

Linear programming model to minimize the production costs of an adhesive tape company

Jairo R. Coronado-Hernandez, PhD¹, Laura de la Hoz, M.Sc.¹, Jaime Leyva, M.Sc.², María Ramos³ y Orlando Zapatero⁴

¹Universidad de la Costa, Colombia, jcoronad18@cuc.edu.co, ldelahoz35@cuc.edu.co

²SERINGTEC S.A.S, Colombia, jaimeley@hotmail.com

³DIA Argentina, mariavictoriaramosruiz@gmail.com

⁴Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Colombia, ozapateiro@hotmail.com

Abstract— Production in large quantities of different varieties of products creates issues in finding an optimal planning solution. Adhesive tapes companies face that challenge. A multi-phased methodology is proposed to minimize production costs. In this it is considered different production variables. First phase divided a problem into subproblems to minimize computational complexity through an incidence matrix. Second phase formulated a linear programming model to determine production optimal batch sizes. Consequently, model is applied in a real company. Results showed a decrease in production costs in a range of 14%-43% for the different manufactured groups of components. In this way it is expected that more companies can apply similar models to improve their production indicators.

Keywords—Aggregate planning, linear programming model, production, costs minimization, adhesive tapes.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.369>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Modelo programación lineal para minimizar los costos de producción de una empresa de cintas adhesivas

Jairo R. Coronado-Hernandez, PhD¹, Laura de la Hoz, M.Sc.¹, Jaime Leyva, M.Sc.², María Ramos³ y Orlando Zapatero⁴

¹Universidad de la Costa, Colombia, jcoronad18@cuc.edu.co, ldelahez35@cuc.edu.co

²SERINGTEC S.A.S, Colombia, jaimeley@hotmail.com

³DIA Argentina, mariavictoriaramosruiz@gmail.com

⁴Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Colombia, ozapateiro@hotmail.com

Resumen – La producción en grandes cantidades de diversas variedades de productos origina problemas para encontrar una solución óptima de planeación. Las empresas productoras de cintas adhesivas presentan este reto. Se propone una metodología por etapas que tiene como objetivo minimizar los costos de producción. En ella se consideran las diferentes variables de este proceso en una empresa. La primera etapa consiste en dividir el problema general en subproblemas con el fin de minimizar la complejidad computacional a través de una matriz de incidencia. Y en segunda instancia formular un modelo de programación lineal para determinar los tamaños de lote óptimo para producir. Posteriormente el modelo fue aplicado en una empresa real. El resultado arrojó una disminución de los costos en un rango del 14% al 43% en los diferentes grupos de componentes fabricados. De esta manera se espera que más empresas puedan aplicar modelos semejantes para mejorar los indicadores de su producción.

Palabras claves – Planeación agregada, programación lineal, producción, minimización de costos, cintas adhesivas

Abstract– Production in large quantities of different varieties of products creates issues in finding an optimal planning solution. Adhesive tapes companies face that challenge. A multi-phased methodology is proposed to minimize production costs. In this it is considered different production variables. First phase divided a problem into subproblems to minimize computational complexity through an incidence matrix. Second phase formulated a linear programming model to determine production optimal batch sizes. Consequently, model is applied in a real company. Results showed a decrease in production costs in a range of 14%-43% for the different manufactured groups of components. In this way it is expected that more companies can apply similar models to improve their production indicators.

Keywords—Aggregate planning, linear programming model, production, costs minimization, adhesive tapes

I. INTRODUCCIÓN

Las empresas productoras de cintas adhesivas ofertan diferentes líneas de productos para satisfacer las necesidades de un amplio mercado global. Dentro de sus grandes segmentaciones se pueden encontrar: por categoría, por aplicación, por tipo de resina, por tecnología, por material de respaldo de la cinta, y por región [1]. La gran variedad de productos hace que se convierta en un reto planear la

producción de las cantidades necesarias y mantener simultáneamente el objetivo de disminuir los costos totales de producción.

La motivación de este trabajo es contribuir a mejorar el plan de producción de una empresa de cintas adhesivas en Colombia manteniendo un control y disminución de costos. En la literatura muchos autores han propuesto distintos modelos de planeación dirigidos hacia diferentes enfoques [2], considerando diversas variables y basados en varias herramientas de análisis. Por esta razón, el objetivo del estudio es diseñar un plan de la producción utilizando una metodología basada en técnicas de planeación agregada y programación lineal para determinar el tamaño de lotes de producción con el propósito de minimizar los costos asociados a la misma. Para este objetivo, este artículo tuvo como soporte los siguientes conceptos y herramientas: Planeación agregada de la producción (APP), Plan Agregado bajo el modelo de programación lineal, Modelos de programación lineal, y Plan maestro de producción. Adicionalmente, tuvo como soporte las diferentes variables cuantitativas disponibles en la empresa como ventas históricas, tipos de productos, costos y tiempos de producción, inventario de seguridad, y capacidad de producción.

