

Decisiones estratégicas empleando flujo máximo en redes: Aplicación a una empresa de autopartes

Salvador Hernández, Alma Gómez, Vicente Figueroa y Manuel Hernández

S. Hernández, A. Gómez, V. Figueroa y M. Hernández.
Instituto Tecnológico de Celaya, Av. Tecnológico y Antonio García Cubas s/n, C.P. 38010 Celaya, Gto., México.
salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx

M. Ramos., V. Aguilera., (eds.). Ciencias Administrativas y Sociales, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2013.

Abstract

In this paper we apply operations research concepts (modeling, maximum flow in a network and linear programming) in the analysis of the production capacity of an auto parts company. Since we focus on the optimization of the system, the objective of the analysis is to maximize the output and the optimization of the resources. With the model we obtain a set of production policies, and also facilitate quick decisions for the expansion of the capacity both in the long term horizon. The research is the interest for practitioners dedicated to the management of systems and those who are interested in reducing the associated uncertainty in the decision making process.

10 Introducción

El aumento de la competitividad a nivel internacional, exige de las empresas una mejora con enfoque global en sus organizaciones, que les permita tener una mejor respuesta ante los cambios en el entorno, conservando la calidad (de bienes y/o servicios) que satisfaga las exigencias de sus clientes y los mantenga posicionados en el mercado.

Un problema típico en la administración de las operaciones es la planificación de la producción en equipos con capacidad limitada: existe una demanda de productos los cuales deben fabricarse y los equipos existentes tienen ciertas características que deben tomarse en cuenta para tal efecto. En un contexto empresarial capacidad es la habilidad de realizar las transformaciones necesarias sujetas a la demanda de los clientes (Knod & Schonberger, 2009). Los responsables de la toma de decisiones toman en cuenta las entradas y las salidas de productos y buscan dar respuesta a preguntas como:

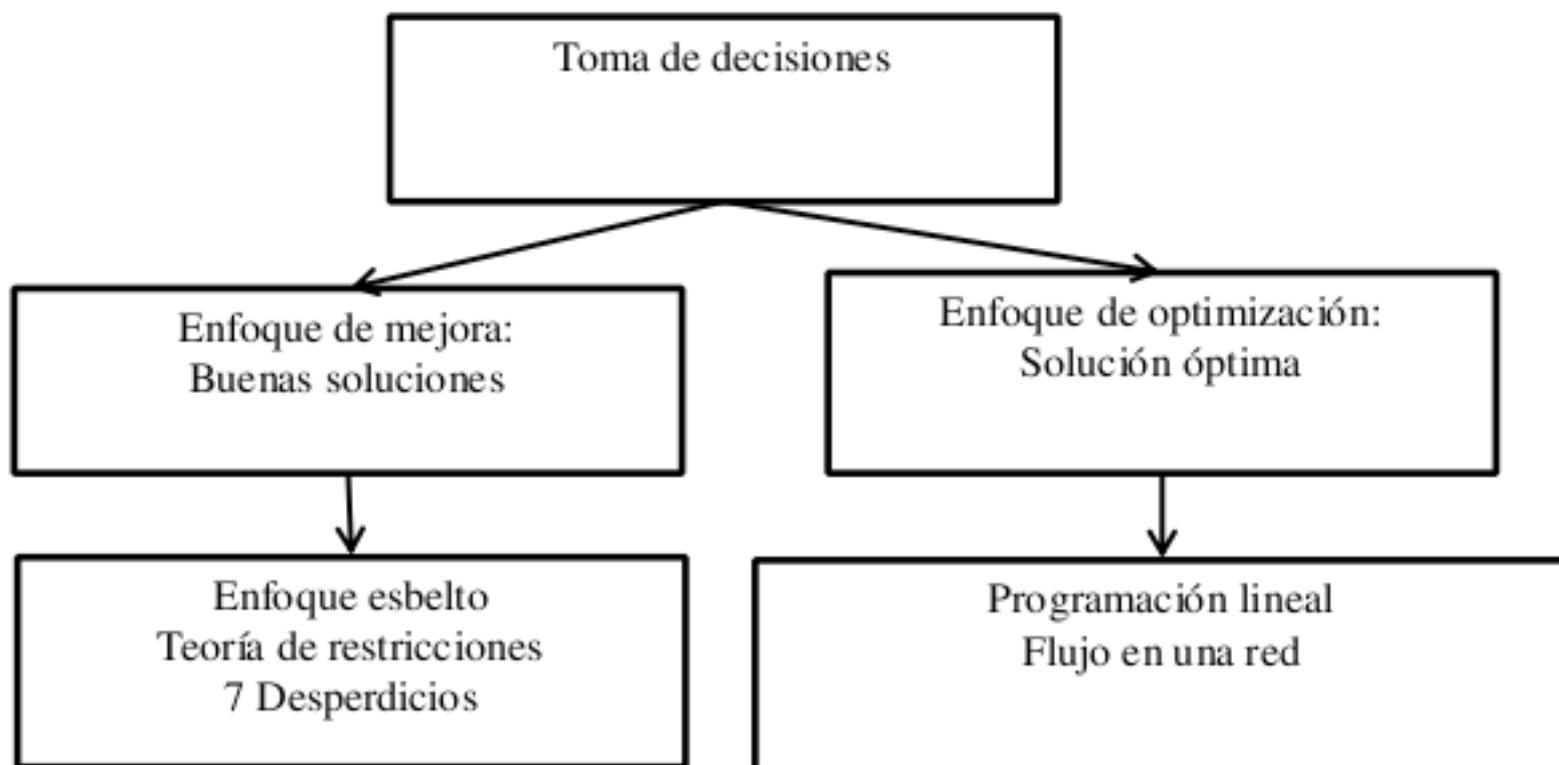
- ¿El sistema está fabricando la máxima cantidad posible de producto?
- ¿Existe capacidad disponible de los equipos para satisfacer demanda futura? Y
- ¿Es necesario considerar la posibilidad de la adquisición de nueva tecnología?

