MODELO MATEMÁTICO PARA LA PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN UNA EMPRESA DE CALZADO

MATHEMATICAL MODEL FOR PRODUCTION PLANNING IN A FOOTWEAR COMPANY

Jafa Zapata Lara
Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
tel-aviv-jafa@hotmail.com

Salvador Hernández González
Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

Vicente Figueroa Fernández
Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
vicente.figueroa@itcelaya.edu.mx

José Israel Hernández Vázquez
Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
israel_leon12@hotmail.com

Israel de la Cruz Madrigal
Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
israel.delacruz@itcelaya.edu.mx

Recepción: 29/abril/2020 **Aceptación:** 25/mayo/2020

Resumen

En el presente trabajo se aborda la problemática de una empresa manufacturera de calzado donde la planeación de la producción se realiza de manera empírica. Mediante el estudio de los datos de dicha empresa se elaboró un modelo matemático de programación lineal entera, cuya resolución con la herramienta Solver de Excel permitió determinar la máxima afinidad que presentan los productos por las líneas de producción. En este caso se realiza la asignación de productos a las diferentes líneas del departamento de pespunte de la empresa de calzado. Los resultados son satisfactorios al obtener una afinidad mayor que la obtenida cuando se programa de manera empírica.

Palabras Clave: investigación de operaciones, modelo matemático, planeación de la producción, programación de la producción, programación lineal entera.

Abstract

This work deals with the problems of a shoe manufacturing company where production planning is done empirically. By studying the data of this company, a mathematical model of linear integer programming is prepared, whose resolution with the Excel Solver tool allowed determining the maximum affinity that the products have for the production lines. In this case, the allocation of products is made to the different lines of the stitching department of the footwear company. The results are satisfactory by obtaining a higher affinity than that obtained when programming empirically.

Keywords: *operations research, mathematical model, production planning production scheduling, integer linear programming.*

1. Introducción

La fabricación de calzado en México es una importante actividad comercial que genera una cadena de proveeduría altamente competitiva. El 94% del valor de la producción de calzado en México se concentra en cuatro entidades: Guanajuato 70%, Jalisco 15%, el Estado de México 5% y la Ciudad de México 3%. La industria de calzado está integrada por cerca de 7 mil 400 establecimientos productores, equivalentes al 68.4% del total de la cadena productiva [Secretaría de Economía, 2015]. En la ciudad de León esta industria es el principal motor económico, por lo que la empresa estudiada se localiza en esta ciudad.

La planeación y programación de la producción se caracterizan por contar con un conjunto de decisiones estructurales interrelacionadas, las cuales permiten definir la actividad productiva de la organización a corto y mediano plazo [Silva Rodríguez, Cárdenas & Galindo Carabalí, 2017] y determinar las decisiones operativas que buscan el cumplimiento de las metas propuestas, mediante la asignación de los recursos disponibles a las tareas de producción requeridas [Lopez, Giraldo & Arango, 2015].

Los problemas de planeación de la producción pueden ser resueltos óptimamente al utilizar técnicas de programación matemática. Hoy en día, la investigación de operaciones es una herramienta dominante e indispensable para la toma de decisiones; la importancia de su aplicación radica en su fortaleza para modelar y resolver problemas complejos y de gran escala [Ortiz-Triana & Caicedo-Rolón, 2015].

Los problemas de planificación de la producción en los que las demandas conocidas deben satisfacerse en un horizonte finito con costos mínimos totales son problemas de la clase NP-duro [Florian, Lenstra & Rinnooy Kan, 1980].

La complejidad de este tipo de problemas radica en el esfuerzo computacional que se requiere a medida que se incrementa el problema. Un problema NP-duro es aquél en el que, al incrementar el número de variables, el tiempo para su solución crece de forma exponencial, haciéndolo de los más difíciles de resolver [Sipper & Bulfin, 1998].