El estudio presenta detalles de cómo fue ejecutado el diseño y desarrollo de un modelo para minimizar los costos totales de producción en una empresa de cintas adhesivas; mediante la integración de las técnicas descritas. Se incluye una evaluación y validación de diferentes variables de la compañía para poder elegir aquellas determinantes y claves para cada paso del proceso, y así llegar a resultados de la propuesta realizada. Finalmente se describirán las conclusiones.

II. ESTADO DEL ARTE

El proceso de planeación de la producción abarca todos los recursos necesarios de la empresa para su realización. Incluye decisiones estratégicas, tácticas y operativas [3] que disponen del uso de capacidades productivas; localizaciones y distribuciones de plantas, métodos y modelos a usar, planificación de materiales y gestión de inventarios [4].

La Planeación Agregada es uno de los métodos de planificación de la producción a mediano plazo. Este permite

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.369>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

efectuar el plan estratégico de la forma más eficaz posible en relación con los objetivos tácticos del subsistema de operaciones [5], [6]. Es un método para determinar la cantidad de producción y su desarrollo en el tiempo a medio plazo [7]. No desglosa la cantidad de producción por detalles de productos, sino que los considera en unidades agregadas de producción como familias de productos, unidad de peso, unidad de volumen, cantidad necesaria de trabajo o valor monetario [8].

De manera general en la planeación de la producción en entornos de incertidumbre, se han usado diversos modelos dentro de los que se destacan los de tipo conceptual, aquellos basados en inteligencia artificial, analíticos y de simulación [9]. Los modelos analíticos incluyen los de programación matemática como lo es el de programación lineal. Estos modelos se utilizan para resolver problemas de planificación jerárquica, de planificación de necesidades de materiales (MRP), de planificación de capacidad y recursos, de gestión de inventarios y de cadena de suministro [4].

La Programación Lineal se utiliza para describir problemas de optimización en donde se pueden encontrar soluciones óptimas de manera eficaz. A diferencia de otros modelos heurísticos, la programación lineal busca una solución óptima que satisfaga una función objetivo. Las variables están sujetas a una serie de restricciones que se expresan mediante un sistema de inequaciones lineales que crean un espacio de soluciones factibles del cual se extrae la solución óptima. El uso de este modelo para planeación agregada se condiciona a que todas las funciones de costo deben ser lineales [8].

En la literatura son diversos los trabajos sobre Planeación Agregada basados en el modelo de programación lineal. Muchos de ellos coinciden en lograr el objetivo principal de minimizar costos y adicionalmente otros recursos; minimizar costes implicados en tiempo ocioso y recursos extras [4]; reducir costos, pedidos e inventario [3]; minimizar los costos asociados a la mano de obra y manejo de inventario [10]. Otros estudios desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta con múltiples criterios, maximizar las ganancias, minimizar los pedidos atrasados y minimizar los cambios en el nivel de la fuerza laboral [11].

Por otro lado, para la planeación de la producción en general, se conocen de otros modelos heurísticos para resolver problemas de planeación que también apuntan a minimizar costos asociados a niveles de inventario, setup y operaciones [12], así como algoritmos para determinar la cantidad a producir en sistemas de coproducción teniendo en cuenta ventajas de costos [13], y para la planificación de requerimientos de materiales [14]. Se conoce también del uso de herramientas y métodos como la aplicación de la relajación lagrangiana para resolver problemas de planificación de la producción [15].

Un Plan Maestro de Producción – PMP - o Master Production Scheduling, tiene como propósito ejecutar la planeación agregada de producción a períodos de tiempo más cortos, por lo general semanas o días. Es el plan de producción

para el artículo final por período [8]. Requiere de información previa e interna de la empresa, como lo son: pronósticos, plan agregado, e información de recursos necesarios para la producción de un ítem específico.

Estudios previamente demuestran cómo se han utilizado modelos analíticos para un PMP pero ninguno de ellos en empresas de cintas adhesivas, y en general hay pocos modelos validados con información real de compañías industriales [4]. Asimismo, los modelos de agregación dependen directamente de la estructura organizacional de la empresa y sus productos [8]. Por lo cual, se hace clave la aplicación y el estudio de este tipo de modelos a cada empresa y sector, según sus necesidades.