La planeación estratégica de la capacidad es proveer un enfoque para determinar el nivel de capacidad general de recursos con uso intensivo del capital (instalaciones, equipos) que mejor respalden la estrategia de competitividad de la empresa. (Chase, Aquilano, & Robert, 1998) Por lo general los pasos que se siguen son:

1. Utilizar técnicas de proyección para decidir las ventas de cada producto.
2. Calcular los requerimientos de equipo para cumplir con las proyecciones.
3. Proyectar la disponibilidad del equipo en el horizonte de planeación.

Independientemente del horizonte (corto, mediano o largo plazo), las decisiones no son sencillas de tomar dado que los sistemas productivos son muy complejos, debido a la gran cantidad de variables existentes así como las relaciones entre ellas, además en el análisis de las operaciones, un factor que también se debe tomar en cuenta es el enfoque con el que se requiere tomar las decisiones; fijar el enfoque permitirá al responsable o administrador aplicar las herramientas correctas (Knod & Schonberger, 2009).

Figura 10 Los enfoques en la toma de decisiones y ejemplos de herramientas para cada caso



Es por esto que las empresas aplican herramientas, métodos, y/o técnicas, que les permiten lograr una mejor administración de todos los recursos que componen la organización y llevar a cabo una correcta toma de decisiones minimizando la incertidumbre asociada a la toma de decisiones. En este trabajo se muestra el proceso de análisis con enfoque de optimización de la capacidad de un sistema de producción de una empresa dedicada a la fabricación de autopartes. Aplicando conceptos de investigación de operaciones (flujo máximo en una red y su representación como modelo de programación lineal), se analizan la capacidad y las políticas de programación de producción en los equipos a mediano plazo; se realiza también un análisis de distintos escenarios para determinar las necesidades de incremento de la capacidad en el futuro.

10.1 Antecedentes

En el enfoque de optimización se emplean modelos matemáticos para representar el sistema, dichos modelos deben resolverse con algoritmos que aseguran que la solución, en caso de existir, es óptima.

En este trabajo se empleó el concepto de flujo máximo en una red y su representación mediante programación lineal, ambas herramientas se han venido aplicando desde hace varias décadas para toma de decisiones, entre sus bondades están la de ser herramientas robustas y adaptables a una variedad de situaciones, además proporcionan la solución óptima en caso de existir. Si bien en la literatura existe una gran cantidad de trabajos con aplicaciones de programación lineal para analizar la capacidad, se observó que es poco frecuente la aplicación del concepto de flujo máximo en una red para el mismo análisis. El modelo de flujo máximo se ha aplicado en diversos campos: en administración hospitalaria el modelo permite analizar la capacidad de los recursos (camas) ante un incremento de la demanda a largo plazo (Akcali & Lin, 2006).

