 93 artículos recopilados se procedió a la lectura de estos artículos seleccionados por título y fecha. A partir de esta revisión se descartaron 13 artículos, los cuales no estaban relacionados con la planeación agregada de la producción, se encontraron casos de artículos no relacionados con la cadena de suministro y otros enfocados sólo en procesos de distribución y transporte, así como determinación de la demanda o programación de la producción a corto plazo. En esta revisión de la literatura se analizan las publicaciones que abordan el problema de la planeación agregada de la producción sólo o integrándolo con otros procesos de la cadena de suministro como los de adquisiciones, o los relativos a distribución, ventas y programación de la producción.

Como fase inicial del análisis de la literatura se identifican las definiciones propuestas de planeación agregada de la producción y la ubicación de esta en el área de estudio de la cadena de suministro, como segundo análisis se hace un breve esbozo histórico de las investigaciones publicadas acerca de este tema revisando los artículos citados con mayor frecuencia por los autores de las publicaciones analizadas.

El principal elemento de análisis se enfoca en la identificación de las propuestas de solución para el problema de la planeación agregada de la producción prestando especial atención en los aspectos listados a continuación que constituyen la base de las clasificaciones presentadas en este trabajo, estos son:

- País de origen
- Si mencionan un ejemplo de aplicación
- Las variables consideradas en la propuesta
- La integración de la planeación agregada de la producción con otros procesos de la cadena de suministro
- Medida de desempeño
- El método de solución

Justificación

El tema de la planeación agregada de la producción ha sido abordado desde hace más de sesenta años de distintas formas, sin embargo, cada autor lo ha hecho desde un punto de vista disímil, considerando diferentes variables y empleando diversos métodos de solución de los

problemas que plantea, por lo que es necesario identificar los factores más relevantes para determinar su aplicabilidad de los planteamientos y la forma en que las propuestas académicas se adaptan a la realidad actual de los procesos de producción, por lo que este trabajo presenta de manera breve y ordenada, un análisis sistemático de los avances en la investigación acerca de este problema, a fin de determinar las posibles direcciones de la investigación futura, este es un paso fundamental para la generación de conocimiento.

Se considera que existe una importante necesidad de que el trabajo académico de la planeación agregada de la producción apoye en la toma de decisiones del trabajo práctico de la misma área, las propuestas de los investigadores para abordar este problema deben considerar no solo los factores de la tasa de producción, variable por la fuerza de trabajo, y los niveles de inventario, sino también algunos más específicos, por ejemplo, las curvas de aprendizaje del personal, y otros complementarios, como la huella de carbono, entre otras, pertinentes de acuerdo al entorno de aplicación, estos factores deben ser traducidos en forma de variables y relaciones, es decir con énfasis en el mejoramiento de la calidad de las soluciones que se obtienen, además de la velocidad en la búsqueda y obtención de las mismas, con el desarrollo de algoritmos optimizados o bien con mayor capacidad de cómputo, en otras palabras es crítico que dichos factores sean modelados e integrados en las herramientas de análisis propuestas por los investigadores y académicos del área con la finalidad de habilitar su uso efectivo como apoyo para la toma de decisiones en el ámbito práctico.

Objetivo general

Proporcionar una revisión de la literatura académica acerca de la planeación agregada de la producción que permita visualizar los avances actuales, los factores más relevantes para la aplicabilidad de las propuestas y la definición de líneas de investigación potenciales de este tema.

Objetivos particulares

Los siguientes objetivos particulares permiten alcanzar el objetivo general:

- Identificar los artículos referentes al tema publicados en revistas científicas encontrados en motores de búsqueda como Google académico y los recursos de la biblioteca virtual de la universidad.
- Revisar y clasificar los trabajos existentes referentes a la planeación agregada de la producción.
- Identificar la naturaleza de las variables consideradas en cada trabajo que afectan el proceso de producción y la manera en que han sido incluidas en la modelación matemática del problema.
- Determinar problemas a resolver en el futuro dentro de esta área.
- Clasificarlos de acuerdo con su importancia y el plazo en el que se considera deben o pueden ser resueltos.

Metodología

Para la realización del presente trabajo fue necesario llevar a cabo las actividades que se mencionan a continuación:

1. Revisión bibliográfica el trabajo existente referente a la planeación agregada de la producción publicados en revistas de divulgación científica mediante las palabras clave “Aggregate Production Planning”.
2. Seleccionar los artículos referentes al tema con base en la revisión de índices de citación y la lectura crítica de los mismos.
3. Identificar la naturaleza de las variables que cada autor considera afectan el proceso de producción y la forma en que las incluye en su propuesta.
4. Realizar clasificaciones de publicaciones.
5. Determinar los problemas a resolver en el futuro dentro de esta área.
6. Clasificar dichos problemas de acuerdo a la importancia y el plazo en el que se considera deben o pueden ser resueltos.
7. Análisis de resultados y formulación de conclusiones.

Capítulo 1. Antecedentes

La planeación agregada de la producción es parte importante del proceso de planeación de ventas y operaciones, está enfocada en determinar las tasas de producción y niveles de fuerza de trabajo necesarias para grupos o categorías amplias de productos, para satisfacer la demanda establecida por cliente al menor costo en condiciones de demanda variable por estacionalidad. Existen autores que han criticado y cuestionado la utilidad de la planeación agregada, Geoff Buxey (1990) hace hincapié en que para algunos giros productivos existen factores de operación y/o de costo que fuerzan de antemano la postura táctica de la compañía, un claro ejemplo sería la tecnología de altos costos que obliga a mantener una producción continua para mantener los costos fijos en el nivel más bajo posible y al no haber flexibilidad de la producción, la planeación de la producción toma direcciones específicas y corresponde del área de marketing volverse más proactivo dentro de la planeación de ventas y operaciones.

1.1. Planeación agregada de la producción en la administración de la cadena de suministro

Tradicionalmente el termino planeación agregada se refiere al proceso mediante el cual se busca equilibrar la oferta y la demanda de una empresa, recientemente se ha migrado de este al de planeación de ventas y operaciones para hacer hincapié en el esfuerzo integrado requerido de las múltiples áreas involucradas, la planeación agregada de la producción se encuentra dentro de este proceso (Jacobs *et al.* 2011). La planeación agregada ocurre en el nivel táctico (Figura 1), es decir, tiene efectos en el mediano plazo, los autores sitúan el horizonte de planeación entre los 3 y 18 meses, que es un periodo muy largo para la toma de decisiones de enfocadas en la

producción por producto o unidad de control de inventario (*Stock keeping unit, SKU*) y muy corto para decidir lo relacionado con el tamaño y cantidad de instalaciones y maquinaria.

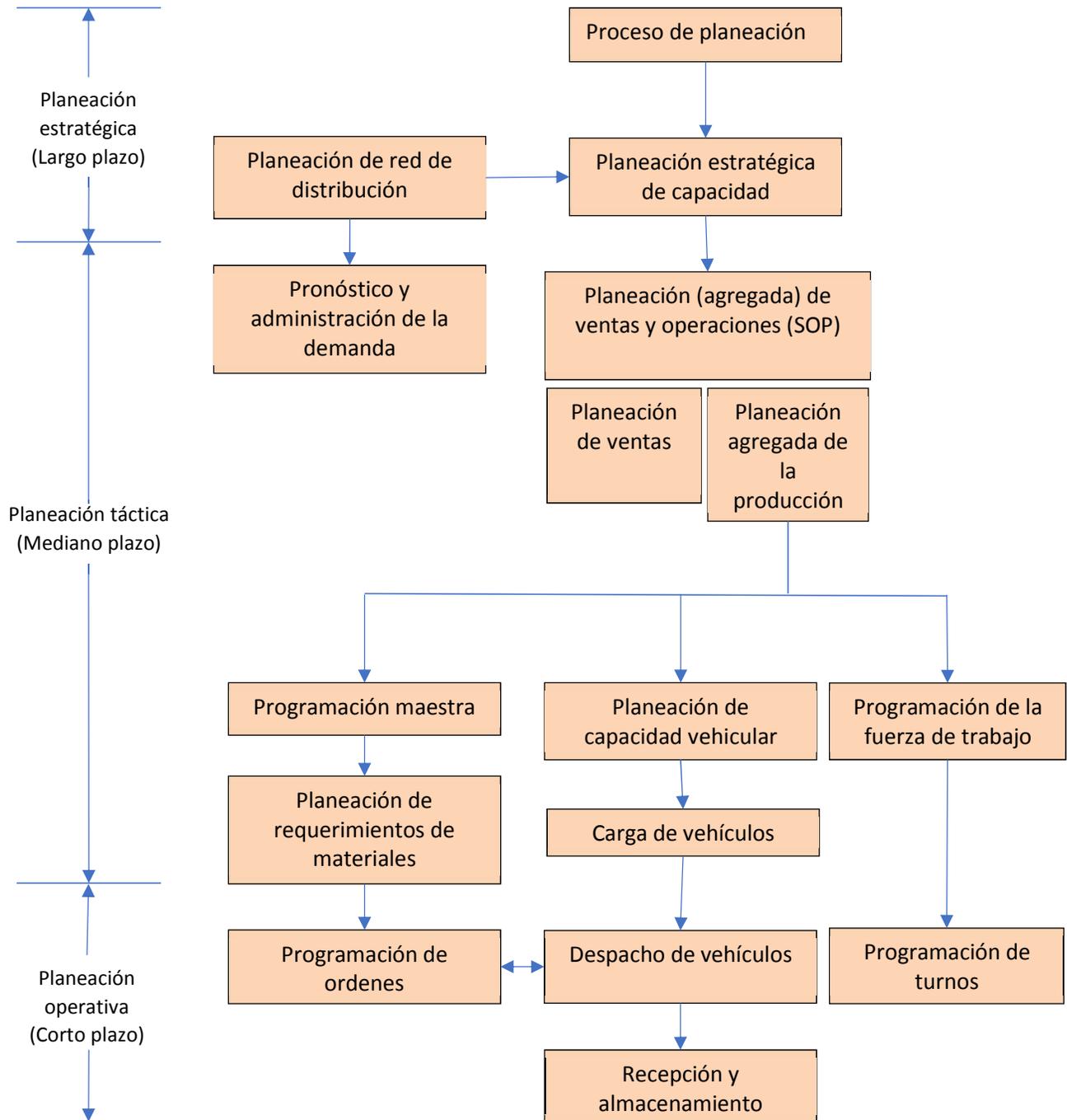


Figura 1. Principales operaciones y actividades de planeación de suministros. (Fuente: Adaptada de Jacobs y B. Chase (2018))

Mediante la planeación agregada una compañía busca determinar los valores óptimos de las cantidades de producción, subcontratación, inventario, faltantes y posiblemente precios, para un horizonte determinado de tiempo (Chopra y Meindl, 2013).

El proceso de planeación inicia con la generación de un plan de ventas, que generalmente se establece en grupos de productos agregados y, es conveniente que tome en consideración, actividades para incentivar las ventas, promociones y otras medidas de marketing. Con la información que se tiene de la demanda esperada se determina el plan de actividades que debe mostrar cómo se usará la capacidad de la empresa para satisfacerla (Waters, 2003), la dificultad de hacer coincidir la capacidad de producción con los patrones de demanda pronosticados suele encontrarse en los cambios significativos que se presentan en esta a lo largo del tiempo como resultado de las variaciones en factores como las tendencias del mercado y otros. La agregación, que consiste básicamente en agrupación por el lado de la oferta se realiza por familias de productos que comparten recursos, tales como maquinaria y materia prima, por lo que se pueden agrupar y ser considerados, para efectos de este nivel de planeación, como un solo producto, y por el lado de la demanda, la agregación se hace por grupos de clientes, estos, al igual que en el caso mencionado anteriormente, deben tener en común atributos como su ubicación, el tipo de productos que requieren, etc. El resultado esperado del proceso de planificación de ventas y operaciones es que los programas de producción de productos individuales, así como los pedidos de los clientes puedan manejarse de manera sencilla, esto es mediante un proceso de desagregación que conduce a los planes de operación a corto plazo. Los procesos agregación y

desagregación son fundamentales para que la planeación táctica pueda traducirse de manera efectiva en planes de nivel operativo (Buxey, 1995).

La planeación agregada determina las operaciones mensualmente, ésta vincula los planes estratégicos y el plan de negocios de una empresa, con sus operaciones detalladas y procesos de suministro, traduce los pronósticos de demanda en requerimientos de recursos y capacidad, identifica las diferencias entre estos y determina la manera más eficiente o económica para eliminarlas (Pochet y Wolsey, 2006)

Para Jacobs y B. Chase (2018), una declaración formal del problema de planificación agregada es: *“Dada la demanda F_t para cada período t en el horizonte de planificación que se extiende sobre T períodos, determine el nivel de producción P_t , el nivel de inventario I_t y el nivel de fuerza laboral W_t para los períodos $t = 1, 2, \dots, T$ que minimice los costos relevantes a lo largo del horizonte de planificación”*.