III. APORTES

A. Desarrollo del modelo

El diseño del Plan Maestro en la empresa de cintas adhesivas se realizó a través de un modelo de programación lineal, tomando como referencia los trabajos de Nagarur, Vrat y Duongsuwan [16], los cuales descomponen el problema en subproblemas, con el fin de facilitar el cálculo computacional, la interpretación de los datos y la optimización de la solución.

Para esto se propuso la implementación de una matriz de incidencia (Ver Ilustración 1) que permitiera identificar los subgrupos con los cuales trabajar. La matriz relacionaría las máquinas con los componentes a producir, y así identificar los subproblemas a solucionar.

	P ₁	P ₂	P ₃
M ₁	1	0	1
M ₂	0	1	0
M ₃	1	0	1

	P ₁	P ₃	P ₂
M ₁	1	1	0
M ₃	1	1	0
M ₂	0	0	1

Ilustración 1. Matriz de incidencia y formación de subproblemas

En la matriz se presentan en posiciones MP_{ij} conformadas por filas M_i y Columnas P_j el uso o no de una máquina en la producción de un componente determinado. Se intenta realizar un proceso que genere agrupaciones de trabajo. Las posiciones $M_{ij} = 1$ representan familias de partes (P_j) a ser procesadas por una celda de manufactura o grupo de máquinas (M_i).

Posteriormente se planteó realizar un modelo de programación lineal para cada subproblema que podía resultar de la matriz de incidencia.

B. Formulación matemática del modelo

Con la realización de un modelo de programación lineal se busca minimizar o maximizar un objetivo. Para la empresa de cintas adhesivas se buscó minimizar los costos de producción.

El modelo debía relacionar variables como la demanda futura, las máquinas y referencias que se producirían. Así como los costos fijos relacionados con la producción (setup, inventarios, producción, CIF. Mano de obra, faltantes), definidos en el modelo como parámetros. Además, se debían definir las variables de decisión las cuales proporcionarían la información de cómo se debía producir, cuánto producir y

cuánto guardar en inventario. Estas variables fueron base para la toma de decisiones.

Así se planteó inicialmente el modelo de programación lineal:

- Conjunto
- $i = \text{Referencias } \{1,2,3,4, \dots n\}$ (1)
- $j = \text{Referencias } \{1,2,3,4,5,6\}$ (2)
- $m = \text{Máquina } \{1,2,3,4, \dots 9\}$ (3)

-Parámetros

$$D_{(i,t)} = \text{Demanda de la referencia } i \text{ en el período } t \quad (4)$$

$$CP_{(m,t)} = \text{Tiempo disponible para producir de la máquina } m \text{ en el período } t \quad (5)$$

$$CPRD_{(i,m)} = \text{Costo unitario de producir una referencia } i \text{ en la máquina } m \quad (6)$$

$$TC_{(i,m)} = \text{Tiempo de una bajada de la referencia } i \text{ en la máquina } m. \text{ (Bajada: Cantidad de rollos que sale de un ciclo de producción)} \quad (7)$$

$$INVIN_{(i)} = \text{Inventario inicial del producto } i \quad (8)$$

$$CI_{(i)} = \text{Costo de inventario por bajada de } i \quad (9)$$

$$B_{(i)} = \text{Costo de faltante del producto } i \quad (10)$$

$$TS_{(i,m)} = \text{Tiempo de alistar la referencia } i \text{ en la máquina } m \quad (11)$$

$$CS_{(i,m)} = \text{Costo de setup de } i \text{ en la máquina } m \quad (12)$$

-Variables

$$X_{(imt)} = \text{Cantidad a producir de la referencia } i \text{ en la máquina } m \text{ en el período } t \quad (13)$$

$$I_{(it)} = \text{Cantidad de bajadas de } i \text{ a guardar en el período } t \quad (14)$$

$$F_{(it)} = \text{Número de ventas perdidas de } i \text{ en } t \quad (15)$$

$$y_{(imt)} = \{1 \text{ Si se produce } i \text{ en } m \text{ en el período } t, 0 \text{ En caso contrario}\} \quad (16)$$

-Función objetivo

$$\text{Min}Z = \sum_i \sum_m \sum_t CPRD_{(i,m)} * X_{(imt)} + \sum_i \sum_t CI_{(i)} * I_{(it)} + \sum_i \sum_t F_{(it)} * B_{(i)} + \sum_i \sum_m \sum_t CS_{(i,m)} * y_{(i,m,t)} \quad (17)$$

-Restricciones

-Balance de inventario

$$INVIN_{(i)} + \sum_m X_{(imt)} + F_{(it)} - I_{(it)} = D_{it}, \quad \forall_i \quad (18)$$

$$I_{i(t-1)} + \sum_m X_{(imt)} + F_{(it)} - F_{i(t-1)} - I_{(it)} = D_{it}, \quad \forall_i \forall_t \geq 2 \quad (19)$$