En el ámbito industrial, se ha aplicado para planificar las operaciones de minas en Canadá, incorporando elementos como la incertidumbre en el contenido de metal o bien los precios en el mercado de los insumos (Asad & Dimitrakopoulos, 2013). Otra área de aplicación es el transporte: programación de trenes (Harrod, 2009) análisis de sistemas carreteros (Yin, Madanat, & Lu, 2009), sistemas carreteros conectados con puentes (Lee, Songa, Gardonib, & Lima, 2011), así como el transporte aéreo (Mitchell, Polishchuk, & Krozel, 2007) son algunos ejemplos. En el campo de la ingeniería civil Liu y Luo (2012) aplican el modelo de flujo máximo en el análisis de flujo a lo largo de rutas de escape y evacuación en una red. El objetivo es proponer rutas de escape y sus intersecciones en la red asegurando una evacuación del personal.

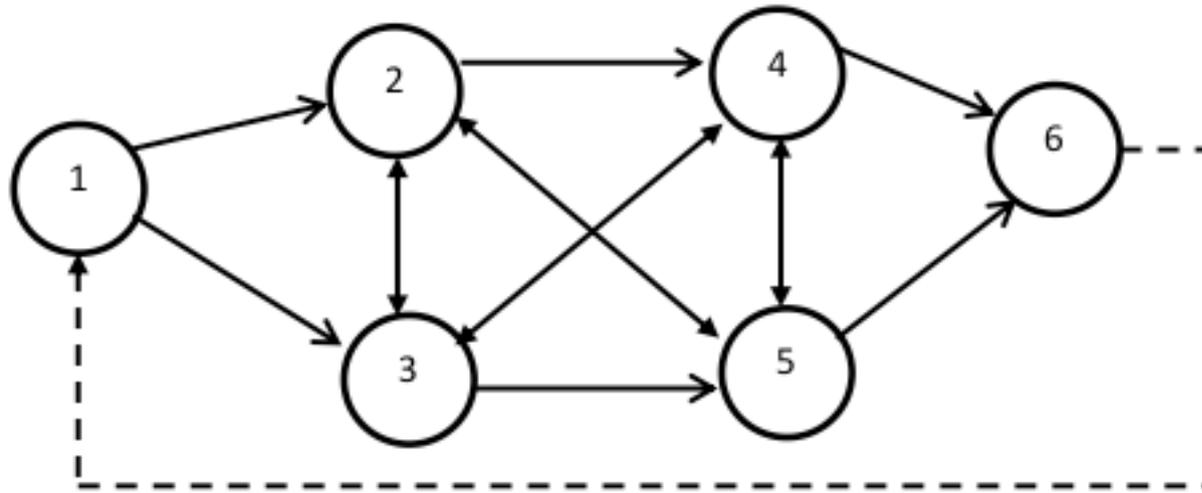
10.2 Los problemas de flujo en una red

Una gráfica es un conjunto de puntos conectados por medio de líneas o flechas llamadas arcos; a través de una gráfica se pueden representar distintas situaciones como el flujo de vehículos por una calle, el flujo de bienes desde un conjunto de almacenes hasta un conjunto de clientes o bien una cadena de suministro. En las gráficas se permite más de un arco para conectar un par de nodos. Los puntos son llamados nodos o vértices, y las líneas que unen los nodos son llamados arcos en la red. (Figura 10.1) (Sierksma & Ghosh, 2010).

Existen varios problemas que pueden representarse mediante una red: a. Flujo en una red, b. Ruta o trayectoria en una red y c. Árbol de expansión mínima.

El flujo de una red puede constar de bienes o productos distintos que circulan por los arcos hacia cada uno de los nodos: gas natural en un gasoducto, distribución de artículos de mayoristas a detallistas o entre fábricas y almacenes. Dos casos importantes de problemas de flujo son: el flujo a costo mínimo en una red, y el problema de flujo máximo en una red (Bazaraa, Jarvis, & Sherali, 1998).