Algunas aplicaciones del modelado matemático para la planeación de la producción son:

- Fundición de metales: [Ramin, Spinelli & Brusaferri, 2018] propusieron un modelo matemático de programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés) para la programación óptima de la operación diaria, con el objetivo de minimizar el costo del consumo de energía y maximizar la provisión de reservas al participar en el mercado auxiliar.
- Producción de latas y contenedores: [Emami, Barzegaran & Divsalar, 2019] propusieron un modelo de MILP para obtener el plan óptimo de producción y el horizonte de planificación anual maximizando las utilidades y satisfaciendo las demandas de los clientes.
- Industria ganadera: [Nadal-Roig, Plà-Aragonès & Alonso-Ayuso, 2019] propusieron un modelo de MILP para la planeación de la producción. El modelo ayuda a los gerentes a tomar decisiones, proporcionando una visión general para planificar la producción a lo largo del tiempo y maximizando las ganancias.
- Fabricación de yogur: [Georgiadis, Kopanos, Karkaris, Ksafopoulus & Georgiadis, 2019] abordaron el problema de dimensionamiento de lotes y programación de la producción con un modelo matemático de MILP cuyo objetivo es minimizar los costos. Con el modelo se obtuvo un programa

semanal óptimo que se deriva en un tiempo de cómputo corto y una reducción significativa del costo total.

- Industria química: [Reyes Zotelo, Mula, Días-Madroñero & Gutiérrez González, 2017] propusieron un modelo matemático para realizar la planificación maestra de producción considerando los costos de producción e inventario, así como restricciones de instalaciones y tiempos de producción, para minimizar los costos totales de producción.
- Industria cervecera: [Gebennini, Zeppetella, Grassi & Rimini, 2015] abordaron el problema de la programación de la producción al considerar la variedad de productos y los problemas de sustitución de la demanda. El modelo matemático optimizó el cronograma de producción y el surtido de productos a corto plazo, minimizando los costos totales.
- Secadores de madera: [Cifuentes, Gatica & Linfati, 2017] propusieron un modelo matemático que consideró un conjunto de 10 máquinas paralelas con tres tecnologías diferentes, con 161 trabajos y en un horizonte de planeación mensual. Con el modelo matemático se logró reducir el tiempo total de procesamiento (*makespan*) en un 8.5%.
- Sector hortofrutícola: [Sánchez-Pineda & Ramírez-Torres, 2017] formularon un modelo matemático de programación lineal para planear la producción de cultivo de fresa, de tal manera que se maximice la utilidad del cultivo. Se determinó que el modelo funciona a nivel teórico y permite establecer un sistema de verificación de capacidades productivas de acuerdo con parámetros de entrada específicos.
- Producción de poleas y casquillos: [Gutiérrez González & Panteleeva, 2020] propusieron un modelo de programación lineal entera para planificar la producción anual con el fin de que el flujo de los productos de la compañía sea más eficiente y con niveles de servicio superiores al 90%. Lograron minimizar los costos semanales de producción y mantenimiento de un nivel mínimo de inventario para artículos de clase A.
- Industria de calzado: [Ortiz-Triana y Caicedo-Rolón, 2015] presentaron el diseño de un procedimiento para la programación y control de la producción.

Aplicaron teoría de restricciones en conjunto con programación lineal entera para determinar las cantidades óptimas de fabricación y maximizar las utilidades. El procedimiento obtenido permitió alcanzar una mayor utilidad, disminuir los costos de inventarios, los tiempos de entrega y satisfacer la demanda en su totalidad.

En la práctica, todas las decisiones relacionadas con la programación se derivan principalmente de Gerentes de producción; por lo tanto, el rendimiento general y la productividad de la planta están sujetos a su experiencia y comprensión del estado de cada equipo o línea de producción [Georgiadis et al., 2019].