El plan agregado de producción se ocupa de establecer las tasas de producción por grupo de productos u otras categorías amplias para el período intermedio (3 a 18 meses). Como se puede ver en la Figura 1, el plan agregado precede a la programación maestra de la producción (*Master Production Schedule*, MPS).

La tasa de producción, se refiere al número de productos manufacturados por unidad de tiempo (puede ser por horas o días). El nivel de la fuerza laboral o de trabajo, es la cantidad de mano de obra necesaria para llevar a cabo la producción (producción = tasa de producción \times nivel de la fuerza de trabajo). El inventario disponible, son las unidades de producto terminado o en proceso (*Work In Process*, WIP) que puede ser utilizado y que es proveniente del período anterior.

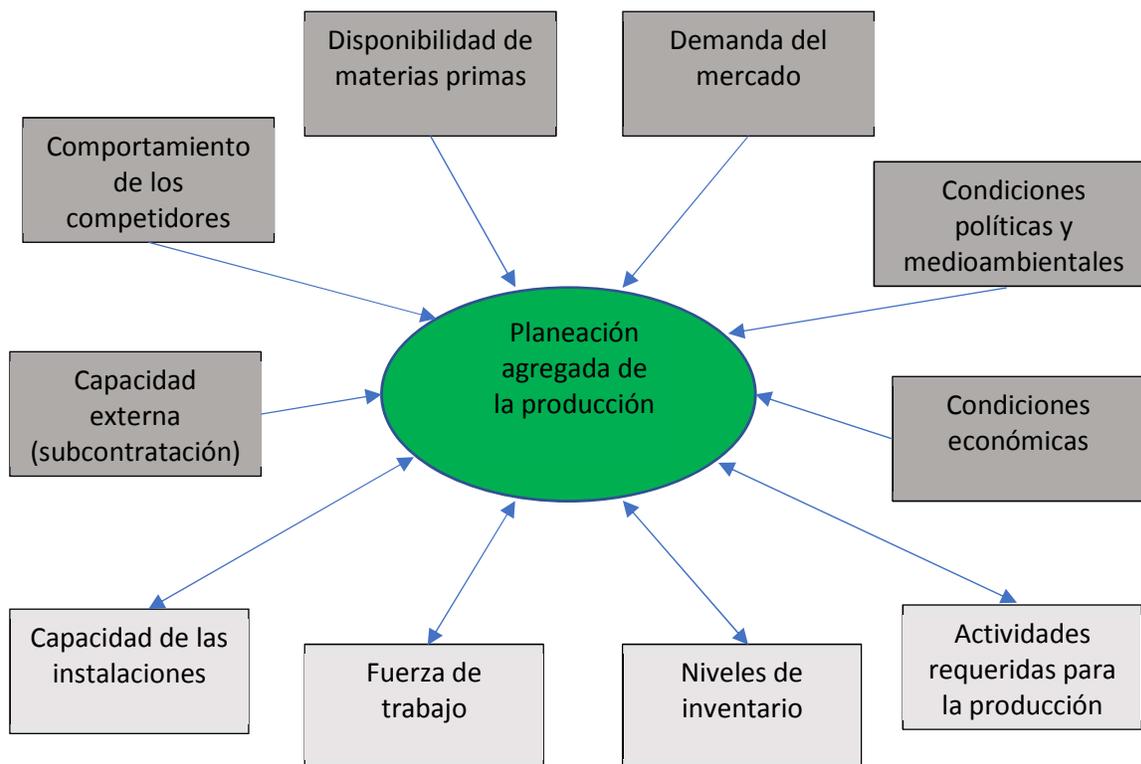


Figura 2 Entradas requeridas para la planeación agregada de la producción. (Fuente: Adaptada de Jacobs et al. (2011))

La Figura 2 muestra los factores que deben ser considerados en el proceso de planeación agregada de la producción, algunos de estos factores son internos de la empresa (fondo claro) y otros son externos (fondo oscuro).

Debido a que, el objetivo es satisfacer la demanda al menor costo, la información requerida para la planeación agregada es, la de los costos resultantes de los cambios en las tasas de producción entre periodos, el principal costo relativo a estos cambios es el de variar el tamaño de la fuerza de laboral, cabe mencionar que el resultado de los cambios de la cantidad de mano de obra contratada pueden ser de efecto adverso para moral de los trabajadores y en la imagen

pública de la compañía, por lo que podría no ser viable por limitar la disponibilidad de mano de obra a la larga (Nahmias y Lennon Olsen, 2015), aun y cuando la literatura sugiere estrategias enfocadas precisamente en variaciones de la fuerza de trabajo conforme a las de la demanda.

1.2. Modelos Básicos

Uno de los modelos básicos de planeación agregada más sencillos que aparecen en los libros es el de dimensionamiento de lote no capacitado (Pochet y Wolsey, 2006), es un modelo de programación entera mixta de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T (p_t x_t + q_t y_t + h_t s_t) \quad (1)$$

s.a.

$$s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad \forall \quad 1 \leq t \leq T \quad (2)$$

$$s_0 = s_T = 0 \quad (3)$$

$$x_t \leq M_t y_t \quad \forall \quad 1 \leq t \leq T \quad (4)$$

$$x_t, s_t, \geq 0 \quad y_t \in \{0,1\} \quad (5)$$

Donde p es el costo de producción por pieza, q es el costo de preparación para la producción y h es el costo de mantener inventario por pieza, por otro lado $t=1, 2, \dots, T$ son los periodos del horizonte de planeación, mientras d es la demanda, las variables de decisión son, x , que es el número de piezas fabricadas por periodo, s , que es la cantidad de inventario por periodo y finalmente y , que es una variable binaria que toma valor de 1 cuando se hace preparación para la producción y de 0 cuando no se hace, de este modo el modelo tiene la función objetivo (1) de minimizar los costos de producción, asociados a la cantidad de producto fabricado y si se realiza o no preparación para la producción, y los costos de mantener inventario,

esta función objetivo está sujeta a las restricciones (2) a (5), la restricción (2) es un balance de inventario, producción y demanda de manera que esta última sea siempre satisfecha, la restricción (3), implica que no haya inventario inicial ni final, mientras la restricción (4), fuerza a que haya preparación de la producción en los periodos en que esta tenga un valor positivo, usa M_t que es un entero positivo muy grande usado como tamaño máximo de lote para el periodo t .

Otro modelo básico aparece en el libro de Nahmias y Olsen, (2015) en este caso, al igual que en prácticamente todas las propuestas de solución del problema de planeación agregada de la producción, se considera la tasa de producción y los niveles de inventario como variables de decisión, sin embargo, esta vez la tasa de producción es definida por la cantidad de trabajadores disponibles y el tiempo extra y regular que pueden trabajar, de modo que los costos de producción incluyen a los de las variaciones de la fuerza de trabajo. Los costos considerados son:

c_H = Costo de contratar a un trabajador,

c_F = Costo de despedir un trabajador,

c_I = Costo de mantener una unidad en inventario durante un período,

c_R = Costo de producir una unidad en tiempo regular,

c_O = Costo incremental de producir una unidad en horas extras,

c_U = Costo inactivo por unidad de producción,

c_S = Costo de subcontratar una unidad de producción,

n_t = Número de días de producción en el período t ,

K = Número de unidades agregadas producidas por un trabajador en un día,

I_0 = Inventario inicial disponible al inicio del horizonte de planificación,

W_0 = Fuerza laboral inicial al inicio del horizonte de planificación,

D_t = Previsión de la demanda en el período t .

Y las siguientes variables de decisión:

W_t = Nivel de fuerza laboral en el período t ,

P_t = Nivel de producción en el período t ,

I_t = Nivel de inventario en el período t ,

H_t = Número de trabajadores contratados en el período t ,

F_t = Número de trabajadores despedidos en el período t ,

O_t = Producción de horas extraordinarias en unidades,

U_t = Tiempo de inactividad del trabajador en unidades ("tiempo inferior"),

S_t = Número de unidades subcontratadas desde el exterior.

De este modo la ecuación (6) es la función objetivo, que es minimizar los costos de producción, los de las variaciones en la fuerza de trabajo y los de mantener inventario, la restricción (7) mantiene la fuerza de trabajo de la que depende la capacidad de producción, expresada en la restricción (8), la restricción (9), está enfocada en la satisfacción de la demanda, y la (10) define la no negatividad de las variables.

A estos modelos básicos se les puede agregar variables y/o restricciones que expresen factores relevantes para la producción, de acuerdo con el enfoque de la propuesta o las necesidades del caso.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^T (c_H H_t + c_F F_t + c_I I_t + c_P P_t + c_O O_t + c_U U_t + c_S S_t) \quad (6)$$

s.a.

$$W_t = W_{t-1} + H_t + F_t \quad \forall \quad 1 \leq t \leq T \quad (7)$$

$$P_t = K n_t W_t + O_t + U_t \quad \forall \quad 1 \leq t \leq T \quad (8)$$

$$I_t = I_{t-1} + P_t + S_t - D_t \quad \forall \quad 1 \leq t \leq T \quad (9)$$

$$H_t, F_t, I_t, O_t, U_t, S_t, W_t, P_t \geq 0 \quad (10)$$

1.3. Primeros modelos

El problema de la planeación agregada de la producción aparece en revistas académicas a partir de la década de los 50's con trabajos como los de Hoffman y Jacobs (1954), Dantzing y Johnson (1955) y Holt *et al.* (1955), este último, reconocido por múltiples autores como el primero en abordar esta cuestión, con una regla de decisión como propuesta para determinar las cantidades de producción agregada por periodo, así como la cantidad de mano de obra requerida para satisfacer la demanda del cliente, atendiendo a las variaciones propias de dicha demanda, al menor costo, comparando los costos de mantenimiento de inventario frente a los de las

contrataciones y despidos requeridos para variar la fuerza laboral ajustándola de acuerdo a lo necesario según la demanda en los periodos del horizonte de planeación, mientras, con el mismo enfoque las publicaciones de Hoffman y Jacobs (1954), así como Dantzing y Johnson (1955) hacen propuestas que emplean programación lineal, de manera más precisa modelos de transporte para definir los planes de producción que permitieran satisfacer patrones de demanda conocidos. Precisamente el supuesto de la demanda determinada con anterioridad es una debilidad de este tipo de modelos ya que no atienden a la posible incertidumbre relacionada con este factor en casos reales, de hecho Hoffman y Jacobs (1954) expresan que este aspecto da ingenuidad a su modelo, por lo que, puede ser útil en algunos casos y poco aplicable a otros.

Silver (1976), menciona que las propuestas vistas por él hasta ese momento podían agruparse en tres grupos básicos que eran:

1. Las de naturaleza no matemática, en las que el tomador de decisiones no está al tanto de la existencia de modelos matemáticos para la realización de este proceso de planeación o considera que los modelos matemáticos existentes no son adecuados y no representan correctamente la realidad.
2. Las de modelación matemática con óptimos teóricos alcanzables, que son modelos que, si bien presentan una solución óptima, están contruidos sobre supuestos poco realistas.
3. Propuestas basadas en modelos matemáticos ajustados en la realidad, en los que no se garantiza una solución óptima, pero como las funciones de costo son modeladas de la manera más realista posible se aplican heurísticos o reglas de decisión que permiten llegar a soluciones razonablemente buenas.

Capítulo 2. Revisión de la literatura

Algunas características de los productos y sus procesos de producción tienen un peso importante en la postura táctica que debe tomar la empresa dedicada a su fabricación, para que esta sea sostenible, cuando los productos son de alto valor, de difícil almacenaje o de corta vida útil es necesario mantener inventario mínimo y ajustar la capacidad de producción a los patrones de demanda, un facilitador importante para este tipo de estrategia es sería que la fuerza de trabajo requerida pueda ser contratada fácilmente por periodos cortos.

En las empresas para las que la fuerza de trabajo requiera largos periodos de entrenamiento o que la disponibilidad limitada de algunos recursos como la capacidad de la maquinaria impida seguir las variaciones de demanda, se deberá aplicar una estrategia que permita ciertos niveles de inventario y recurra menos a la variación de la fuerza de trabajo, por otro lado si las condiciones son que el personal debe ser altamente especializado o la administración de la empresa busca que la planta opere a su máxima capacidad debido a los altos costos tecnológicos de esta, además de que haya poca variedad de producto y el mismo pierda poco de su valor a lo largo del tiempo, se deberá adoptar una postura de nivel de producción constante, de manera que las pérdidas de valor sean evitadas con la implementación de medidas de modificación de la demanda (Buxey, 2005).

Aun con la influencia de estos factores, es pertinente la búsqueda de soluciones que minimicen los costos de producción, a fin de mantener la competitividad y rentabilidad de la empresa, ya que las posturas tácticas extremas (cero inventarios o producción constante) suelen ser incapaces de superar el desempeño de las que contemplan un balance entre ellas

(Dejonckheere *et al.* 2003), el tipo de soluciones que representan estos enfoques tácticos pueden hallarse mediante la implementación de herramientas de fundamento cuantitativo que apoyan a la toma de decisiones mediante la determinación de la o las mejores formas de administrar los recursos disponibles para satisfacer la demanda.