Figura 10.1 Ejemplo de flujo máximo en una red. Se debe enviar la máxima cantidad de alguna entidad desde el nodo 1 (origen o fuente) hasta el nodo 6 (destino o sumidero). El arco ficticio 6-1 (punteado) representa el flujo que puede circular por la red.



El problema de flujo máximo en una red: Este modelo de red se utiliza para analizar la circulación de alguna entidad a lo largo de un sistema e identificar los embotellamientos entre ciertos puntos de partida y destino en una red. En este modelo existe un flujo que viaja desde un único lugar de origen hacia un único lugar destino a través de arcos que conectan nodos intermedios. Cada arco tiene una capacidad que no puede ser excedida. La capacidad no debe ser necesariamente la misma para cada dirección del arco (Figura 10.1).

El problema del flujo máximo plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es la cantidad máxima de una entidad (vehículos, líquido, peatones, llamadas telefónicas) que se puede enviar desde el nodo origen al nodo destino? (Bazaraa, Jarvis, & Sherali, 1998) (Sierksma & Ghosh, 2010). Para dar solución al problema de flujo máximo se requiere convertir la red en una que tenga un solo nodo “fuente” y un solo nodo “sumidero” o destino. Este requerimiento se llena conectando el nodo fuente con el sumidero con un arco ficticio de capacidad infinita, dicho arco representa el flujo en la red (Figura 10.1).

Modelo de programación lineal de una red de flujo máximo: En el problema de flujo máximo se debe determinar el máximo flujo f que se puede enviar desde el nodo fuente s al nodo destino n , teniendo en cuenta las capacidades sobre el flujo de cada arco y que el flujo de entrada a un nodo es igual a su flujo de salida (principio de conservación). El modelo matemático es el siguiente:

Maximizar

$$Z = x_{s-f}$$

Sujeta a:

$$\sum_i x_{ik} - \sum_j x_{kj} = 0; k \in N \quad (10.1)$$

$$x_{ij}^L \leq x_{ij} \leq x_{ij}^U; i, j \in A \quad (10.2)$$

Donde

x_{s-f} : Flujo total

x_{ik} : Flujo de entrada del nodo i al nodo k

x_{kj} : Flujo de salida del nodo k hacia el nodo j .

x_{ij}^U : Capacidad máxima de flujo por el arco.

x_{ij}^L : Capacidad mínima de flujo por el arco.

N : Conjunto de Nodos de la red.

A : Conjunto de arcos de la red.

La ecuación 10 es la función objetivo y debe maximizarse, esta función cuenta con una única variable correspondiente al flujo por el arco ficticio. La ecuación 10.1 es el balance de flujo por cada nodo: la suma de las entradas y salidas por el nodo es cero. Finalmente la desigualdad 10.2 representa la restricción de flujo por cada arco (Sierksma & Ghosh, 2010).

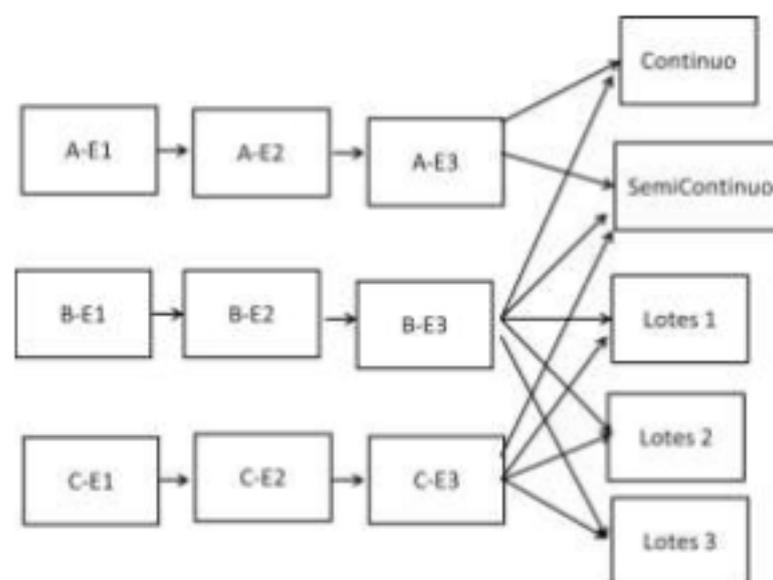
Análisis de la capacidad mediante el enfoque de flujo máximo: caso de estudio en una empresa de auto partes. A continuación se presenta un caso de estudio donde se aplica el modelo de flujo máximo en una red para analizar la capacidad de producción de una empresa de autopartes (Gómez, 2012). La empresa cuenta con 3 tipos de productos los cuales son procesados en estaciones de trabajo, al salir de la 3ª estación los productos se envían al área de tratamiento (figura 10.2).