-Tiempo de producción y alistamiento

$$\sum_i TC_{im} * x_{imt} + \sum_i TS_{im} * y_{imt} \leq CP_{mt}, \quad \forall_m \forall_t \quad (20)$$

-Producción de una máquina

$$\sum_m y_{imt} = 1, \quad \forall_m \forall_t \quad (21)$$

-Inventario de seguridad

$$I_{it} \geq SS_i, \quad \forall_i \forall_t \quad (22)$$

-No negatividad

$$x_{(imt)}, I_{it}, F_{it} \geq 0 \quad \forall_i \forall_m \forall_t \quad (23)$$

-Variable Binaria (1= Hay Producción, 0= No hay Producción)

$$y_{imt} \in \{1,0\}$$

IV. VALIDACIÓN

A. Empresa. Caso de estudio

La empresa de cintas adhesivas se encuentra ubicada en Colombia. Es una de las fábricas de mayor proyección y crecimiento en la región. Ofrece un paquete integral de soluciones en adherencia y elementos complementarios que facilitan la labor diaria en la industria, oficina, taller, hogar y colegio. Su sistema de fabricación está basado en el método de - make to order -, el cual produce determinado artículo solo bajo pedido. Su ubicación estratégica en uno de los puertos más importantes de Sur América, con la capacidad de producción de mayor tamaño en el mercado y la diversidad más amplia de productos y presentaciones que requiere el mercado la respaldan en su continua expansión y crecimiento.

B. Problemática

Por un cambio estratégico, la empresa cambió de adhesivo para disminuir costos. Este hecho provocó un aumento del 5,50% en reclamos, siendo la meta un máximo de 2%. Por esta razón se retomó el anterior adhesivo, lo que generó cambios significativos en los pronósticos de ventas y planificación de la producción.

A raíz de esto, la planificación de producción se redujo a períodos diarios que dependían directamente de los pedidos diarios de los clientes. Esto causó escases de inventarios de materias primas, sobrecostos, aumento de tiempos muertos y posteriormente retrasos en la entrega de productos finalizados. En indicadores la situación reflejaba lo siguiente:

- No cumplimiento con el estándar de período máximo de entregas de cuatro días.
- Disminución de la utilidad neta de la empresa en 1%, 3%, y hasta 13%, mensuales.
- No había inventario de seguridad
- Pagos de horas extras por acumulación de trabajo.

De acuerdo con el escenario, se hacía urgente rediseñar el plan maestro de producción teniendo en cuenta las condiciones de la empresa. Para esto era necesario incluir una técnica de planeación agregada y modelos analíticos como la programación lineal.

C. Implementación

Antes de proyectar el modelo analítico fue necesario una serie de pasos según la planificación jerárquica [17] [Hax]. Se inició con el cálculo de pronósticos con la herramienta Statgraphics. Resultaron 6 pronósticos para cada una de las referencias con la finalidad de escoger el modelo más adecuado según el nivel de confianza

Posteriormente se realizaron la matriz de incidencia (TABLA 1) para identificar la compatibilidad de las máquinas, y la generación de subproblemas (TABLA 2).

La matriz de incidencia que se muestra en la TABLA 1 se creó para dividir el problema de la empresa en subproblemas. Se basó principalmente en el montaje de producción que incluyó factores como lo son montajes, ciclos de producción, distancia, temperatura. El resultado fue que cada referencia solo puede ser producida por cierto tipo de máquinas.

La matriz fue llenada por valores de 0 y 1. El valor de 0 (Cero) era para aquellos productos que no tenían compatibilidad con las máquinas. Y el valor de 1 (uno) para aquellos que si la tenían. La ruta de los productos ya estaba definida en el sistema de producción de la empresa. Por lo que, la matriz reflejó estas rutas para simplificar el problema.

TABLA 1.
MATRIZ DE INCIDENCIA

		MÁQUINA				
		M-250	NGR-350	M-3000	ARROW	TS-200
PRODUCTOS	102C-12x5	1	0	0	0	0
	102C-12x20	1	0	0	0	0
	102C-12x30	0	1	0	0	0
	102C-12x40	0	1	0	0	0
	563C-18x23	0	0	1	0	0
	563C-18x40	0	0	1	0	0
	563C-24x23	0	0	1	0	0
	563C-24x40	0	0	1	0	0
	563C-12x23	0	0	0	1	0
	563C-12x40	0	0	0	1	0
	563C-48x25	0	0	0	1	0
	563C-48x40	0	0	0	1	0
	700C-48x23	0	0	0	0	1
	700C-48x40	0	0	0	0	1
	700C-48x90	0	0	0	0	1
	702C-48x40	0	0	0	0	1
702-48x100	0	0	0	0	1	