2.1. Países de origen de las investigaciones e industrias de aplicación

Uno de los primeros criterios de clasificación de los artículos recolectados es el país de procedencia del artículo, para el presente trabajo se considera como el país en el que se encuentra la institución en la que trabajaba el primer autor al publicar el trabajo analizado, la gráfica de la Figura 3, muestra los lugares de procedencia de los artículos, siendo Irán el país con mayor número de publicaciones con veintitrés seguido por la India con ocho y otros países asiáticos y europeos, con poca participación proveniente del continente americano lo cual puede estar relacionado con la situación política y social de la región. El país de procedencia de las publicaciones es relevante para la aplicabilidad de las propuestas debido a que este factor determina condiciones políticas, económicas y sociales, tales como leyes laborales, impuestos, tasas de cambio y niveles de educación del personal disponible, todos estos elementos pueden ser de importancia dependiendo del caso de aplicación.

Un factor determinante de la relevancia de la literatura relacionada con el tema de la planeación agregada es el de si las publicaciones presentan, o no, un ejemplo de aplicación del método o modelo que proponen para atender este problema, en esta revisión se detectó que existe una importante cantidad de artículos publicados en los que los autores refieren haber usado información proveniente de empresas reales (Figura 4), ya sea para probar la funcionalidad teórica de su propuesta o como fuente de inspiración para la misma, aunque dada

la naturaleza de la información manejada, no reportan los efectos de la implementación real o si dicha implementación fue llevada a cabo, sin embargo, la proporción de publicaciones relacionadas con casos reales muestra el interés de los académicos por formular modelos que representen la toma de decisiones en situaciones reales.

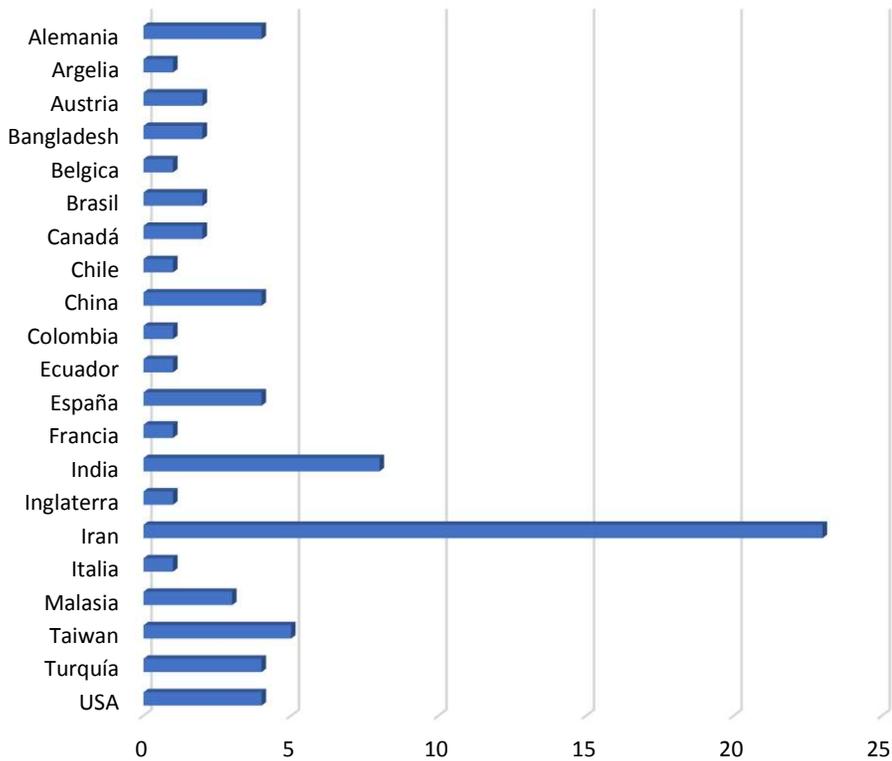


Figura 3. Cantidades de publicaciones por país. (Fuente: Elaboración propia)

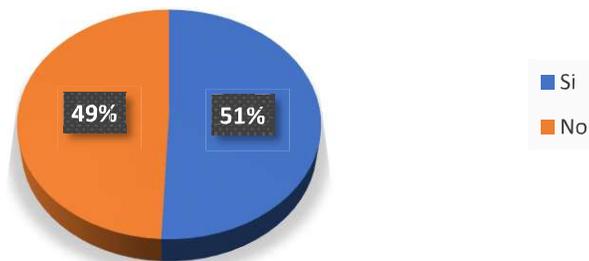


Figura 4. Publicaciones con o sin ejemplo de aplicación. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 1. Industrias de aplicación de propuestas encontradas en la literatura.

Autores	Industria de aplicación
Kazemi Zanjani et al. (2010)	Aserradero
Varthanan et al. (2010a)	Fábrica de rodamientos
Sakalli et al. (2010)	Fundición de latón
Kanyalkar y Adil (2010)	Bienes de consumo
Varthanan et al. (2010b)	Fábrica de rodamientos
Tian et al. (2010)	Producción de asfalto
Mirzapour Al-E-Hashem, et al. (2011)	Industria de madera y papel
Sillekens, et al. (2011)	Industria automotriz
T. F. Liang et al. (2011)	Producción de partes aeroespaciales
T.-F. Liang y Cheng (2011)	Producción de maquinaria de precisión
B. Li et al. (2013)	Industria automotriz, fábrica de pintura
Sadeghi et al. (2013)	Industria de electrodomésticos
Madadi y Wong (2013)	Partes automotrices
Mouslim (2013)	Industria de hierro
Chakraborty y Hasin (2013)	Industria de tejidos
da Silva y Marins (2014)	Industria de azúcar
Wang y Yeh (2014)	Industria de jardinería
Gansterer (2015)	Autopartes
Z. Chen y Sarker (2015)	Industria de repelente para mosquitos
Foo (2016)	Industria de polímeros
Fiasché et al. (2015)	Industria electrónica
Makui et al. (2016)	Industria de calendarios
Modarres e Izadpanahi (2016)	Industria de fundición
Linfati-Medina et al. (2016)	Industria forestal
Erfanian y Pirayesh (2016)	Industria farmacéutica
Aboozar Jamalnia et al. (2017)	Industria de bebidas
Mosadegh et al. (2017)	No especificado
Hahn y Brandenburg (2018)	Industria química
Rosero-Mantilla et al. (2017)	Industria de hule
Chauhan et al. (2017)	Industria de engranes
Yaghin (2018)	Industria de ropa
Demirel et al. (2018)	Industria automotriz y textil
Omar et al. (2012)	Fábrica de resina
Rasmi et al. (2019)	Industria de electrodomésticos
Topcuoglu et al. (2019)	Industria de bebidas

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 1 se listan las industrias o ramos de aplicación de las propuestas de solución del problema de la planeación agregada de la producción, encontradas en la literatura revisada, el presente análisis no arroja evidencia suficiente de que la aplicabilidad de modelos matemáticos de este tipo sea más viable para empresas de algún giro o categoría en particular, sin embargo, cada artículo presenta consideraciones especiales para ajustar el modelo propuesto a la realidad de los procesos en los que podría ser aplicado, es decir que se requieren consideraciones específicas para la aplicación de un modelo o método de solución a un caso real a fin de que éste represente los procesos de manera que las soluciones obtenidas sean útiles y de aplicación factible. Es un factor crítico que determina el valor de un modelo, la correcta distinción entre los elementos relevantes, y los de impacto despreciable, para el logro de los objetivos de la empresa en el nivel táctico de la administración de la cadena de suministro (Dejonckheere *et al.*, 2003).

2.2. Variables consideradas

Un factor de gran relevancia para determinar el enfoque de la propuesta de solución de este problema, es la cantidad de variables consideradas, la Tabla 2, muestra algunas de las variables consideradas por los autores de la bibliografía revisada, además de indicar si las publicaciones mencionan un caso de aplicación o al menos estar inspirados en información real, las variables son:

V1 Producción por periodo

V2 Inventario

V3 Faltantes

V4 Contratación y despido

V5 Subcontratación

V6 Tiempo extra y regular

V7 Adquisiciones

V8 Distribución

V9 Otros

Todas estas variables están relacionadas con cuánto, cuándo y cómo producir, a fin de satisfacer la demanda de los clientes a lo largo del horizonte de planeación.

Tabla 2. Variables consideradas por cada autor.

Autor	Ejemplo		Variables								
	Si	No	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6	V 7	V 8	V 9
Kazemi Zanjani et al. (2010)	X		X	X	X				X		
Varthanan et al. (2010a)	X		X	X	X	X	X	X		X	
S.-P. Chen y Huang (2010)		X	X	X	X	X		X			
Sakallı et al. (2010)	X		X	X					X		
Kanyalkar y Adil (2010)	X		X	X	X				X	X	
Silva Filho et al. (2010)		X	X	X			X	X			
Varthanan et al. (2010b)	X		X	X	X	X	X	X		X	
Baykasoglu y Gocken (2010)		X	X	X	X	X		X			
Z. Li e Ierapetritou (2010)		X	X	X	X						
Tian et al. (2010)	X			X						X	
Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011)	X		X	X	X	X		X	X	X	X
Pal et al. (2011)		X		X					X	X	
Sillekens et al. (2011)	X		X	X		X					
T. F. Liang et al. (2011)	X		X	X	X	X	X	X			
T.-F. Liang y Cheng (2011)	X		X	X	X	X	X	X			
Corominas et al. (2012)		X	X	X	X			X	X		X
B. Li et al. (2013)	X		X	X		X		X			X
Sadeghi et al. (2013)	X		X	X	X	X	X	X			
Al-e et al. (2012)		X	X	X	X	X				X	X
Yaghin et al. (2012)		X	X	X		X		X		X	X
Moghaddam et al. (2012)		X	X	X	X	X		X		X	X
Omar et al. (2012)	X		X	X	X						X
Mitra et al. (2012)		X	X	X							X
Ramezani et al. (2012)		X		X	X	X	X	X			
Thomé et al. (2012)											
Zhang et al. (2012)		X	X	X							X
Ning et al. (2013)		X	X	X	X	X	X	X			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Variables consideradas por cada autor (Continuación).

Autor	Ejemplo		Variables								
	Si	No	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6	V 7	V 8	V 9
Madadi y Wong (2013)	X	X	X	X	X				X		X
Raa et al. (2013)		X	X	X					X	X	
Abouzar Jamalnia y Feili (2013)	X		X	X	X	X	X	X			
Mirzapour Al-e-Hashem et al. (2013)		X	X	X		X			X	X	
Mouslim (2013)		X	X	X		X					
Chakrabortty y Hasin (2013)	X		X	X	X	X	X	X			
da Silva y Marins (2014)	X		X	X					X	X	
Wang y Yeh (2014)	X		X	X	X	X		X			
Kaveh y Dalfard (2014)		X	X	X	X	X	X	X			
Raa et al. (2013)		X	X	X					X	X	
S.-P. Chen y Huang (2014)		X	X	X	X	X		X			
D. Mendoza et al. (2014)		X	X	X	X	X	X	X			
Gansterer (2015)	X		X	X	X						
Z. Chen y Sarker (2015)	X		X	X		X		X			
Foo (2016)	X		X	X							
Bushuev (2014)		X	X	X	X	X		X			
Niknamfar et al. (2015)		X	X	X	X					X	
Entezaminia et al. (2016)		X	X	X	X	X		X	X	X	
Fiasché et al. (2015)	X		X	X							
Makui et al. (2016)	X		X	X		X					
Modarres e Izadpanahi (2016)	X		X	X	X						
Linfati-Medina et al. (2016)	X		X	X						X	
Erfanian y Pirayesh (2016)	X		X	X	X	X		X			
Aboozar Jamalnia et al. (2017)	X		X	X	X	X		X			
Mosadegh et al. (2017)	X		X	X	X	X		X			
Hahn y Brandenburg (2018)	X		X	X	X			X			
Rosero-Mantilla et al. (2017)	X		X	X		X	X	X			
Chauhan et al. (2017)	X		X	X	X	X	X	X	X		
Yaghin (2018)	X		X	X		X	X	X			
Vogel et al. (2017)		X	X	X	X			X			
Chaturvedi (2017)		X	X								
Nobari et al. (2018)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Bagchi y Paul (2018)		X	X	X	X						
Demirel et al. (2018)	X		X	X	X	X		X			
Mehdizadeh et al. (2018)		X	X	X	X	X	X	X			
Hossain e Islam (2018)		X		X	X	X	X	X			
Goli et al. (2019)		X	X	X	X	X	X				
Hafezalkotob et al. (2019)		X	X	X		X		X			
Tirkolaei et al. (2019)		X	X	X	X	X	X	X			
Rasmi et al. (2019)	X		X	X	X	X	X	X			
Topcuoglu et al. (2019)	X		X	X		X		X			

Fuente: Elaboración propia

Las variables de producción por periodo, y los niveles de inventario son las variables fundamentales que aparecen en prácticamente todas las publicaciones, mientras las relacionadas

con faltantes, contratación y despido, subcontratación además del tiempo extra y regular, aparecen con ligera menor frecuencia ya que influyen en las decisiones que se abordan con mayor frecuencia en la literatura revisada sin embargo en algunos trabajos se toman en cuenta otros factores, la consideración de los mismos constituye el diferenciador de la propuesta del autor al abordar el problema de la planeación agregada de la producción, las variables asociadas a estos factores, listadas en la Tabla 3, están relacionadas con aspectos que, de acuerdo con la experiencia de los autores revisados, no han sido suficientemente investigados, al menos en el contexto en el que cada uno lo aborda.