En esta sección de la empresa se cuenta con 5 tipos de equipos, donde se realiza un tratamiento a las piezas denotadas como A, B y C. Cada pieza se trata a ciertas condiciones de temperatura. Cabe señalar que los responsables del área programan la producción en esta área siguiendo básicamente dos reglas:

1. Los productos A y B tienen preferencia en los equipos continuo y semi-continuo.
2. Los productos B y C tienen preferencia en los equipos por lotes.

Los equipos tienen una capacidad conocida y toman en cuenta paros programados, cambios de modelo y paros no programados.

Figura 10.2 Proceso de producción



La demanda de las piezas fabricadas en la región ha registrado un incremento constante en los últimos años, pero se observó un crecimiento más pronunciado en el período 2009-2012 derivado de la llegada de nuevas empresas automotrices a la zona, las cuales han comenzado a solicitar producto adicional.

Ante tal situación la gerencia responsable requiere un estudio de la capacidad de producción para saber si con las condiciones actuales es viable satisfacer la demanda futura o bien deberá adquirirse un nuevo equipo para incrementar la capacidad existente (Tablas 10 y 10.1).

Tabla 10 Datos de demanda

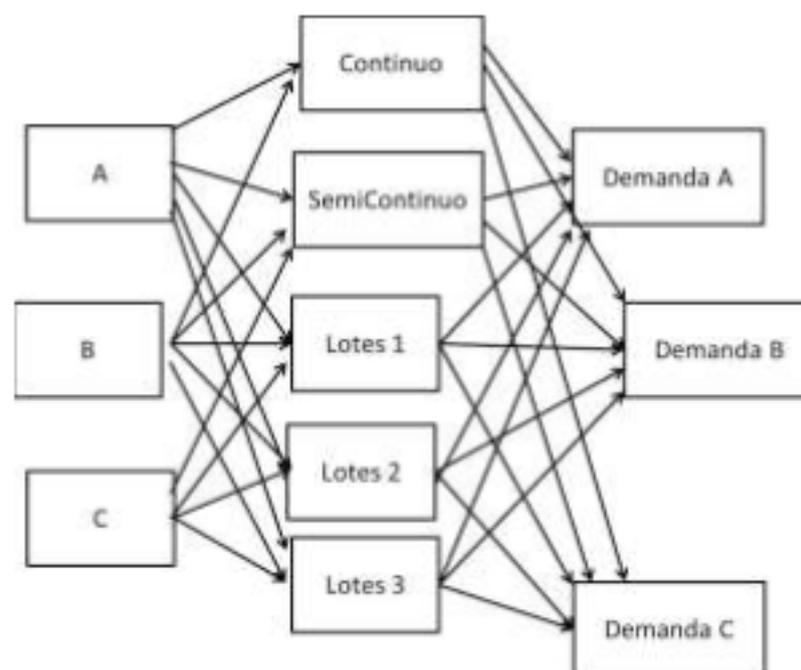
Producto	Demanda actual	Futura
A	528.503	25 % adicional
B	534.929	25 % adicional
C	298.280	25 % adicional

Tabla 10.1 Capacidad de los equipos

Equipo	Capacidad
Continuo	818.242
Semi-continuo	190.162
Lotes (1,2 y 3)	145.555 c/u

Por cuestiones operativas se decide acotar el estudio únicamente a la sección de tratamiento, con la finalidad de responder a las siguientes preguntas (Figura 10.3):