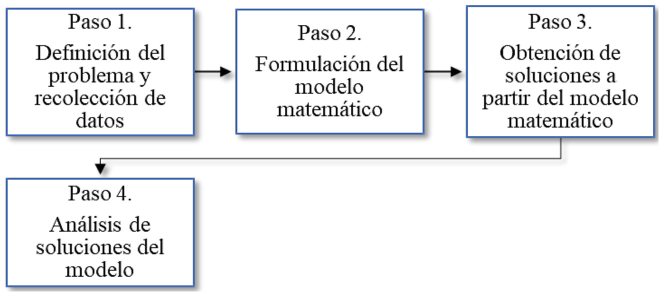
En las líneas de producción de la fábrica de calzado analizada, generalmente se solicitan diversas cantidades de cada uno de los productos, ocasionando cambios de modelo constantemente en las líneas de producción, lo que conlleva retrasos, defectos y mayor variabilidad. A diferencia de los trabajos mencionados, el modelo diseñado en esta investigación pretende maximizar la afinidad que tiene cada línea de producción con los productos a fabricar, considerando la habilidad de los operadores para realizar el pespunte de los diferentes productos. De esta manera se podrían obtener menos cambios de modelo en cada línea, lo cual reduciría la variabilidad en los productos.

2. Método

Para la elaboración del modelo matemático se toma como base los pasos descritos por Hillier & Lieberman [2010], los cuales se presentan en la figura 1:

- Paso 1. Definición del problema y recolección de datos. En este paso se analiza el sistema de estudio y se realiza un resumen bien definido del problema a ser analizado. Se determinan los objetivos apropiados y las restricciones sobre lo que es posible hacer, etc. La recolección de datos pretende lograr una comprensión exacta del problema y proporcionar el insumo adecuado para el modelo matemático [Hillier & Lieberman, 2010].

  Para la recolección de datos se utilizará la base de datos del departamento de ingeniería de la empresa. En este caso se obtendrán los datos del área de pespunte; recolectando los tiempos estándar de fabricación, el personal disponible, la afinidad de cada producto, así como la demanda requerida.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1 Diagrama de flujo para la elaboración del modelo.

- Paso 2. Formulación del modelo matemático. Una vez que se plantea el problema, se procede a transformarlo en un modelo matemático que lo represente, esto mediante la formulación de la función objetivo, las restricciones y la determinación de los parámetros adecuados. Así mismo se establecerán las variables de decisión para la resolución del problema [Hillier & Lieberman, 2010].
- Paso 3. Obtención de soluciones a partir del modelo matemático. El siguiente paso es dar solución al modelo matemático formulado [Hillier & Lieberman, 2010]. En este caso se utilizará el algoritmo de ramificación y acotamiento mediante el uso de la herramienta Solver de Excel.
- Paso 4. Análisis de resultados. Se verificará que los resultados cumplan con las restricciones y si en efecto maximizan o no la afinidad. También se evaluará si los resultados son coherentes con la realidad, o si deberán hacerse modificaciones.

Definición del problema y recolección de datos

La industria de calzado comúnmente cuenta con los siguientes departamentos para la fabricación de los productos: 1) corte, 2) avíos, 3) procesos especiales, 4) pespunte, 5) montado, 6) adorno y 7) embarque.

De los diferentes departamentos mencionados, el de pespunte es el que tiene la mayor complejidad en el proceso; esto debido a la variación que existe en el armado entre un producto y otro, además de las distintas habilidades y destrezas de los operarios. Este departamento es considerado como cuello de botella en el proceso de fabricación en la mayoría de las empresas de calzado.

En el departamento de pespunte se realiza la unión de las diferentes piezas de piel o material sintético que conforman el cascarón del zapato a través de la costura, para esto se utilizan máquinas de coser industriales. Este departamento en la fábrica de calzado analizada consta de 5 líneas de producción paralelas, las cuales se componen de 12 puestos de trabajo: pespuntador plano, pespuntador poste, pespuntador zigzag, preliminar, plisador, resacador, doblillador, componedor, perforador, conformador, asentador y ribeteador.

La actividad de programación en la empresa estudiada está a cargo de un responsable de la administración, quien normalmente la efectúa con base en su intuición o experiencia. El tomar este tipo de decisiones de forma empírica puede requerir una gran cantidad de tiempo y esfuerzo, por lo cual no resulta conveniente cuando se tiene un número grande de máquinas y productos a ser procesados.