Tabla 3. Variables adicionales

Autores	Variables consideradas
Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011)	Método de producción, capacitación
Corominas et al. (2012)	Compra de productos usados para remanufactura
B. Li et al. (2013)	Incertidumbre en la demanda
Al-e et al. (2012)	Método de producción, capacitación
Yaghin et al. (2012)	Costos de publicidad
Moghaddam et al. (2012)	Valor del dinero en el tiempo y tasas de cambio
Omar et al. (2012)	Costos de preparación
Mitra et al. (2012)	Costos de arranque y paro de maquinas
Zhang et al. (2012)	Cambios de capacidad
Madadi y Wong (2013)	Capacitación
da Silva y Marins (2014)	disponibilidad de materia prima
Z. Chen y Sarker (2015)	Nivel de capacitación del personal
Foo (2016)	Precio de venta
Niknamfar et al. (2015)	Transporte de producto a través de centros de distribución
Entezaminia et al. (2016)	Costos ambientales
Fiasché et al. (2015)	Costos de preparación
Makui et al. (2016)	Producción e inventario de producto semiterminado
Modarres e Izadpanahi (2016)	Consumo de energía
Linfati-Medina et al. (2016)	Precios de venta, intercambios de producto
Erfanian y Pirayesh (2016)	Costos de mantenimiento en tiempo y dinero
Aboozar Jamalnia et al. (2017)	Precio del producto costos de publicidad

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Variables adicionales (Continuación)

Autores	Variables consideradas
Hahn y Brandenburg (2018)	WIP Rutas de producción, energía
Rosero-Mantilla et al. (2017)	Porcentaje de capacidad usada
Yaghin (2018)	Precio de venta, costo de publicidad
Chaturvedi (2017)	Consumo energético en múltiples instalaciones
Nobari et al. (2018)	Costos de transporte, confiabilidad de proveedores
Demirel, et al. (2018)	Límite superior e inferior de producción
Mehdizadeh et al. (2018)	Costos de preparación, mantenimiento y fallas de equipo, efecto de aprendizaje
Rasmi, et al. (2019)	Múltiples variables ambientales, sociales y culturales

Fuente: Elaboración propia

Las variables adicionales están relacionadas con procesos como los de capacitación y aprendizaje del personal, el mantenimiento de equipos, que normalmente son estudiados aparte de la planeación de la producción, por otro lado, incluyen factores como la huella de carbono, asociada al tipo de energía usada para la producción, procesos de reciclaje y reutilización de materiales y productos, e incluso cuestiones sociales y culturales. El modelo de Sakallı *et al.* (2010) está enfocado principalmente en los costos de materia prima, ya que este es el factor de costo más importante para el tipo de industria de aplicación, por lo que las variables de decisión consideradas están relacionadas con la forma en que se usa dicha materia prima y el costo que esto genera, esto deja claro que si bien como menciona Buxey (1990; 2005) cada tipo de industria tiene características que influyen de manera importante en la postura táctica que deben adoptar, no deja de ser pertinente un análisis cuantitativo para determinar la manera de satisfacer la demanda del cliente al menor costo posible.

Brandenburg y Hahn (2018) hacen una aportación al problema de la planeación agregada al presentar una serie de datos que representan un problema de *benchmark* para probar propuestas académicas para la solución de este problema, en cuanto a su eficiencia

computacional y calidad de las soluciones obtenidas, considerando las condiciones aplicables para la industria química. La propuesta de problemas de *benchmark* permite que las herramientas estandarizadas de apoyo en la toma de decisiones sean revisadas y ajustadas a condiciones específicas.

Un faltante detectado en la literatura revisada, es el relacionado con los detalles de la obtención de la información necesaria, este asunto es importante porque el valor de cualquier herramienta de apoyo en la toma de decisiones depende en gran medida de la calidad de la información que tiene como entrada, algunos supuestos de las funciones de costo pueden caer en la simplificación excesiva (Davizón *et al.* 2015), lo que las aleja de la realidad lo que resta valor a los modelos matemáticos que las usan en situaciones reales de toma de decisiones de planeación agregada de la producción.

2.3. Herramientas de análisis

Las herramientas utilizadas por los investigadores para el modelado del problema y la búsqueda de soluciones, varían dependiendo de los requerimientos establecidos por los supuestos que constituyen la base de la investigación.

Tabla 4. Herramientas matemáticas y autores.

Herramienta matemática	Autores que la han usado
Programación lineal	Silva Filho et al. (2010), Corominas et al. (2012), Gansterer (2015), Hahn y Brandenburg (2018), Hafezalkotob et al. (2019)
Optimización robusta	Kanyalkar y Adil (2010), Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011), Al-e et al. (2012), Niknamfar et al. (2015), Modarres e Izadpanahi (2016), Makui et al. (2016), Goli et al. (2019)
Programación difusa	S.-P. Chen y Huang (2010), Baykasoglu y Gocken (2010), T. F. Liang et al. (2011), T.-F. Liang y Cheng (2011), Sadeghi et al. (2013), Yaghin et al. (2012), Omar et al. (2012), Mouslim (2013), Madadi y Wong (2013), da Silva y Marins (2014), S.-P. Chen y Huang (2014), Z. Chen y Sarker (2015), Fiasché et al. (2015), Mosadegh et al. (2017), Tirkolae et al. (2019), Topcuoglu et al. (2019), Kazemi Zanjani et al. (2010), Hossain e Islam (2018)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Herramientas matemáticas y autores (Continuación).

Herramienta matemática	Autores que la han usado
Programación estocástica	Kazemi Zanjani et al. (2010), Sakallı et al. (2010), Mirzapour Al-e-Hashem et al. (2013), Aboozar Jamalnia et al. (2017), Nobari et al. (2018)
Programación entera mixta	Varthanan et al. (2010a), Varthanan et al. (2010b), Z. Li e Ierapetritou (2010), Pal et al. (2011), Sillekens et al. (2011), Mitra et al. (2012), Ramezani et al. (2012), Zhang et al. (2012), Madadi y Wong (2013), Raa et al. (2013), Chakraborty y Hasin (2013), Wang y Yeh (2014), Kaveh y Dalfard (2014), Entezaminia et al. (2016), Linfati-Medina et al. (2016), Erfanian y Pirayesh (2016), Chauhan et al. (2017), Vogel et al. (2017), Demirel, et al. (2018), Mehdizadeh et al. (2018), Rasmi, et al. (2019)
Programación no lineal	Varthanan et al. (2010a), Varthanan et al. (2010b), Ning et al. (2013), Aboozar Jamalnia et al. (2017), Yaghin (2018)
Programación por metas	(Moghaddam et al., 2012), Mouslim (2013), da Silva y Marins (2014), Madadi y Wong (2013), Tirkolaee et al. (2019)
Simulación	Tian et al. (2010), Abouzar Jamalnia y Feili (2013), D. Mendoza et al. (2014), Gansterer (2015)
Heurísticos y metaheurísticos	Varthanan et al. (2010a), Varthanan et al. (2010b), Baykasoglu y Gocken (2010), Pal et al. (2011), Al-e et al. (2012), Ramezani et al. (2012), Zhang et al. (2012), Chakraborty y Hasin (2013), Wang y Yeh (2014), Kaveh y Dalfard (2014), Makui et al. (2016), Nobari et al. (2018), Mehdizadeh et al. (2018), Hossain e Islam (2018), Goli et al. (2019)
Otras	B. Li et al. (2013), Foo (2016), Bushuev (2014), Rosero-Mantilla et al. (2017), Chaturvedi (2017), Bagchi y Paul (2018), Z. Li e Ierapetritou (2010), Entezaminia et al. (2016), Modarres e Izadpanahi (2016), Hahn y Brandenburg (2018), Demirel, et al. (2018), Hafezalkotob et al. (2019)

Fuente: Elaboración propia

A lo largo de la revisión de la literatura se identificó que la programación matemática es, quizás, la herramienta más adecuada para la resolución del problema de la planeación agregada de la producción, ya que permite evaluar las soluciones que cumplen con los requisitos de las empresas. La Tabla 4, presenta las herramientas matemáticas encontradas con mayor frecuencia en la literatura y la lista de los autores que las han propuesto para abordar este problema, estas se presentan también de manera visual en la grafica de la Figura 5, en el apartado de otros se agrupan métodos de modelación y solución que se presentaron con menor frecuencia que los demás, estos son, reglas de decisión, modelo de segmentación automatizado, optimización convexa, comparación de costos, método gráfico, modelo de inventarios (s-S), AHP, métrica LP, teoría de líneas de espera, algoritmo de horizonte rodante y teoría de juegos.

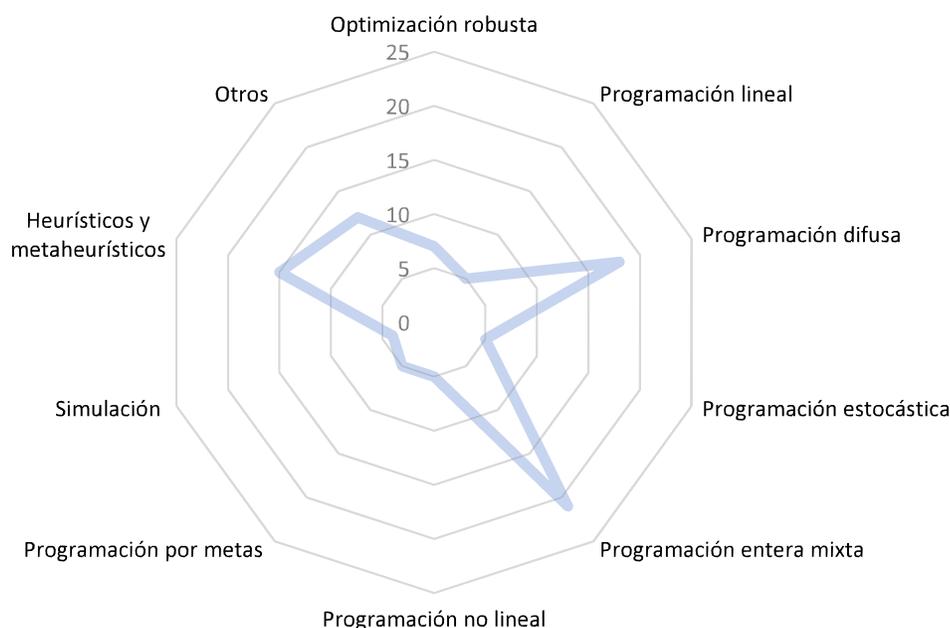


Figura 5. Frecuencia de uso de herramientas matemáticas. (Fuente: Elaboración propia)

Cada una de las propuestas de los autores a este problema presenta diferentes ventajas y desventajas (Tabla 5), mientras algunos modelos matemáticos pueden resultar intimidantes para los tomadores de decisiones debido a su complejidad y el nivel de dominio de herramientas matemáticas y/o de programación requerido, otros incurren en el uso de supuestos y simplificaciones de las relaciones entre factores importantes para la producción de manera que se encuentran demasiado limitados para representar la realidad de los escenarios de toma de decisiones, de modo que, la manera más eficiente de superar las desventajas es la combinación de herramientas de modo que la suma de pros y contras permita hallar soluciones razonablemente buenas. La selección de la propuesta aplicable para un caso real de planeación

agregada dependerá, de la naturaleza del problema en sí, y de los recursos computacionales e intelectuales disponibles para la toma de decisiones, las limitaciones en estos últimos factores conducen a la falta aplicación de herramientas cuantitativas, enfocadas en la optimización de procesos y por tanto, la aplicación de soluciones, que si bien, no se tiene evidencia de que tan buenas sean, se obtienen de manera rápida y sencilla (DuBois y Oliff, 1991; Buxey, 2005).

Tabla 5. Ventajas y desventajas de las herramientas usadas.