A partir de la matriz se obtuvo cinco subproblemas como se muestra en la TABLA 2, uno por cada máquina, donde cada una de estas fabrica más de un producto convirtiéndose en modelos de una sola máquina multi-producto. En este caso no se presentó ningún subproblema que pudiera ser multi-máquina. Es decir, que un mismo producto se pudiese fabricar en dos máquinas al mismo tiempo. Basado en esto, se dispuso a visualizar, plantear y codificar en el software el problema de programación lineal. Se facilitó la interpretación de los datos, minimizando los errores que se pudieron originar al momento de haber sido analizada la información de los resultados.

TABLA 2.
SUBPROBLEMAS

SUBGRUPO	PRODUCTO	MÁQUINA
1	102C-12x5	M-250
	102C-12x20	
2	102C-12x30	NGR-350
	102C-12x40	
3	563C-18x23	M-3000
	563C-18x40	
	563C-24x23	
	563C-24x40	
4	563C-12x23	ARROW
	563C-12x40	
	563C-48x25	
	563C-48x40	
5	700C-48x23	TS-200
	700C-48x40	
	700C-48x90	
	702C-48x40	
	702-48x100	

Con base en esta información se procedió a estructurar el modelo de programación lineal con la función objetivo de minimizar los costos de producción para un periodo de planeación de 6 meses basado en los resultados de los pronósticos.

Para la obtención de los datos de entrada fue necesario que las unidades del modelo de programación lineal se definieran en bajadas de producción. Las bajadas de producción representan la cantidad de rollos que sale de un ciclo de producción. De esta manera, los costos están asociados al número de rollos producidos. Se definió que los datos de entrada serían: Costos (Bajada, Setup, Inventario, faltante); Tiempos (Setup (min), Bajada, (Rollo/Bajada); Inventario Inicial (Rollo, Bajada).

A continuación, se muestran las fórmulas de cómo fueron calculados los diferentes costos que se ingresaron en el modelo de Programación Lineal:

$$\text{-Costos de Bajada} = (\text{Costo Unitario}) \times (\text{Tiempos Rollos/Bajada})$$

$$\text{-Costo de Setup} = ((\text{Tiempos Setup} \times (\text{Tiempos Rollos/Bajada}) / \text{Tiempos Bajada}) \times \text{Cif/Rollo}) + (27 \times (\text{Tiempos Rollos/Bajada}) / (\text{Tiempos Bajada} \times \text{Mano Obra/Rollo}))$$

$$\text{-Costos de Inventario} = (\text{Costo de Bajada} \times 0,036)$$

-Costos Faltante = (Costo de Venta de una bajada – Costo producción de una Bajada)

Ver ANEXO, TABLA 3

Los cálculos de los costos totales fueron aplicados para cada una de las referencias.

Asimismo, fueron calculados los tiempos para cada referencia expresados en Minutos. Los Tiempos Setup y los rollos/ bajada fueron establecidos por los estándares de producción.

-Tiempos Bajada= ((Tiempo Rollos/Bajada) x 60)/(Rollo/hora)

Ver ANEXO, TABLA 4

El inventario inicial fue obtenido de la base de datos del software de la empresa. La información del inventario inicial muestra la cantidad de rollos que se encuentran almacenados en la bodega de producto terminado. Por tanto, se convirtió a inventario inicial de bajadas.

-Inventario Inicial Bajadas= (Inventario Inicial Rollos)/(Rollo/ Ciclo)

Ver ANEXO, TABLA 5

El inventario de seguridad se basó en la capacidad de almacenamiento de la bodega de producto terminado y en políticas de la empresa. Mientras se desea tener el mayor nivel de stock posible para satisfacer la demanda, debe considerarse su costo. Es por esto que costoso se propuso tener un inventario de seguridad del 30% de la capacidad de almacenamiento de la bodega para cada una de las referencias.

-Almacenamiento Máximo Bajadas = ((Inventario seguridad Rollos)/ (Rollo/Ciclo))

-Inventario Seguridad Rollos = (Cajas x Unidad de Empaque)

-Inventario Seguridad = (Inventario Máximo Bajadas x 0,3)

Ver ANEXO, TABLA 6

Para los requerimientos de materia prima no fue necesario la realización de un MRP ya que la empresa contaba con un sistema ERP. Para el estudio se tomaron los datos del sistema.