Uno de los problemas identificados es que, el pespunte, al ser una actividad muy artesanal, depende de la habilidad del operario, por lo que asignar productos a una línea de producción sin tomar en cuenta esta habilidad, puede llevar a un mayor número de piezas rechazadas, así como a una mayor variabilidad en el proceso al haber más cambios de modelo. Para esto se propone el diseño de un modelo matemático de programación lineal entera que maximice la afinidad que se tiene de cada producto por cada una de las líneas de producción.

Matrices de datos

Una vez observado el problema, la recolección de datos incluyó la identificación de la afinidad que tiene cada una de las cinco líneas de producción por cada uno de los productos que fabrica la empresa. Esta matriz se construye con base en la experiencia del gerente de planta y el conocimiento del personal de cada línea. La matriz de afinidad se elaboró tomando en cuenta lo siguiente:

- Se asigna un valor de 5 cuando el producto tiene una afinidad alta por la línea de producción.

- Se asigna un valor de 4 cuando el producto tiene una afinidad media por la línea de producción.
- Se asigna un valor de 3 cuando el producto tiene una afinidad baja por la línea de producción.
- Se asigna un valor de -1 cuando el producto no puede ser procesado en dicha línea de producción.

En la tabla 1 se muestra la matriz de afinidad generada. En esta tabla se muestran los productos que tienen una mayor demanda en esta época del año y los cuales serán considerados para la evaluación del modelo.

Tabla 1 Afinidad del producto por la línea de producción.

	AFINIDAD				
Producto	**LÍNEA 1**	**LÍNEA 2**	**LÍNEA 3**	**LÍNEA 4**	**LÍNEA 5**
220-8	5	-1	-1	-1	4
287	5	-1	-1	-1	4
11601	3	5	4	4	3
11602	3	5	4	4	3
37001	3	4	5	4	3
37002	3	4	5	4	3
50216	3	4	4	5	3
50217	3	4	4	5	3
55001	4	3	3	3	5
55003	4	3	3	3	5

Fuente: Elaboración propia

Se recolectaron los tiempos de procesamiento en minutos de cada uno de los productos (pares de zapatos) en cada uno de los 12 puestos de trabajo de la línea de producción, para lo cual se consideraron tiempos estándar. Estos datos se muestran en la tabla 2.

Para calcular el tiempo disponible que se tiene en cada línea, se tomó en cuenta la matriz de personal disponible. Se considera que se tiene una jornada de trabajo por día de 8 horas, y se calcula el tiempo disponible en minutos. En la tabla 3 se muestra esta matriz, por lo que para la determinación del tiempo disponible se hacen los cálculos correspondientes. El objetivo del modelo es determinar la asignación óptima de productos a las líneas de producción, con el fin de maximizar la afinidad que tiene cada uno de ellos por las diferentes líneas de producción, considerando como restricción el tiempo disponible en cada puesto de trabajo en cada línea, de tal manera que se cumpla con la demanda requerida.

Tabla 2 Matriz de tiempos de procesamiento de los productos (minutos).

Puesto de trabajo	Tiempos de procesamiento (minutos)									
	220-8	287	11601	11602	37001	37002	50216	50217	55001	55003
Pesp. plano	2.88	2.95	5.07	4.58	4.08	3.78	8.62	4.62	5.18	6.15
Pesp. poste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	2.82
Preliminar	2.11	9.07	7.42	3.73	4.73	3.70	23.05	4.77	3.63	3.33
Plisador	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
Resacador	0.00	0.00	1.33	1.75	0.67	1.17	4.63	0.67	0.70	0.75
Doblillador	0.00	0.00	1.00	1.38	0.67	1.25	0.97	1.52	0.73	0.93
Componedor	1.35	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.40
Perforador	0.00	0.00	0.52	0.25	0.27	0.28	0.00	0.33	0.28	0.28
Conformador	0.38	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	0.48
Asentador	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.23	0.23
Ribeteador	0.63	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Personal disponible por línea de producción.