Herramienta matemática	Ventajas	Desventajas
Programación lineal	Permite encontrar soluciones óptimas de manera rápida en instancias pequeñas	Requiere múltiples suposiciones y simplificaciones
Optimización robusta	Permite manejar incertidumbre	El problema puede ser demasiado grande para resolverse de manera óptima
Programación difusa	Permite manejar imprecisiones de información	Sujeto a apreciaciones subjetivas Puede resultar difícil comunicar requerimientos y resultados a personal administrativo
Programación estocástica	Permite manejar incertidumbre	Está sujeta a apreciaciones subjetivas La consideración de procesos estocásticos incrementa la complejidad de los modelos El problema puede ser demasiado grande para resolverse de manera óptima
Programación entera mixta	Se ajusta bien a la naturaleza de los costos de preparación, inicio de producción, decisiones de asignación, etc. Permite considerar múltiples objetivos	El problema puede ser demasiado grande para resolverse de manera óptima Requiere múltiples suposiciones y simplificaciones
Programación no lineal	Permite considerar comportamientos no lineales de los procesos	La consideración de no linealidad incrementa la complejidad de los modelos El problema puede ser demasiado grande para resolverse de manera óptima
Programación por metas	Permite considerar múltiples objetivos, aunque estos estén en conflicto	El problema puede ser demasiado grande para resolverse de manera óptima

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Ventajas y desventajas de las herramientas usadas (Continuación).

Herramienta matemática	Ventajas	Desventajas
Simulación	Permite manejar incertidumbre Permite observar el comportamiento del sistema Permite identificar indicadores clave Mayor eficiencia computacional que la programación matemática	No entrega soluciones óptimas Se requiere competencia en el uso de software específico para representar los procesos
Heurísticos y metaheurísticos	Mayor eficiencia computacional que los métodos tradicionales de optimización Permiten tratar problemas de programación no lineal o de programación lineal grandes	Se requieren grandes habilidades de programación y conocimiento de los fundamentos matemáticos de los modelos analizados

Kang y Choi (2010) identifican algunas de las dificultades para la aplicación del trabajo académico en la producción real, estas están dadas por las restricciones complejas que se presentan en la realidad, los cambios en los parámetros y por la integración de otros procesos, como la programación diaria de la producción, factores que incrementan significativamente la complejidad del problema, otra de las limitantes señaladas, es el hecho de que los académicos e investigadores tienen enfoques sobresimplificados en comparación con la realidad, es decir, mientras en el mundo de aplicación los problemas son complejos e incluyen una gran cantidad de parámetros y variables debidas a factores dependientes e independientes de la empresa, la investigación producida se avoca a la solución de problemas específicos que suelen estar relacionados con sólo uno, o algunos de estos factores, pero no con todos, razón por la que ellos integran los procesos de planeación y programación de la producción en un sistema multi-agentes, que realiza una búsqueda de soluciones factibles dentro del espacio de la función.

Dada la naturaleza combinatoria del problema de la planeación agregada de la producción, el espacio de soluciones crece de manera exponencial al aumentar el tamaño del problema, por lo que puede ser extremadamente grande para instancias de aplicación real, lo

que ocasiona que la búsqueda exhaustiva de la solución óptima se vuelva imposible (Considerando la capacidad de cómputo disponible), es decir, la inclusión de más variables en los modelos que abordan el problema de la planeación agregada, hace que dichos modelos sean cada vez más complejos, algunos autores han presentado modelos matemáticos de planeación agregada con tantas variables y tantas restricciones que la evaluación de cada una de las posibles soluciones para determinar la óptima resulta imposible, en instancias de aplicaciones industriales reales, por la cantidad de tiempo que tomaría, por lo que se tiene que recurrir a algoritmos de búsqueda de soluciones que, aunque no sean óptimas, sean lo suficientemente buenas para ser usadas; estos algoritmos, llamados heurísticos o meta-heurísticos recurren a estrategias observadas en otras áreas como la biología, los algoritmos identificados en la literatura se recopilan y presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Heurísticos y metaheurísticos en la planeación agregada de la producción.

Autor	Algoritmo heurístico o metaheurístico
Varthanan et al. (2010a)	Algoritmos genéticos
Varthanan et al. (2010b)	Algoritmos meméticos
Baykasoglu y Gocken (2010)	Búsqueda tabú
Pal et al. (2011)	Optimización de enjambres de partículas
Al-e et al. (2012)	Algoritmos genéticos
Ramezani et al. (2012)	Algoritmos genéticos y búsqueda tabú
Zhang et al. (2012)	Búsqueda de rayos (Beam search)
Chakraborty y Hasin (2013)	Algoritmos genéticos
Wang y Yeh (2014)	Optimización de enjambre de partículas modificada
Kaveh y Dalfard (2014)	Recocido simulado
Makui et al. (2016)	Algoritmo acelerado de descomposición de dobladores
Nobari et al. (2018)	Algoritmos genéticos y algoritmo imperialista competitivo
Mehdizadeh et al. (2018)	Variantes de algoritmos genéticos
Hossain e Islam (2018)	Optimización de enjambres de partículas
Goli et al. (2019)	Algoritmos genéticos y optimización de hierbas invasivas

Fuente: *Elaboración propia*

Como se ha visto en las tablas anteriores algunas de las herramientas de análisis están enfocadas directamente en atender la incertidumbre que puede ser inevitable en algunos procesos al interior de las cadenas de suministro, en el caso de la planeación agregada existen investigaciones publicadas que se enfocan en atender a estas condiciones de incertidumbre que pueden comprometer el funcionamiento de toda la cadena de suministro. En 2010 investigaciones como la de Kazemi *et al.* (2010) que propone un modelo de programación estocástica y el de Sakall *et al.* (2010), que aplica un modelo, definido por ellos como “posibilístico”, con fundamento teórico muy parecido al de la programación difusa, es decir, considera distribución de probabilidad triangular de los requerimientos de materiales, abordan el problema de la planeación agregada de la producción considerando la incertidumbre de este proceso debido a los cambios en la demanda y en las necesidades de materia prima, mientras la fuerza de trabajo se mantiene constante dentro del horizonte de planeación.

Bajo el enfoque de la incertidumbre las propuestas analizadas en este trabajo pueden clasificarse en dos grupos, uno compuesto por aquellas que consideran deterministas los procesos en los que se enfocan y el otro por las que consideran procesos estocásticos, estos se encuentran listados en la Tabla 7.

Tabla 7. Lista de autores que consideran procesos deterministas y estocásticos.

Deterministas	Estocásticos
Varthanan et al. (2010a)	Kazemi Zanjani et al. (2010)
Varthanan et al. (2010b)	S.-P. Chen y Huang, (2010)
Z. Li e Ierapetritou (2010)	Kanyalkar y Adil (2010)
Tian et al. (2010)	Silva Filho et al. (2010)
Pal et al. (2011)	Baykasoglu y Gocken (2010)
Sillekens et al. (2011)	Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011)
Corominas et al. (2012)	T. F. Liang et al. (2011)
Moghaddam et al. (2012)	T.-F. Liang y Cheng (2011)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Lista de autores que consideran procesos deterministas y estocásticos. (Continuación)

Deterministas	Estocásticos
Mitra et al. (2012)	Sadeghi et al. (2013)
Ramezani et al. (2012)	Al-e et al. (2012)
Zhang et al. (2012)	Yaghin et al. (2012)
Madadi y Wong (2013)	Omar et al. (2012)
Raa et al., (2013)	Ning et al. (2013)
Chakraborty y Hasin (2013)	Mirzapour Al-e-Hashem et al. (2013)
Wang y Yeh (2014)	Mouslim (2013)
Kaveh y Dalfard (2014)	da Silva y Marins (2014)
D. Mendoza et al. (2014)	S.-P. Chen y Huang (2014)
Gansterer (2015)	Z. Chen y Sarker (2015)
Foo (2016)	Niknamfar et al. (2015)
Bushuev (2014)	Fiasché et al. (2015)
Entezaminia et al. (2016)	Makui et al. (2016)
Linfati-Medina et al. (2016)	Modarres e Izadpanahi (2016)
Erfanian y Pirayesh (2016)	Aboozar Jamalnia et al. (2017)
Rosero-Mantilla et al. (2017)	Mosadegh et al. (2017)
Yaghin (2018)	Hahn y Brandenburg (2018)
Vogel et al. (2017)	Chauhan et al. (2017)
Chaturvedi (2017)	Nobari et al. (2018)
Demirel, et al. (2018)	Bagchi y Paul (2018)
Mehdizadeh et al. (2018)	Hossain e Islam (2018)
Goli et al. (2019)	Tirkolae et al. (2019)
Hafezalkotob et al. (2019)	Topcuoglu et al. (2019)
Rasmi, et al. (2019)	B. Li et al. (2013)
	Sakalli et al. (2010)

Fuente: Elaboración propia

Uno método para abordar al problema de la planeación agregada con el fin de abordar los problemas de la imprecisión en sus elementos y los de múltiples objetivos existentes, que en ocasiones pueden presentar conflicto entre ellos, es el uso de la lógica difusa, el trabajo de Baykasoglu y Gocken (2010) propone un modelo multiobjetivo de programación difusa que se enfoca en la maximización de la demanda satisfecha y al mismo tiempo en la minimización de los costos de manufactura, usando búsqueda tabú para hallar una solución, este modelo

considera a los costos relacionados con la mano de obra como una variable sujeta a cambios, mediante la determinación de la cantidad horas de trabajo en tiempo regular y extra así como contrataciones y despidos requeridos, esta perspectiva es parecida a la considerada en el modelo de Liang *et al.* (2011) sólo que este último incluye costos de pedidos pendientes (*backorders*), aunados a los de subcontratación. La propuesta presentada por Sadeghi *et al.* (2013) emplea programación difusa haciendo uso de números grises (números cuyo valor exacto es desconocido, sólo se conoce un rango en el que se encuentran (Deng, 1982)), enfocándose en la minimización de costos totales de producción, además de los relacionados con *backorders*, y los cambios en la fuerza de trabajo disponible.

2.4. Nuevos enfoques

En los últimos años se ha desarrollado una tendencia de investigación en la cual, se abordan aspectos ambientales desde múltiples ángulos, en busca de medidas para reducir los efectos de factores como la contaminación y el cambio climático, problemas que además aumentan los costos de producción, se busca por ejemplo reducir la huella de carbono de los procesos de la generación energética. Desde el punto de vista de la planeación agregada, existen trabajos como el de Mitra *et al.* (2012) que propone un modelo enfocado en detalles de los procesos de producción relacionados con los costos de energía y los considera en una función objetivo, en la que se busca la minimización de consumos de energía eléctrica y con ello los costos de la misma. Modarres e Izadpanahi (2016) por otro lado, proponen un modelo de programación lineal multiobjetivo que busca, minimizar costos de producción, minimizar costos energéticos y minimizar las emisiones de carbono, en la publicación de Chaturvedi (2017) se plantea un método gráfico para encontrar el plan óptimo de producción que satisfaga una

demanda esperada teniendo en cuenta la disponibilidad de múltiples instalaciones de manufactura, con el objetivo de minimizar el gasto de energía y de esa manera, el costo de producción, un factor remarcable en estas publicaciones es que no se consideran cambios en la mano de obra disponible.

Complementariamente la noción de administración verde de la cadena de suministro, se ha empleado en años recientes (Markovits-Somogyi *et al.*, 2009) para referirse a prácticas basadas en principios de sostenibilidad como el uso de materias primas de bajo impacto ambiental, uso de materiales reciclados, reducciones en la utilización de combustibles fósiles, etc. Mirzapour *et al.* (2013) así como Arezoo *et al.* (2017) proponen modelos de planeación agregada de la producción para empresas verdes, el primer caso un modelo de programación estocástica, que considera múltiples productos y múltiples instalaciones para la producción, este modelo tiene como función objetivo la de reducir los costos de producción, inventario, transporte y abastecimiento, teniendo en cuenta que los impactos ambientales no deseados, relacionados con estos procesos, pueden considerarse proporcionales a sus costos, además se busca la minimización de costos de escasez, mientras que se maximizan los ingresos de la cadena. La segunda propuesta consiste en un modelo de optimización robusta, este hace consideraciones relacionadas con la recolección y reciclaje de productos con lo que también toma en cuenta las emisiones de gases de efecto invernadero, que se incluyen al considerar sus asociaciones con los costos de los procesos de la cadena de suministro agregando dentro de una función objetivo de tipo minimizar los de la logística inversa, además se incluye un componente que representa las ganancias de las ventas, este con un signo negativo ya que es contrario al costo neto que se busca minimizar.

Existe en la literatura analizada una tendencia a la búsqueda de modelos matemáticos que capturen de manera precisa la realidad de los procesos de producción, esto mediante la consideración de elementos cuyo efecto suele pasar desapercibido o considerado de mínima importancia en investigaciones anteriores, el artículo de Chen y Sarker (2015) es un ejemplo de esto, ya que presenta un modelo para comparar los costos de mantener inventario, frente a los de las variaciones del tamaño de la fuerza de trabajo para satisfacer una demanda considerada difusa, este modelo toma en cuenta los procesos de aprendizaje del personal y su efecto en la capacidad productiva de la empresa. Por otro lado la modelación de Erfanian y Pirayesh (2016) evalúa también los mencionados costos de la variación de fuerza de laboral y de mantenimiento de inventario, con la incorporación de los tiempos muertos debidos al mantenimiento de equipos y maquinarias y su impacto en la capacidad de la planta bajo la consideración de que en la realidad los equipos y maquinaria no pueden estar disponibles para trabajar todo el tiempo.