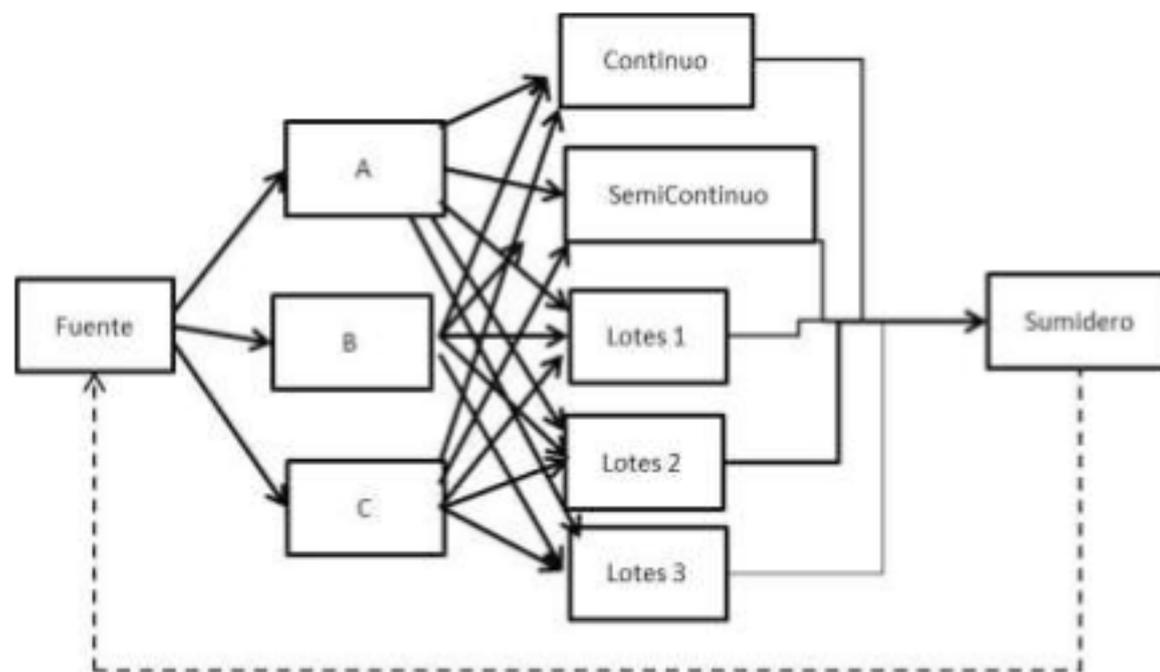
1. Establecer cuál deberá ser la programación óptima de producción para obtener la máxima producción bajo las condiciones actuales de capacidad y demanda.
2. ¿Es suficiente la capacidad actual para satisfacer la demanda futura adicional?
3. ¿Cómo debe utilizarse el equipo semi-continuo?

Figura 10.3 Esquema de la sección analizada.

Construcción del modelo: Dado que se desea obtener como respuesta un plan de producción óptimo que maximice la salida de esta sección de la planta, es necesario utilizar herramientas acordes con el objetivo planteado. En este sentido se adaptó el planteamiento del problema como uno de flujo máximo en una red. En el problema analizado, el conjunto de nodos representan los productos A, B y C, los equipos de tratamiento y finalmente los clientes (Figura 10.3).

Los arcos muestran el flujo de cada producto hacia alguno de los equipos, respetando las políticas de producción, por ejemplo, el arco A-HC indica que el producto A se puede programar en el equipo continuo (Figura 4). De igual forma se interpretan el resto de los arcos en la red. La red que representa el sistema se completa agregando dos nodos ficticios: un nodo fuente que engloba las líneas de producción, un nodo sumidero que engloba a los clientes, y un arco ficticio que conecta el nodo sumidero al nodo fuente, la red se muestra en la figura 10.4.

Figura 10.4 Red de flujo máximo en la sección de tratamiento con arco ficticio



Modelo de programación lineal: El siguiente paso es construir el modelo de programación lineal de este problema de flujo máximo. En este caso se desea conocer la mejor forma de distribuir la producción en los equipos, sujetos a las restricciones de capacidad y a los requerimientos de demanda la cual tiene una base mensual.