PUESTOS DE TRABAJO	PERSONAL DISPONIBLE POR DÍA				
	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	LÍNEA 4	LÍNEA 5
Pespuntador PL	11	9	9	9	11
Pespuntador PT	2	1	1	1	2
Pespuntador zigzag	1	1	1	1	1
Preliminar	10	12	12	12	10
Plisador	1	0	0	0	1
Resacar corte	1	4	4	4	1
Doblillador	1	3	3	3	1
Componedor	1	1	1	1	1
Perforador	1	2	2	2	1
Conformador	1	1	1	1	1
Asentador	1	1	1	1	1
Ribeteador	3	0	0	0	3
TOTAL	**34**	**35**	**35**	**35**	**34**

Fuente: Elaboración propia

Modelo matemático

La ecuación 1 indica la función objetivo que maximiza la afinidad del producto con la línea de producción, cuyas restricciones se muestran en ecuaciones 2 a 4.

$$Max\ Z = \sum_{i=1}^{10} \sum_{k=1}^{5} a_{ik} * x_{ik} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{5} x_{ik} \leq D_i \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{10} c_{ijk} * x_{ik} \leq t_{jk} \tag{3}$$

$$x_{ik} \geq 0, y\ entera \tag{4}$$

Donde:

$Max\ Z =$ Función objetivo que maximiza la afinidad del producto con línea de producción.

$i =$ Producto ($i = 1, 2, 3, \ldots, 10$).

$j =$ Puesto de trabajo ($j = 1, 2, 3, \ldots, 12$).

$k =$ Línea de producción ($k = 1, 2, 3, 4, 5$).

$a_{ik} =$ Afinidad del producto i a la línea k.

$c_{ijk} =$ Tiempo de procesamiento del producto i en el puesto de trabajo j, en la línea k (minutos).

$D_i =$ Demanda del producto i (pares de zapatos).

$t_{jk} =$ Minutos disponibles por día en el puesto de trabajo j, en la línea k.

$x_{ik} =$ Cantidad de producto i procesado en la línea k (pares de zapatos).

La restricción 2 evita que se planeen más productos de los que demanda el cliente. La restricción 3 implica que el tiempo requerido para producir los pares de zapatos en cada puesto de trabajo en cada línea, debe ser menor o igual al tiempo disponible en ese puesto de trabajo y en esa línea. La restricción 4 indica que los valores de la variable de decisión deben ser positivos y además enteros, ya que se trata de pares de zapatos.

3. Resultados

Obtención de soluciones a partir del modelo

Se utilizó Solver en Excel para dar solución al modelo matemático mediante la técnica exacta de ramificación y acotamiento. La tabla 4 muestra las demandas de los productos evaluados en el modelo y tabla 5 resultados obtenidos. La distribución de cada uno de los productos en las diferentes líneas genera una afinidad de 19,725 puntos.

Tabla 4 Demanda de los productos

Producto	Demanda (pares de zapatos)
220-8	300
287	200
11601	0
11602	800
37001	1,200
37002	0
50216	0
50217	900
55001	600
55003	0
Demanda total	**4,000**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Resultados del modelo matemático.