Otros enfoques, abordan el problema desde una visión holística, por ejemplo la publicación de Rasmi *et al.* (2019) presenta además del interés ambiental un enfoque en asuntos sociales y culturales, las cuales se incluyen en un modelo de programación lineal entera mixta multi-objetivo, en el que se evalúan los efectos generales de la aplicación de proyectos de tipo cultural o ambiental, en las utilidades de la empresa y comparando las soluciones con mejor rendimiento en cada objetivo, los resultados ilustran como pequeñas caídas en las ganancias económicas pueden acarrear importantes mejoras desde otros puntos de vista, dimensiones o impactos que han ganado importancia en años recientes principalmente impactos ambientales y sociales. La propuesta de Rasmi *et al.* (2019) es la única encontrada hasta el momento que muestra de manera explícita un abordaje de cuestiones sociales y culturales dentro del enfoque

de los planes de producción sustentables, el modelo multiobjetivo de programación entera mixta incluye 16 variables de decisión relacionadas con la producción e inventario por periodo al igual que todos los modelos encontrados en esta revisión, sin embargo, incluye también variables relacionadas con la implementación de proyectos de tipo social y/o cultural, además de proyectos de innovación y uso de energías renovables, considerando el impacto de estos proyectos, no solo en el periodo en que son implementados, sino también en los periodos que se espera se presenten sus efectos; hace además una distinción entre los trabajadores de sexo masculino y femenino contratados y despedidos por periodo; presenta cuatro funciones objetivo, una relacionada con el aspecto económico, otra relativa a lo ambiental, una enfocada en la parte social y finalmente una función objetivo referente al aspecto cultural. La ecuación (11) se muestra una de las cuatro funciones objetivo:

$$\max z_{cul} = -coef_{cul1} \left(\sum_{t \in T} (MF_t + FF_t) \right) + coef_{cul2} \left(\sum_{t \in T} \sum_{k \in K} (Y_{tk}^A) \right) \quad (11)$$

Esta función objetivo representa la parte cultural del modelo, la primera parte, que se encuentra con signo negativo, se enfoca en minimizar los despidos de personal tanto masculino como femenino (MF_t y FF_t), con el fin de mejorar el bienestar de los trabajadores, mientras la segunda parte busca maximizar el número de proyectos innovadores realizados (Y_{tk}^A), preferentemente en los primeros periodos del horizonte de planeación para mejorar la capacidad en los periodos siguientes, ambos componentes están multiplicados por coeficientes usados para normalizar los términos de las funciones objetivo ya que las escalas y valores de cada una son incompatibles con los de las otras; las funciones objetivo están sujetas a restricciones relacionadas con el bienestar del personal y el impacto de los procesos y proyectos. El modelo presenta un conjunto de soluciones no dominadas entre las que los tomadores de decisiones

deberán seleccionar el balance más adecuado de acuerdo con los intereses de la compañía. Este enfoque en las interacciones entre los procesos productivos y el entorno ecológico, social y cultural en el que ocurren merece una exploración profunda, para todos los tipos de industria, sin embargo, requiere de la integración de procesos al interior de las cadenas de suministro.

Tabla 8. Autores que consideran procesos de adquisiciones y/o distribución.

Autor	Adquisiciones	Distribución
Kazemi Zanjani et al. (2010)	X	
Varthanan et al. (2010a)		X
Sakallı et al. (2010)	X	
Kanyalkar y Adil (2010)	X	X
Varthanan et al. (2010b)		X
Tian et al. (2010)		X
Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011)	X	X
Pal et al. (2011)	X	X
Corominas et al. (2012)	X	
Al-e et al. (2012)		X
Yaghin et al. (2012)		X
Moghaddam et al. (2012)		X
Madadi y Wong (2013)	X	
Raa et al., (2013)	X	X
Mirzapour Al-e-Hashem et al. (2013)	X	X
da Silva y Marins (2014)	X	X
Niknamfar et al. (2015)		X
Entezaminia et al. (2016)	X	X
Linfati-Medina et al. (2016)		X
Chauhan et al. (2017)	X	
Nobari et al. (2018)	X	X

Fuente: Elaboración propia

Además de lo mencionado en párrafos anteriores, se ha encontrado en la literatura publicada acerca de este tema que algunos procesos internos, suelen ser considerados los más relevantes para la toma de decisiones de nivel táctico y que de acuerdo con los investigadores deben ser integrados en los procesos de planeación de la producción en este nivel, ejemplos de

esto, son modelos como el de Pal *et al.* (2011) que incluyen, además de la manufactura, los procesos de aprovisionamiento y distribución, y el de Kanyalkar (2010), que además de los ya mencionados considera también la producción en múltiples ubicaciones, la Tabla 8 muestra un listado de los autores que consideran la interacción de la producción con adquisiciones y distribución, este tipo de propuestas muestran interés en disminuir los costos de la cadena de suministro no solo dentro de los procesos vistos de manera individual sino como partes de un sistema cuyas interacciones pueden ser optimizadas minimizando sus costos.

Yaghin *et al.* (2012), Abouzar Jamalnia y Feili (2013) y Jamalnia, *et al.* (2017) proponen modelos que consideran los costos de publicidad, mientras que Foo (2016), Linfati-Medina *et al.* (2016) y Yaghin (2018) incluyen los precios de venta del producto, esto muestra la integración de la planeación de la producción con los procesos de mercadeo, es decir que la toma de decisiones para la satisfacción de la demanda incluye medidas enfocadas a controlar el comportamiento de la misma, este enfoque en la planeación agregada de la producción es una respuesta a el efecto látigo al buscar la sincronización de la oferta y la demanda mediante la toma de decisiones integrada de las áreas de producción y ventas o mercadeo, Martínez-Costa *et al.* (2013) presentan un análisis de la integración de estas decisiones y concluye que la integración de estas dos áreas en el proceso de planeación mejora considerablemente el desempeño de la cadena de suministro, aunque no hay que perder de vista los costos que, sobre todo tecnológicos que esta integración puede implicar, por el intercambio de información necesario y las complicaciones inherentes a la colaboración de dos áreas que pueden tener metas e indicadores de desempeño diferentes lo que puede llevar a conflictos de intereses. El estudio de Martínez-Costa menciona también una mínima presencia de estudios con consideraciones

empíricas, algo que cambia en tiempos más recientes, de los autores aquí mencionados que consideran variables de mercadeo, sólo Yaghin *et al.* (2012) no presenta un ejemplo de aplicación real de su modelo. Si bien es cierto que la toma de decisiones de la planeación agregada de la producción presenta mejores resultados al integrar información de otros procesos, es importante remarcar que los modelos que abordan el problema deben ser ajustados a cada situación para tomar en cuenta las variables pertinentes en cada caso ya que como ya se ha mencionado el problema puede volverse tan grande que la búsqueda de una solución óptima se torne imposible.

Además de la consideración de factores relacionados con la interacción con otras áreas de la cadena de suministro es necesario considerar la relación de la planeación a nivel táctico con la planeación a nivel operativo, Z. Li e Ierapetritou (2010) así como Vogel *et al.* (2017) consideran en sus investigaciones la relación entre la planeación agregada de la producción con la generación de planes o programas de producción a corto plazo atendiendo así la cuestión de la traducción de planes a mediano plazo en líneas de acción a corto plazo, proceso determinante del valor de la planeación agregada de la producción en el entorno productivo real.

Mirzapour Al-E-Hashem *et al.* (2011) Chauhan *et al.* (2017) han abordado el problema de la planeación agregada de la producción teniendo en cuenta múltiples productos, este enfoque es útil tomando en cuenta que en la realidad muchas de las plantas de producción manufacturan o al menos participan en la manufactura de más de un producto.

2.5. Funciones objetivo encontradas

La literatura presenta modelos que abordan el problema de la planeación agregada de la producción desde diferentes perspectivas, las funciones objetivo muestran en enfoque de cada autor, la más recurrente es la de minimizar los costos relacionados con las decisiones tomadas en este punto de la administración de la cadena de suministro. La gráfica de la Figura 6 proporciona una clasificación de las funciones objetivo analizadas tomando en cuenta la frecuencia con la que se emplean, el apartado de “otros” abarca objetivos menos recurrentes como la maximización de uso de equipos, y maximizar la productividad del personal y el aprovechamiento de la materia prima

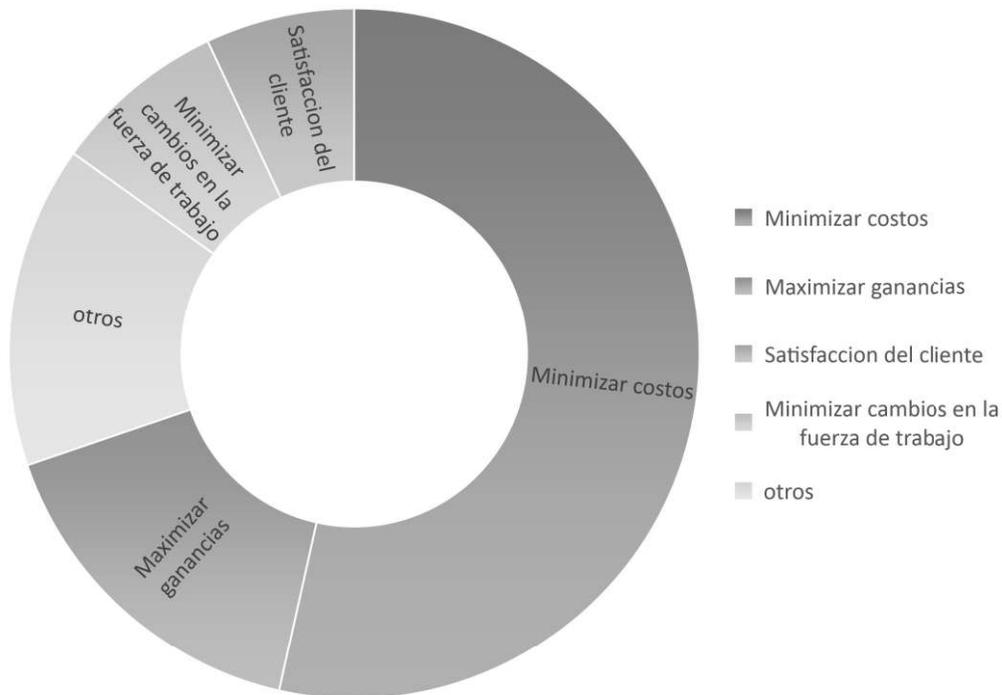


Figura 6. Funciones objetivo encontradas. (Fuente: Elaboración propia)

La satisfacción del cliente aparece en las funciones objetivo de los modelos encontrados ya sea como eliminación de *backorders* o como mejora del nivel de servicio, esta, junto a la minimización de costos y la maximización de ganancias son los objetivos que aparecen con mayor frecuencia en la literatura como objetivo debido a que se pueden traducir en rentabilidad y competitividad de las compañías, por otro lado la minimización de los cambios en la fuerza de trabajo mejora su impacto social, otras funciones objetivo consideradas están relacionadas con el impacto ambiental de los procesos, la calidad de los productos, nivel de utilización de equipos y confiabilidad de la cadena.

La Tabla 9 muestra un listado de los autores que presentan modelos de una sola función objetivo y de los que presentan modelos multiobjetivo, es claro que en el entorno productivo las empresas suelen tener varios objetivos al mismo tiempo, en ocasiones estos pueden estar en conflicto, sin embargo, en la literatura modelos de un objetivo pueden considerar en su planteamiento los factores relacionados con todos los intereses de la empresa sin que estos sean explícitamente presentados como funciones objetivo. La función objetivo debe reflejar las metas de la compañía, y los factores relacionados con el logro de estas, de manera que los resultados de la implementación del modelo representen de manera precisa las acciones que deben emprenderse a fin de que se generen las condiciones necesarias para el logro de objetivos (Gilgeous, 1987). La combinación de un planteamiento matemático acorde a los procesos de producción y la información que represente de manera eficiente la realidad de los mismos permitirá la toma de decisiones que mejoren el desempeño de la empresa.

Tabla 9. Clasificación por cantidad de funciones objetivo.