Maximizar

$$Z = x_{s-f}$$

(10.3)

Sujeta a:

$$\begin{aligned}
 x_{f-A} - [x_{A-EC} + x_{A-ESC} + x_{A-EL1} + x_{A-EL2} + x_{A-EL3}] &= 0 \\
 x_{f-B} - [x_{B-EC} + x_{B-ESC} + x_{B-EL1} + x_{B-EL2} + x_{B-EL3}] &= 0 \\
 x_{f-C} - [x_{C-EC} + x_{C-ESC} + x_{C-EL1} + x_{C-EL2} + x_{C-EL3}] &= 0 \\
 x_{A-EC} + x_{B-EC} + x_{C-EC} - x_{EC-S} &= 0 \\
 x_{A-ESC} + x_{B-ESC} + x_{C-ESC} - x_{ESC-S} &= 0 \\
 x_{A-EL1} + x_{B-EL1} + x_{C-EL1} - x_{EL1-S} &= 0 \\
 x_{A-EL2} + x_{B-EL2} + x_{C-EL2} - x_{EL2-S} &= 0 \\
 x_{A-EL3} + x_{B-EL3} + x_{C-EL3} - x_{EL3-S} &= 0 \\
 x_{EC-S} + x_{ESC-S} + x_{EL1-S} + x_{EL2-S} + x_{EL3-S} - x_{f-s} &= 0 \quad x_{f-s} - [x_{s-A} + x_{s-B} + x_{s-C}] = 0
 \end{aligned}
 \tag{10.4}$$

$$\begin{aligned}
 x_{f-A} &\leq 528.503 \\
 x_{f-B} &\leq 534.929 \\
 x_{f-C} &\leq 298.280
 \end{aligned}
 \tag{10.5}$$

$$\begin{aligned}
 x_{A-EC} &\leq 528.503 \\
 x_{A-ESC} &\leq 528.503 \\
 x_{A-EL1} &\leq 528.503 \\
 x_{A-EL2} &\leq 528.503 \\
 x_{A-EL3} &\leq 528.503
 \end{aligned}
 \tag{10.6}$$

$$\begin{aligned}
 x_{B-EC} &\leq 534.929 \\
 x_{B-ESC} &\leq 534.929 \\
 x_{B-EL1} &\leq 534.929 \\
 x_{B-EL2} &\leq 534.929 \\
 x_{B-EL3} &\leq 534.929
 \end{aligned}
 \tag{10.7}$$

$$\begin{aligned}
 x_{C-EC} &\leq 298.280 \\
 x_{C-ESC} &\leq 298.280 \\
 x_{C-EL1} &\leq 298.280 \\
 x_{C-EL2} &\leq 298.280 \\
 x_{C-EL3} &\leq 298.280
 \end{aligned}
 \tag{10.8}$$

$$\begin{aligned}
 x_{EC-S} &\leq 818.242 \\
 x_{ESC-S} &\leq 190.162 \\
 x_{EL1-S} &\leq 145.555 \\
 x_{L2-S} &\leq 145.555 \\
 x_{EL3-S} &\leq 145.555
 \end{aligned}
 \tag{10.9}$$

Con el modelo se desea maximizar la salida de la sección de tratamiento, y que está representada por la ecuación 4, la cual como ya se comentó anteriormente representa el flujo por la red.

Las ecuaciones 5a-5i representan el balance de los flujos que entran y salen por los nodos correspondientes a los productos A, B, C y los nodos correspondientes a los equipos así como el nodo fuente y el nodo sumidero.

Las desigualdades 6a – 6c representan el flujo proveniente de las líneas de producción y la capacidad de cada arco es la demanda.

El conjunto de desigualdades 7, 8 y 9 restringen la cantidad de producto que puede enviarse a cada uno de los equipos, cabe señalar que este conjunto de restricciones representa el conjunto de políticas que emplea la empresa para programar la producción, en otras palabras, en qué equipos deben programarse cada uno de los productos. En el caso de la red construida la política de producción permite programar una cantidad que deberá ser igual o menor a la demanda total del producto.

El conjunto de desigualdades 10a - 10e son las restricciones de capacidad de producción de los equipos continuo, semi-continuo y por lotes respectivamente. En otras palabras, el flujo máximo a la salida de cada equipo deberá ser igual o menor a su capacidad.

10.3 Resultados

El modelo se resolvió empleando el programa LINGO. Dicho paquete resuelve modelos de programación matemática mediante algoritmos especializados, en este caso por tratarse de un modelo de programación lineal, utiliza el método simplex.