D. Comparación con actual sistema de planificación de la producción

Para validar si el modelo propuesto era eficiente para la empresa, se cotejó con las demandas reales del semestre anterior. El objetivo de esta validación fue minimizar los costos

de producción total de los 6 meses por cada referencia de productos. De esta manera se obtuvieron datos más reales y relevantes para poder concluir si era satisfactorio el modelo propuesto, o si por el contrario este necesitaba algún ajuste.

Al comparar la solución del modelo de programación lineal propuesto con el actual sistema de planificación de la producción de la empresa se generó una reducción en los costos de Producción entre los estimados y los reales ya generados.

Los valores Z de cada subgrupo fueron comparados con los costos reales. Los resultados se muestran en la Fig. Figura 1. En esta se observan las diferencias obtenidas de la comparación. Para todos los casos el Valor Z resultó más bajo que el costo real.

El subgrupo 1 en el que están incluidas las Referencias 102 (12x5, 12x20) fabricadas en la máquina M-250 arrojan un resultado con una reducción de costos en un 30%.

-Costo real: \$ 55.382.893,84 COP

-Valor Z: \$ 38.845.982,00 COP

El subgrupo 2 está conformado por las Referencias 102 (12x30, 12x40) fabricadas en la máquina NGR-350. En este se obtuvo una reducción de costos en un 14%

Costo real: \$ 37.187.238,42 COP

Valor Z: \$ 31.767.449,00 COP

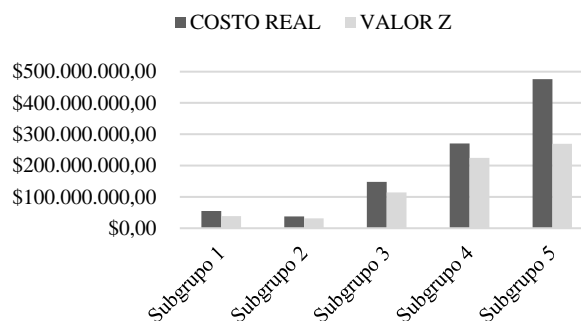


Figura 1. Valores de Costos reales comparados con valor Z

El subgrupo 3 incluye las Referencias 563 (12X23, 12x40, 48x25, 48x40) fabricadas en la máquina ARROW. La reducción de costos fue de un 22%

-Costo real: \$ 148.434.050,00 COP

-Valor Z: \$ 114.636.305,36 COP

En el subgrupo 4 se encuentran las Referencias 563 (18x23, 18x40, 24x23, 24x40) fabricadas en la máquina M-3000. Este obtuvo una reducción de costos en un 17%.

-Costo real: \$ 270.969.516 COP

-Valor Z: \$ 224.558.279 COP

Finalmente, el subgrupo 5 que incluye las Referencias 700 (48x23, 48x40, 48x90 702 48x100, 48X180) fabricadas en la máquina TS-200 arrojan una reducción de costos en un 43%

-Costo real: \$ 475.556.411 COP

-Valor Z: \$ 269.272.990 COP

De esta manera, se identificó que los modelos arrojaron resultados satisfactorios.

V. CONCLUSIONES

Mediante este estudio se ha demostrado el uso de un modelo de planeación agregada basado en programación lineal para minimizar los costos de producción. En este caso se implementó en una empresa de cintas adhesivas con dificultades causadas por decisiones en el área de producción. Las principales problemáticas radicaban en escasos inventarios de materias primas, sobrecostos, aumento de tiempos muertos y posteriormente retrasos en la entrega de productos finalizados.

La propuesta implementada generó un nuevo modelo aplicable para la empresa. Su validación demostró una reducción de costos respecto a los procesos que se llevaban a cabo en la empresa. Los porcentajes de reducción de costos generados se encuentran en un rango entre 14% y 43% después de comparar los valores Z y los costos reales asumidos por la empresa en los 6 períodos anteriores al estudio.