Modelos multiobjetivo	Modelos de un objetivo
Baykasoglu y Gocken (2010)	Kazemi Zanjani et al. (2010) Kaveh y Dalfard (2014)
Mirzapour Al-E-Hashem et al. (2011)	Varthanan et al. (2010a) S.-P. Chen y Huang (2014)
Sillekens et al. (2011)	S.-P. Chen y Huang (2010) D. Mendoza et al. (2014)
T.-F. Liang y Cheng (2011)	Sakallı et al. (2010) Gansterer (2015)
Sadeghi et al. (2013)	Kanyalkar y Adil (2010) Z. Chen y Sarker (2015)
Al-e et al. (2012)	Silva Filho et al. (2010) Bushuev (2014)
Moghaddam et al. (2012)	Varthanan et al. (2010b) Niknamfar et al. (2015)
Madadi y Wong (2013)	Z. Li e Ierapetritou (2010) Makui et al. (2016)
Mirzapour Al-e-Hashem et al. (2013)	Tian et al. (2010) Linfati-Medina et al. (2016)
Chakraborty y Hasin (2013)	Pal et al. (2011) Erfanian y Pirayesh (2016)
Da Silva y Marins (2014)	Corominas et al. (2012) Hahn y Brandenburg (2018)
T. F. Liang et al. (2011)	B. Li et al. (2013) Rosero-Mantilla et al. (2017)
Entezaminia et al. (2016)	Yaghin et al. (2012) Yaghin (2018)
Fiasché et al. (2015)	Omar et al. (2012) Vogel et al. (2017)
Modarres e Izadpanahi (2016)	Mitra et al. (2012) Chaturvedi (2017)
Aboozar Jamalnia et al. (2017)	Ramezani et al. (2012) Bagchi y Paul (2018)
Mosadegh et al. (2017)	Zhang et al. (2012) Demirel, et al. (2018)
Chauhan et al. (2017)	(Ning et al., 2013) Hossain e Islam (2018)
Nobari et al. (2018)	Raa et al. (2013) Hafezalkotob et al. (2019)
Mehdizadeh et al. (2018)	Abouzar Jamalnia y Feili (2013) Topcuoglu et al. (2019)
Goli et al. (2019)	Mousslim (2013)
Tirkolaee et al. (2019)	Wang y Yeh (2014)
Foo (2016)	
Rasmi, et al. (2019)	

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 3. Líneas de investigación para trabajo futuro y conclusiones

El problema de la planeación agregada de la producción ha sido abordado por los académicos en los últimos años con el fin de apoyar en la toma de decisiones de la práctica, ya sea mediante la generación de propuestas inspiradas en casos de estudio, que toma en cuenta los factores más relevantes para dichos casos y que permiten llegar a soluciones ajustadas a ellos o mediante algoritmos de búsqueda de soluciones que permitan tratar con instancias del problema como las que se presentan en la realidad empresarial, es decir el valor del trabajo académico no radica solamente en la posibilidad de ofrecer modelos del problema ajustados a casos específicos sino también en brindar herramientas para hallar la soluciones adecuadas en tiempos razonables.

A lo largo de esta revisión de la literatura se ha detectado la tendencia de los investigadores a abordar el problema de la planeación agregada de la producción desde una perspectiva que considera situaciones de la vida real mediante la formulación de modelos con múltiples objetivos a veces en conflicto, la inclusión de variables relacionadas con factores importantes para el éxito, en algunas empresas más que en otras, como los procesos de capacitación y mantenimiento; además de la búsqueda de nuevos algoritmos de búsqueda de soluciones óptimas o cercanas a valores óptimos, que además de efectivos sean computacionalmente eficientes, las propuestas consisten en modificaciones de algoritmos existentes y/o la combinaciones que buscan contrarrestar las deficiencias de uno con la aplicación de otro.

De este modo las líneas de investigación relativas a este tema, en las que se han detectado pendientes o potencial para desarrollo de investigación futura son las siguientes:

- Integración de procesos y optimización de sus relaciones.
- Desarrollo de instancias de prueba y caracterización de variables relevantes de acuerdo a los giros productivos.
- Consideración de variables de tipo ambiental, social, etc.
- Desarrollo de algoritmos de búsqueda de soluciones computacionalmente eficientes.

La planeación agregada de la producción, al igual que todos los procesos de administración de la cadena de suministro, debe adaptarse a los requerimientos del cliente y del mundo en el que se desarrolla, debe gestionarse considerando la interacción con otros procesos y eslabones de la cadena, la integración de los procesos de planeación con el resto de la cadena de suministro es importante, ya que las relaciones con estos otros actores y procesos son determinantes para el éxito no solo de empresas en lo individual sino de cadenas de suministro completas. Hay múltiples investigaciones enfocadas en la coordinación e integración de diferentes áreas en los procesos de planeación a fin de hacer sus interacciones funcionales, fluidas y productivas tal como subrayan las investigaciones de Tuomikangas y Kaipia (2014) y de Pereira *et al.* (2020), las condiciones globales hacen necesaria la planeación integrada para mejorar el desempeño de las cadenas de suministro, Pereira *et al.* (2020) menciona que la aplicación de modelos integrados de toma de decisiones ventas y operaciones pueden generar mejoras en de rentabilidad que van desde 1.1% hasta 84%, sin embargo los procesos y factores más importantes varían de un giro de la industria a otro, por lo que no hay un consenso en cuanto a las decisiones que deben abordar los modelos, lo que lleva a que la búsqueda de propuestas

generales y para industrias específicas que aborden el problema de la planeación agregada de la producción sigue teniendo potencial de investigación.

Por otro lado, si bien es cierto que algunos factores internos y externos de los procesos productivos, influyen en la postura táctica de las empresas, la aplicación de herramientas de análisis cuantitativo sigue siendo pertinente en la búsqueda de planes que vinculen las decisiones de nivel estratégico con las de nivel operativo, la generación de problemas de *benchmark* que incluyan datos que reflejen los factores más influyentes en procesos de producción de tipos específicos permitiría comparar las propuestas de los investigadores en términos de eficiencia computacional y calidad de las soluciones obtenidas, además de que facilitaría la creación de sistemas generales de apoyo en la toma de decisiones para abordar el problema de la planeación agregada de la producción; la primera tarea en este sentido, es la agrupación de industrias que con características en común en las que la toma de decisiones sea semejante al estar sujetas a condiciones parecidas, trabajos como el de Brandenburg y Hahn (2018) permiten identificar las ventajas de la investigación de casos de estudio específicos y de las propuestas estandarizadas para aprovecharlas en casos aplicación real.

La consideración de cuestiones ambientales en los procesos de planeación cobrará mayor importancia a medida que los problemas de este tipo se vuelvan más graves a nivel mundial de modo que los gobiernos y clientes consideren más importante el desarrollo sostenible de los procesos mediante los que se obtienen los productos y servicios de todo tipo, las certificaciones como la ISO 14000 y los impuestos por emisiones de carbono imponen condiciones limitantes que en algunos años no podrán ser ignoradas por ninguno de los sectores productivos, aun cuando solo siete de los artículos revisados consideran variables relacionadas con impacto

ecológico de la producción, enfoques como el de Rasmi *et al.* (2019) cobraran mayor importancia conforme las compañías noten la relevancia de sus relaciones con la sociedad y el medio ambiente, claro, es necesario que antes de ello se atienda a las relaciones entre compañías y entre departamentos a su interior.

El incremento en la complejidad de las decisiones que deben tomarse en cuenta durante la planeación agregada de la producción conduce a la necesidad de desarrollar algoritmos de búsqueda de soluciones que permitan definir líneas de acción en tiempos razonables considerando la naturaleza de este proceso de toma de decisiones y considerando las capacidades de cómputo disponibles en la industria, el rumbo que ya han tomado los académicos en este sentido es la combinación de algoritmos heurísticos y metaheurísticos a fin de superar las limitaciones que tienen por separado; una alternativa poco explorada pero que puede resultar de valor en este caso es la aplicación de técnicas de simulación, así como su combinación con herramientas de optimización para reducir el tiempo de cómputo requerido por estas últimas.

Si bien las investigaciones publicadas que mencionan relación con un caso de real no presentan evidencia del impacto de la aplicación de su propuesta debido a los riesgos implicados en la divulgación de este tipo de información, si revelan una creciente interconexión entre el ambiente productivo y el académico, esta tiene el potencial de ayudar a superar los retos de la aplicación de herramientas cuantitativas impuestos por la falta de control de los procesos que genera poca disponibilidad de la información necesaria y por la falta de habilidad de análisis matemático del personal de las empresas, que no busca soluciones óptimas sino eliminación de costos que consideran más importantes (Buxey, 2005), y de acortar la brecha entre el trabajo académico y la realidad del trabajo de la práctico de la planeación agregada de la producción.

Un faltante que en la literatura analizada es lo relativo a los procesos de obtención de la información necesaria para los modelos, esta información es de valor práctico dependiendo del nivel de capacitación de los tomadores de estas decisiones en la práctica.

La planeación agregada de la producción tiene impactos positivos en la competitividad de las empresas cuando se combina adecuadamente con los otros procesos de toma de decisiones de nivel táctico y operativo, es pertinente en todos los casos en que sea necesario hacer previsiones con anticipación de mediano plazo, sin embargo, es un proceso que, dada su naturaleza, requiere un análisis profundo de los factores que intervienen en él, por lo que vale la pena el desarrollo de investigación, que apoye en la toma de decisiones de esta área de la administración de la cadena de suministro.

Referencias

- Al-e, S. M. J. M., Aryanezhad, M. B., y Sadjadi, S. J. (2012). An efficient algorithm to solve a multi-objective robust aggregate production planning in an uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5–8), 765–782.
- Bagchi, S. S., y Paul, R. (2018). Aligning Aggregate Planning with (s, S) Inventory Model in a Stochastic Demand Environment. *International Journal of Strategic Decision Sciences (IJSDS)*, 9(1), 29–44.
- Baykasoglu, A., y Gocken, T. (2010). Multi-objective aggregate production planning with fuzzy parameters. *Advances in Engineering Software*, 41(9), 1124–1131.
- Brandenburg, M., y Hahn, G. J. (2018). Sustainable aggregate production planning in the chemical process industry-A benchmark problem and dataset. *Data in Brief*, 18, 961–967.
- Bushuev, M. (2014). Convex optimisation for aggregate production planning. *International Journal of Production Research*, 52(4), 1050–1058.
- Buxey, G. (1990). The myth of aggregate planning. *Production Planning & Control*, 1(4), 222–234.
- Buxey, G. (1995). A managerial perspective on aggregate planning. *International Journal of Production Economics*, 41(1–3), 127–133.
- Buxey, G. (2005). Aggregate planning for seasonal demand: reconciling theory with practice. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Chakraborty, R., y Hasin, M. (2013). Solving an aggregate production planning problem by using multi-objective genetic algorithm (MOGA) approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(1), 1–12.
- Chaturvedi, N. D. (2017). Minimizing energy consumption via multiple installations aggregate production planning. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(7), 1977–1984.
- Chauhan, Y., Aggarwal, V., y Kumar, P. (2017). Application of FMOMILP for aggregate production planning: A case of multi-product and multi-period production model. In *2017 International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems (AMIAMS)* (pp. 266–271). IEEE.
- Chen, S.-P., y Huang, W.-L. (2014). Solving fuzzy multiproduct aggregate production planning problems based on extension principle. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2014.
- Chen, S.-P., y Huang, W.-L. (2010). A membership function approach for aggregate production planning problems in fuzzy environments. *International Journal of Production Research*, 48(23), 7003-7023.
- Chen, Z., y Sarker, B. R. (2015). Aggregate production planning with learning effect and

- uncertain demand: A case based study. *Journal of Modelling in Management*, 10(3), 296–324.
- Chopra, S., y Meindl, P. (2013). *Administración de la cadena de suministro* (Quinta ed.). México: Pearson.
- Corominas, A., Lusa, A., y Olivella, J. (2012). A manufacturing and remanufacturing aggregate planning model considering a non-linear supply function of recovered products. *Production Planning & Control*, 23(2–3), 194–204.
- D. Mendoza, J., Mula, J., y Campuzano-Bolarin, F. (2014). Using systems dynamics to evaluate the tradeoff among supply chain aggregate production planning policies. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(8), 1055–1079.
- da Silva, A. F., y Marins, F. A. S. (2014). A Fuzzy Goal Programming model for solving aggregate production-planning problems under uncertainty: A case study in a Brazilian sugar mill. *Energy Economics*, 45, 196–204.
- Dantzig, G. B., y Johnson, S. (1955). A production smoothing problem. *RM-1432 RAND Corporation*.
- Davizón, Y., Martínez-Olvera, C., Soto, R., Hinojosa, C., y Espino-Román, P. (2015). Optimal control approaches to the aggregate production planning problem. *Sustainability*, 7(12), 16324–16339.
- Dejonckheere, J., Disney, S. M., Lambrecht, M., y Towill, D. R. (2003). The dynamics of aggregate planning. *Production Planning & Control*, 14(6), 497–516.
- Demirel, E., Özelkan, E. C., y Lim, C. (2018). Aggregate planning with flexibility requirements profile. *International Journal of Production Economics*, 202, 45–58.
- Deng, J.-L. (1982). Control problems of grey systems. *Sys. & Contr. Lett.*, 1(5), 288–294.
- DuBois, F. L., y Oliff, M. D. (1991). Aggregate production planning in practice. *Production and Inventory Management Journal*, 32(3), 26.
- Entezaminia, A., Heidari, M., y Rahmani, D. (2017). Robust aggregate production planning in a green supply chain under uncertainty considering reverse logistics: a case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5–8), 1507–1528.
- Entezaminia, A., Heydari, M., y Rahmani, D. (2016). A multi-objective model for multi-product multi-site aggregate production planning in a green supply chain: Considering collection and recycling centers. *Journal of Manufacturing Systems*, 40, 63–75.
- Erfanian, M., y Pirayesh, M. (2016). Integration aggregate production planning and maintenance using mixed integer linear programming. In *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 927–930). IEEE.
- Fiasché, M., Ripamonti, G., Sisca, F. G., Taisch, M., y Tavola, G. (2015). A novel hybrid fuzzy multi-objective linear programming method of aggregate production planning. In