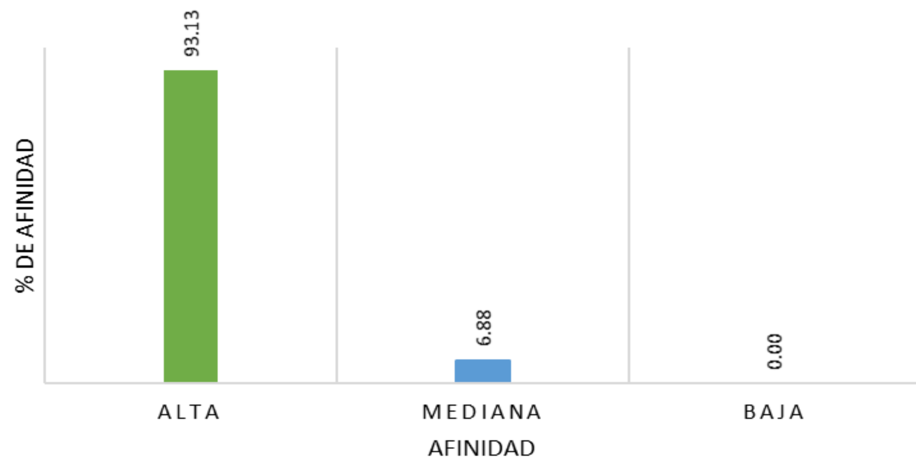
PRODUCTO	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	LÍNEA 4	LÍNEA 5
220-8	168	0	0	0	132
287	200	0	0	0	0
11601	0	0	0	0	0
11602	0	800	0	0	0
37001	0	143	1,057	0	0
37002	0	0	0	0	0
50216	0	0	0	0	0
50217	0	0	0	900	0
55001	0	0	0	0	600
55003	0	0	0	0	0
Total de pares por línea	**368**	**943**	**1,057**	**900**	**732**
		Z (AFINIDAD TOTAL) =		**19,725**	

Fuente: Elaboración propia

En la figura 2 se muestra el porcentaje de afinidad que tienen los pares de zapatos a producir. Se puede observar que el porcentaje de zapatos que se producen con una alta afinidad es del 93.13%, mientras que solo el 6.88% se produce con mediana afinidad y ningún par de zapatos se produce en alguna línea con baja afinidad.

4. Discusión

Para evaluar la efectividad del modelo, se realizó una comparativa de los resultados de la programación con el modelo matemático, versus los resultados obtenidos en una planeación empírica previamente elaborada por el personal de la empresa. Si no se toma en cuenta la afinidad de cada producto por la línea de producción, entonces para programarlo simplemente se divide la demanda entre las cinco líneas de producción; para lo cual, cada línea produce la misma cantidad de pares de zapatos de cada modelo. Esta programación se muestra en la tabla 6.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2 Porcentaje de afinidad de pares a producir.

Tabla 6 Programación de la producción de la empresa.

PRODUCTO	LÍNEA 1	LÍNEA 2	LÍNEA 3	LÍNEA 4	LÍNEA 5
220-8	60	60	60	60	60
287	40	40	40	40	40
11601	0	0	0	0	0
11602	160	160	160	160	160
37001	240	240	240	240	240
37002	0	0	0	0	0
50216	0	0	0	0	0
50217	180	180	180	180	180
55001	120	120	120	120	120
55003	0	0	0	0	0
Total de pares por línea	**800**	**800**	**800**	**800**	**800**
		Z (AFINIDAD TOTAL) =		**13,780**	

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, si se realiza la producción de esta manera, la afinidad de 13,780 es menor que la que se obtiene con el modelo de 19,725 puntos.

Además, en la programación de la empresa no se cumple con todas las restricciones de tiempo disponible, pues la producción en algunas líneas llega a consumir más tiempo del disponible. Se puede entonces determinar que el modelo en efecto aumenta la afinidad de cada producto por la línea de producción al considerar las restricciones del modelo.

Debido también a que, si se hace la asignación de productos a las líneas de producción de manera tradicional o empírica, se puede observar que al menos en cada línea habría 5 cambios de modelo, lo cual puede derivar en un aumento en la variabilidad del producto. Con el uso del modelo matemático para programar la producción se obtienen como máximo un cambio de modelo en las líneas 1, 2 y 5, y en las líneas 3 y 4 solo se produce un tipo de producto, por lo cual no habría cambios de modelo.

5. Conclusiones

El planear la producción a través de un modelo matemático lineal, permitió asignar los productos de mayor afinidad a cada línea de producción disminuyendo los cambios de modelo. Esto puede tener un efecto positivo en la variabilidad de los productos ya que esta puede disminuir al haber menos cambios de modelo; otro efecto podría ser la disminución de los tiempos muertos, ya que cuando se cambia de modelo se pueden tener muchos retrasos en este tipo de líneas.