REFERENCES

- [1] Markets and markets, "Adhesive Tapes Market by Resin Type & Technology - Global Forecast 2022 | MarketsandMarkets," 2019. [Online]. Available: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/adhesive-tapes-market-251563138.html?gclid=Cj0KCQIAmsrxBRDaARIsANyiD1pnFZHZBVHeUYsjYAjsGG5K6fF43wi84nVW75RA3WfSJOqf94tE7UaAiVdEALw_wcB. [Accessed: 30-Jan-2020].
- [2] J. P. Reyes Vásquez and C. G. Molina Velis, "Plan Agregado de Producción Mediante el Uso de un Algoritmo de Programación Lineal: Un caso de Estudio," *Rev. Politécnica*, vol. 34, no. 1, pp. 1–7, 2014.
- [3] D. Cáceres, J. Reyes, and M. García, "Modelo de Programación Lineal para Planeación de Requerimiento de Materiales," *Rev. Tecnológica ESPOL – RTE*, vol. 28, no. Septiembre, pp. 24–33, 2015.
- [4] Y. R. Zotelo, J. Mula, M. Díaz-Madroñero, and E. G. González, "Plan maestro de producción basado en programación lineal para una empresa de productos químicos," *Rev. Métodos Cuantitativos para la Econ. y la Empres.*, vol. 24, pp. 147–168, 2017.
- [5] W. A. Sarache, "El proceso de planificación, programación y control de la producción. Una aproximación teórica y conceptual," Manizales, 2003.
- [6] N. Gaither and G. Frazier, *Administración de producción y operaciones*. International Thomson, 2000.
- [7] J. Heizer and B. Render, *Principios de Administración de Operaciones*, 7th ed. México D.F.: México, 2009.
- [8] S. Nahmias, *Análisis de la producción y las operaciones*, 5th ed. México D.F.: México, 2007.
- [9] J. Mula, R. Poler, G. S. García-Sabater, and F. C. Lario, "Models for production planning under uncertainty: A review," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 103, no. 1, pp. 271–285, 2006.
- [10] M. D. A. Serna, C. V. Rodríguez, and H. G. Montoya, "Modelización difusa para la planificación agregada de la producción en ambientes de incertidumbre," *DYNA*, vol. 77, no. 162, pp. 397–409, 2010.
- [11] C. Gomes da Silva, J. Figueira, J. Lisboa, and S. Barman, "An interactive decision support system for an aggregate production planning model based on multiple criteria mixed integer linear programming," *Omega*, vol. 34, no. 2, pp. 167–177, 2006.
- [12] J. R. Coronado-Hernandez, D. Simancas-Mateos, K. Avila-Martínez, and J. P. García-Sabater, "Heuristic for material and operations planning in supply chains with alternative product structure," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 628–635, 2017.
- [13] P. I. Vidal-Carreras, J. P. García-Sabater, and J. R. Coronado-Hernandez, "Economic lot scheduling with deliberated and controlled coproduction," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 219, no. 2, pp. 396–404, 2012.
- [14] J. R. Coronado-Hernandez, J. Padron-Cano, W. Caicedo-Torres, N. Mercado-Caruso, and F. V. Ospino-Vadiris, "Materials requirements planning through an application based on particle swarm optimization [Planificación de requerimientos de materiales por medio de la aplicación de un algoritmo basado en enjambre de partículas]," 2017. [Online]. Available: <https://repositorio.utb.edu.co/handle/20.500.12585/8964>. [Accessed: 25-Jun-2020].
- [15] G. Rius-Sorolla, J. Maheut, J. R. Coronado-Hernandez, and J. P. García-Sabater, "Lagrangian relaxation of the generic materials and operations planning model," *Cent. Eur. J. Oper. Res.*, 2018.
- [16] N. Nagarur, P. Vrat, and W. Duongsuwan, "Production planning and scheduling for injection moulding of pipe fittings: A case study," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 53, no. 2, pp. 157–170, Nov. 1997.
- [17] A. C. Hax and H. C. Meal, "HIERARCHICAL INTEGRATION OF PRODUCTION PLANNING AND SCHEDULING," 1973.