- International Workshop on Neural Networks* (pp. 489–501). Springer.
- Foo, D. C. Y. (2016). Automated targeting model for aggregate planning in production and energy supply chains. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 1405–1414.
- Gansterer, M. (2015). Aggregate planning and forecasting in make-to-order production systems. *International Journal of Production Economics*, 170, 521–528.
- Gilgeous, V. (1987). Aggregate planning in UK manufacturing companies. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Goli, A., Tirkolae, E. B., Malmir, B., Bian, G.-B., y Sangaiah, A. K. (2019). A multi-objective invasive weed optimization algorithm for robust aggregate production planning under uncertain seasonal demand. *Computing*, 101(6), 499–529.
- Hafezalkotob, A., Chaharbaghi, S., y Lakeh, T. M. (2019). Cooperative aggregate production planning: a game theory approach. *Journal of Industrial Engineering International*, 1–19.
- Hahn, G. J., y Brandenburg, M. (2018). A sustainable aggregate production planning model for the chemical process industry. *Computers & Operations Research*, 94, 154–168.
- Hoffman, A. J., y Jacobs, W. (1954). Smooth patterns of production. *Management Science*, 1(1), 86–91.
- Holt, C. C., Modigliani, F., y Simon, H. A. (1955). A linear decision rule for production and employment scheduling. *Management Science*, 2(1), 1–30.
- Hossain, M. S., y Islam, K. M. (2018). PSO-based harmony search algorithm to aggregate production planning under possibilistic environment. *International Journal of Services and Operations Management*, 31(2), 169–190.
- Jacobs, F. R., y B. Chase, R. (2018). *Operations and supply chain management* (15th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1007/s00259-015-3113-7>
- Jacobs, F. R., Chase, R. B., y Lummus, R. R. (2011). *Operations and supply chain management* (Vol. 567). McGraw-Hill Irwin New York.
- Jamalnia, Aboozar, Yang, J.-B., Xu, D.-L., y Feili, A. (2017). Novel decision model based on mixed chase and level strategy for aggregate production planning under uncertainty: Case study in beverage industry. *Computers & Industrial Engineering*, 114, 54–68.
- Jamalnia, Abouzar, y Feili, A. (2013). A simulation testing and analysis of aggregate production planning strategies. *Production Planning & Control*, 24(6), 423–448.
- Kang, S. G., y Choi, S. H. (2010). Multi-agent based beam search for intelligent production planning and scheduling. *International Journal of Production Research*, 48(11), 3319–3353.
- Kanyalkar, A. P., y Adil, G. K. (2010). A robust optimisation model for aggregate and detailed planning of a multi-site procurement-production-distribution system. *International Journal of Production Research*, 48(3), 635–656.

- Kaveh, M., y Dalfard, V. M. (2014). A simulated annealing algorithm for aggregate production planning with considering of ancillary costs. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 6(4), 474–490.
- Kazemi Zanjani, M., Nourelfath, M., y Ait-Kadi, D. (2010). A multi-stage stochastic programming approach for production planning with uncertainty in the quality of raw materials and demand. *International Journal of Production Research*, 48(16), 4701–4723.
- Li, B., Wang, H., Yang, J., Guo, M., y Qi, C. (2013). A belief-rule-based inference method for aggregate production planning under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 51(1), 83–105.
- Li, Z., y Ierapetritou, M. G. (2010). Rolling horizon based planning and scheduling integration with production capacity consideration. *Chemical Engineering Science*, 65(22), 5887–5900.
- Liang, T.-F., y Cheng, H.-W. (2011). Multi-objective aggregate production planning decisions using two-phase fuzzy goal programming method. *Journal of Industrial & Management Optimization*, 7(2), 365.
- Liang, T. F., Cheng, H.-W., Chen, P.-Y., y Shen, K.-H. (2011). Application of fuzzy sets to aggregate production planning with multiproducts and multitime periods. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 19(3), 465–477.
- Linfati-Medina, R., Pradenas-Rojas, L., y Ferland, J. (2016). Aggregate planning in forest harvest: a mathematical programming model and solution. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 18(4), 555–566.
- Madadi, N., y Wong, K. Y. (2013). A deterministic aggregate production planning model considering quality of products. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 46, p. 12015). IOP Publishing.
- Makui, A., Heydari, M., Aazami, A., y Dehghani, E. (2016). Accelerating Benders decomposition approach for robust aggregate production planning of products with a very limited expiration date. *Computers & Industrial Engineering*, 100, 34–51.
- Markovits-Somogyi, R., Nagy, Z., y Török, Á. (2009). Greening supply chain management. *Acta Technica Jaurinensis*, 2(3), 367–374.
- Martínez-Costa, C., Mas-Machuca, M., y Lusa, A. (2013). Integration of marketing and production decisions in aggregate planning: a review and prospects. *European Journal of Industrial Engineering*, 7(6), 755–776.
- Mehdizadeh, E., Niaki, S. T. A., y Hemati, M. (2018). A bi-objective aggregate production planning problem with learning effect and machine deterioration: Modeling and solution. *Computers & Operations Research*, 91, 21–36.
- Mirzapour Al-e-Hashem, S. M. J., Baboli, A., y Sazvar, Z. (2013). A stochastic aggregate production planning model in a green supply chain: Considering flexible lead times,

- nonlinear purchase and shortage cost functions. *European Journal of Operational Research*, 230(1), 26–41.
- Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J., Malekly, H., y Aryanezhad, M. B. (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 28–42.
- Mitra, S., Grossmann, I. E., Pinto, J. M., y Arora, N. (2012). Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes. *Computers & Chemical Engineering*, 38, 171–184.
- Modarres, M., y Izadpanahi, E. (2016). Aggregate production planning by focusing on energy saving: A robust optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1074–1085.
- Moghaddam, M., Rabbani, M., y Maleki-Shoja, B. (2012). Integrating lateral transshipment to aggregate production–distribution planning considering time value of money and exchange rate. *International Journal of Operational Research*, 13(4), 439–464.
- Mosadegh, H., Khakbazan, E., Salmasnia, A., y Mokhtari, H. (2017). A fuzzy multi-objective goal programming model for solving an aggregate production planning problem with uncertainty. *International Journal of Information and Decision Sciences*, 9(2), 97–115.
- Mouslim, H. (2013). Application of tolerance approach to fuzzy goal programming to aggregate production planning.
- Nahmias, S., y Lennon Olsen, T. (2015). *Production and operations analysis* (septima ed). Long Grove, Illinois: Waveland Press Inc.
- Nam, S., y Logendran, R. (1992). Aggregate production planning—a survey of models and methodologies. *European Journal of Operational Research*, 61(3), 255–272.
- Niknamfar, A. H., Niaki, S. T. A., y Pasandideh, S. H. R. (2015). Robust optimization approach for an aggregate production–distribution planning in a three-level supply chain. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1–4), 623–634.
- Ning, Y., Liu, J., y Yan, L. (2013). Uncertain aggregate production planning. *Soft Computing*, 17(4), 617–624.
- Nobari, A., Khierkhah, A., y Hajipour, V. (2018). A Pareto-based approach to optimise aggregate production planning problem considering reliable supplier selection. *International Journal of Services and Operations Management*, 29(1), 59–84.
- Omar, M. K., Jusoh, M. M., y Omar, M. (2012). Investigating the benefits of fuzzy mathematical programming approach for solving aggregate production planning. In *2012 IEEE International Conference on Fuzzy Systems* (pp. 1–6). IEEE.
- Pal, A., Chan, F. T. S., Mahanty, B., & Tiwari, M. K. (2011). Aggregate procurement, production, and shipment planning decision problem for a three-echelon supply chain using swarm-based heuristics. *International Journal of Production Research*, 49(10),

2873–2905.

- Pereira, D. F., Oliveira, J. F., y Carravilla, M. A. (2020). Tactical sales and operations planning: A holistic framework and a literature review of decision-making models. *International Journal of Production Economics*, 107695.
- Pochet, Y., y Wolsey, L. A. (2006). *Production planning by mixed integer programming*. Springer Science & Business Media.
- Raa, B., Dullaert, W., y Aghezzaf, E.-H. (2013). A matheuristic for aggregate production–distribution planning with mould sharing. *International Journal of Production Economics*, 145(1), 29–37.
- Ramezani, R., Rahmani, D., y Barzinpour, F. (2012). An aggregate production planning model for two phase production systems: Solving with genetic algorithm and tabu search. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 1256–1263.
- Rasmi, S. A. B., Kazan, C., y Türkay, M. (2019). A multi-criteria decision analysis to include environmental, social, and cultural issues in the sustainable aggregate production plans. *Computers & Industrial Engineering*, 132, 348–360.
- Rosero-Mantilla, C., Sánchez-Sailema, M., Sánchez-Rosero, C., y Galleguillos-Pozo, R. (2017). Aggregate Production Planning, Casestudy in a Medium-sized Industry of the Rubber Production Line in Ecuador. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 212, p. 12018). IOP Publishing.
- Sadeghi, M., Hajiagha, S. H. R., y Hashemi, S. S. (2013). A fuzzy grey goal programming approach for aggregate production planning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(9–12), 1715–1727.
- Sakallı, Ü. S., Baykoç, Ö. F., y Birgören, B. (2010). A possibilistic aggregate production planning model for brass casting industry. *Production Planning & Control*, 21(3), 319–338.
- Sillekens, T., Koberstein, A., y Suhl, L. (2011). Aggregate production planning in the automotive industry with special consideration of workforce flexibility. *International Journal of Production Research*, 49(17), 5055–5078.
- Silva Filho, O. S., Cezarino, W., y Ratto, J. (2010). Aggregate production planning: Modeling and solution via Excel spreadsheet and solver. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(17), 89–94.
- Silver, E. A. (1976). Medium range aggregate production planning: state of the art. In *Readings in Managerial Economics* (pp. 227–254). Elsevier.
- Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., Fernandez, N. S., y Scavarda, A. J. (2012). Sales and operations planning: A research synthesis. *International Journal of Production Economics*, 138(1), 1–13.
- Tian, X., Mohamed, Y., y AbouRizk, S. (2010). Simulation-based aggregate planning of batch

- plant operations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(10), 1277–1288.
- Tirkolaee, E. B., Goli, A., y Weber, G.-W. (2019). Multi-objective Aggregate Production Planning Model Considering Overtime and Outsourcing Options Under Fuzzy Seasonal Demand. In *Advances in Manufacturing II* (pp. 81–96). Springer.
- Tuomikangas, N., y Kaipia, R. (2014). A coordination framework for sales and operations planning (S&OP): Synthesis from the literature. *International Journal of Production Economics*, 154, 243-262.
- Topcuoglu, M. G., Yeni, F. B., Kose, Y., y Cevikcan, E. (2019). The Optimization of Aggregate Production Planning Under Fuzzy Environment: An Application From Beverage Industry. In *Industrial Engineering in the Big Data Era* (pp. 271–285). Springer.
- Varthanan, P. A., Murugan, N., y Kumar, G. M. (2010a). A genetic algorithm approach to generate an integrated multiplant aggregate production-distribution plan. *International Journal of Services and Operations Management*, 7(1), 76–96.
- Varthanan, P. A., Murugan, N., y Kumar, G. M. (2010b). An integrated multi-plant aggregate production-distribution plan generated using memetic algorithm. *International Journal of Value Chain Management*, 4(3), 213–239.
- Vogel, T., Almada-Lobo, B., y Almeder, C. (2017). Integrated versus hierarchical approach to aggregate production planning and master production scheduling. *OR Spectrum*, 39(1), 193–229.
- Wang, S.-C., y Yeh, M.-F. (2014). A modified particle swarm optimization for aggregate production planning. *Expert Systems with Applications*, 41(6), 3069–3077.
- Waters, D. (2003). *Logistics An Introduction to supply chain management*. Palgrave macmillan.
- Yaghin, R. G. (2018). Integrated multi-site aggregate production-pricing planning in a two-echelon supply chain with multiple demand classes. *Applied Mathematical Modelling*, 53, 276–295.
- Yaghin, R. G., Torabi, S. A., y Ghomi, S. M. T. F. (2012). Integrated markdown pricing and aggregate production planning in a two echelon supply chain: A hybrid fuzzy multiple objective approach. *Applied Mathematical Modelling*, 36(12), 6011–6030.
- Zhang, R., Zhang, L., Xiao, Y., y Kaku, I. (2012). The activity-based aggregate production planning with capacity expansion in manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 491–503.