Se recomienda realizar un análisis más exhaustivo al evaluar diferentes escenarios de demanda, para determinar los distintos flujos, así como evaluar qué tanto se asignan productos de alta afinidad.

6. Bibliografía y Referencias

[1] Cifuentes, N., Gatica, G. & Linfati, R. (2017). A linear programming model for the parallel non-related machines problem, in the drying area of a chilean sawmill. Revista Facultad de Ingeniería, Vol. 26, No. 46. Doi: http://doi.org/10.19053/01211129.v26.n46.2017.7309.

[2] Florian, M., Lenstra, J. K., & Rinnooy Kan, A. H. G. (1980). Deterministic Production Planning: Algorithms and Complexity. Management Science, Vol. 26, No. 7, 669–679. Doi: https://doi.org/10.1287/mnsc.26.7.669.

[3] Emami, S., Barzegaran, F., & Divsalar, A. (2019). A Mathematical Model for Production Planning and Scheduling in a Production System: A Case Study.

International Journal of Industrial Engineering & Management Science, Vol. 6, No. 2.

[4] Gebennini, E., Zeppetella, L., Grassi, A. & Rimini, B. (2015). Production scheduling to optimize the product assortment in case of constrained capacity and customer-driven substitution. IFAC-PapersOnLine, Vol. 48. Doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.374.

[5] Georgiadis, G. P., Kopanos, G. M., Karkaris, A., Ksafopoulos, H., & Georgiadis, M. C. (2019). Optimal Production Scheduling in the Dairy Industries. Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 58, No. 16, 6537–6550. Doi: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05710.

[6] Gutiérrez González, E., & Panteleeva, O. V. (2020). A model for planning and optimizing an engineering company production. OPSEARCH, 1–31. Doi: https://doi.org/10.1007/s12597-019-00435-7.

[7] Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). Introducción a la Investigación de operaciones (Novena ed.). México DF McGraw-Hill.

[8] Lopez, J. C., Giraldo J. A. & Arango J. A. (2015). Reducción del tiempo de terminación en la programación de la producción de una línea de flujo híbrida flexible (HFS). Información Tecnológica, Vol. 26, No. 3.

[9] Nadal-Roig, E., Plà-Aragonès, L. M., & Alonso-Ayuso, A. (2019). Production planning of supply chains in the pig industry. Computers and Electronics in Agriculture. Doi: https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.042.

[10] Ortiz-Triana, V. K. & Caicedo-Rolón Á. Jr. (2015). Procedimiento para la programación y control de la producción de una pequeña empresa. Revista Ingeniería Industrial.

[11] Ramin, D., Spinelli, S., & Brusaferri, A. (2018). Demand-side management via optimal production scheduling in power-intensive industries: The case of metal casting process. Applied Energy, Vol. 225, 622–636. Doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.084.

[12] Sánchez Pineda, D., & Ramírez Torres, N. (2017). Diseño de un modelo de programación lineal para la planeación de producción en un cultivo de fresa, según factores costo/beneficio y capacidades productivas en un periodo

temporal definido. Ingenierías USBMed, Vol. 8, No. 1. Doi: https://doi.org/10.21500/20275846.2564.

[13] Reyes Zotelo, Y., Mula, J., Días-Madroñero, M., & Gutiérrez González, E. (2017). Plan maestro de producción basado en programación lineal entera para una empresa de productos químicos. Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa, Vol. 24.

[14] Secretaría de Economía. (2015). La industria del calzado en México: www.gob.mx/se/articulos/la-industria-del-calzado-en-mexico.

[15] Silva Rodríguez, J., Cárdenas, C. D. & Galindo Carabalí, J. (2017). Herramientas cuantitativas para la planeación y programación de la producción: estado del arte. Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias, Vol. V, No. 18.

[16] Sipper, D., & Bulfin, R. L. (1998). Planeación y control de la producción (Primera ed.). México, DF: McGraw-Hill.