ANEXO 1

TABLA 3. DATOS CÁLCULO DE COSTOS

Máquinas	Referencias	COSTOS						
		Bajada	Setup	Inventario	cif/rollo	mo/rollo	Faltante	ventas
M-250	102C-12x5	\$ 3.642	\$ 23.307	\$ 131	\$ 4,0	\$ 0,5	\$ 7.663	\$ 11.305,0
	102C-12x20	\$ 9.086	\$ 23.342	\$ 327	\$ 6,4	\$ 0,8	\$ 18.179	\$ 27.265,0
NGR-350	102C-12x30	\$ 19.295	\$ 19.675	\$ 695	\$ 8,0	\$ 2,8	\$ 28.585	\$ 47.880,0
	102C-12x40	\$ 20.255	\$ 19.670	\$ 729	\$ 9,6	\$ 3,3	\$ 44.250	\$ 64.505,0
ARROW	563C-12x23	\$ 39.320	\$ 32.124	\$ 1.416	\$ 18,4	\$ 3,1	\$ 47.795	\$ 87.115,0
	563C-12x40	\$ 63.216	\$ 32.135	\$ 2.276	\$ 19,5	\$ 3,3	\$ 75.104	\$ 138.320,0
M-3000	563C-18x23	\$ 32.620	\$ 12.494	\$ 1.174	\$ 6,4	\$ 1,1	\$ 54.380	\$ 87.000,0
	563C-18x40	\$ 54.901	\$ 12.083	\$ 1.976	\$ 7,3	\$ 1,3	\$ 88.214	\$ 143.115,0
	563C-24x23	\$ 31.922	\$ 11.062	\$ 1.149	\$ 9,8	\$ 1,6	\$ 51.929	\$ 83.850,0
	563C-24x40	\$ 52.709	\$ 11.053	\$ 1.898	\$ 8,8	\$ 1,5	\$ 79.566	\$ 132.275,0
ARROW	563C-48x25	\$ 34.201	\$ 8.880	\$ 1.231	\$ 29,7	\$ 4,9	\$ 61.994	\$ 96.195,0
	563C-48x40	\$ 52.612	\$ 8.880	\$ 1.894	\$ 29,7	\$ 4,9	\$ 91.268	\$ 143.880,0
TS-200	700C-48x23	\$ 9.946	\$ 12.326	\$ 358	\$ 17,8	\$ 2,0	\$ 19.979	\$ 29.925,0
	700C-48x40	\$ 15.422	\$ 12.317	\$ 555	\$ 19,4	\$ 2,2	\$ 39.528	\$ 54.950,0
	700C-48x90	\$ 15.018	\$ 12.320	\$ 541	\$ 22,4	\$ 2,5	\$ 80.882	\$ 95.900,0
	702c-48x40	\$ 16.349	\$ 9.579	\$ 589	\$ 9,6	\$ 2,3	\$ 42.102	\$ 58.450,0
	702c-48x100	\$ 37.114	\$ 8.878	\$ 1.336	\$ 15,2	\$ 2,5	\$ 87.836	\$ 124.950,0

TABLA 4. DATOS CÁLCULO TIEMPOS

Máquinas	Referencias	TIEMPOS		
		Setup(min)	Tiempo Bajada	Rollos/bajada
M-250	102C-12x5	45	1,1	133
	102C-12x20	45	1,8	133
NGR-350	102C-12x30	45	2,9	133
	102C-12x40	45	3,5	133
ARROW	563C-12x23	40	3,4	133
	563C-12x40	40	3,6	133
M-3000	563C-18x23	30	1,5	87
	563C-18x40	30	1,8	87
	563C-24x23	26	1,8	65
	563C-24x40	26	1,6	65
ARROW	563C-48x25	20	2,7	33
	563C-48x40	20	2,7	33
TS-200	700C-48x23	20	1,2	35
	700C-48x40	20	1,3	35
	700C-48x90	20	1,5	35
	702c-48x40	20	0,9	35
	702c-48x100	20	1,5	35

TABLA 5. DATOS CÁLCULO INVENTARIO INICIAL ROLLOS Y BAJADAS

Máquinas	Referencias	Inventario inicial	
		rollos	Bajadas
M-250	102C-12x5	0	0
	102C-12x20	4.296	32
NGR-350	102C-12x30	5.090	38
	102C-12x40	7.712	58
ARROW	563C-12x23	16	0,12
	563C-12x40	0	0
M-3000	563C-18x23	62	0,7
	563C-18x40	120	1,38
	563C-24x23	0	0
	563C-24x40	0	0
ARROW	563C-48x25	8	0,24
	563C-48x40	0	0
TS-200	700C-48x23	10486	300
	700C-48x40	8297	237
	700C-48x90	5199	149
	702c-48x40	1930	55
	702c-48x100	0	0

TABLA 6. DATOS CÁLCULO INVENTARIO SEGURIDAD ROLLOS Y BAJADAS

Máquinas	Referencias	Inventario de seguridad				
		Cajas	Und. empaque	Rollos	Almac. Max bajadas	Inventario de Seguridad
M-250	102C-12x5	108	3024	326592	2456	737
	102C-12x20	20	1800	36000	271	81
NGR-350	102C-12x30	132	360	47520	357	107
	102C-12x40	20	288	5760	43	13
ARROW	563C-12x23	200	160	32000	241	72
	563C-12x40	130	160	20800	156	47
M-3000	563C-18x23	270	104	28080	323	97
	563C-18x40	180	104	18720	215	65
	563C-24x23	270	80	21600	332	100
	563C-24x40	180	80	14400	222	66
ARROW	563C-48x25	50	50	2500	76	23
	563C-48x40	90	40	3600	109	33
TS-200	700C-48x23	378	144	54432	1555	467
	700C-48x40	81	144	11655	333	100
	700C-48x90	80	108	8640	247	74
	702c-48x40	60	144	8645	247	74
	702c-48x100	50	96	4800	137	41