Tabla 10.2 Distribución bruta de la producción

PRODUCTO	EQUIPO					TOTAL
	CONTINUO	SEMI CONTINUO	LOTES 1	LOTES 2	LOTES 3	
A	175195		62198	145555	145555	528503
B	534929					534929
C	108118	190162				298280
Capacidad del equipo	818242	190162	145555	145555	145555	1445069
Producción	818242	190162	61732	145555	145555	1361246
Disponibles	0	0	83357	0	0	83357

La tabla 10.2 muestra los resultados y se describe a continuación: la primera columna es el producto, las columnas 2-6 corresponden a los equipos, la columna 7 da el total por producto. Los renglones 4, 5 y 6 son los datos de capacidad para el programa de producción propuesto.

Actualmente la estrategia de la planta es dedicar el equipo continuo a los productos A y B, sin embargo se observa que bajo las condiciones dadas, en la programación óptima de la producción se debe procurar que el equipo continuo fabrique los productos A, B y C (Figura 10.5, Tablas 10.2 y 10.3).

Cabe señalar que el producto B se deberá fabricar totalmente en el equipo continuo. Se puede observar también que es recomendable distribuir el producto A entre el equipo continuo (33.18%), y el sistema por lotes (66.82%), de igual forma el producto C debe fabricarse en los equipos continuo(26.25%) y semi-continuo (63.75%)(Tabla 10.3).

Figura 10.5 Políticas de producción a implementar. Producto A en los sistemas continuo y por lotes, producto B en sistema continuo, producto C en el sistema continuo y por lotes

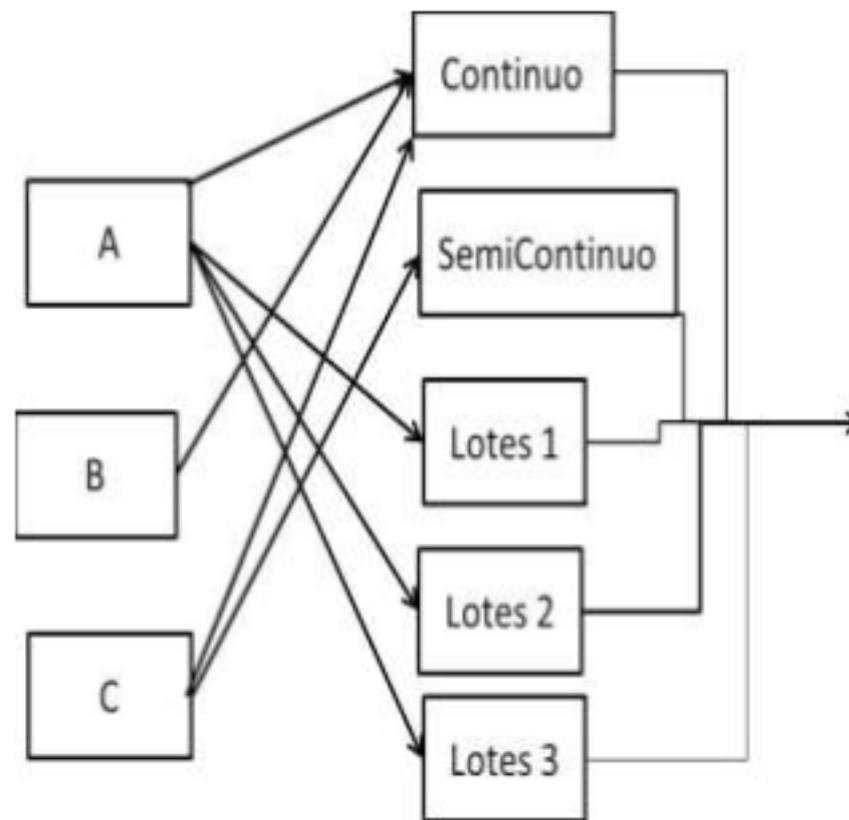


Tabla 10.3 Distribución bruta de la producción en %

PRODUCTO	EQUIPO				
	CONTINUO	SEMI CONTINUO	LOTES 1	LOTES 2	LOTES 3
A	33.18%		11.77%	27.57%	27.57%
B	100.00%				
C	36.25%	63.75%			
Utilizado	100.00%	100.00%	42.73%	100.00%	100.00%

Bajo las condiciones actuales se utiliza el 94.23% de esta sección de la planta. El resultado muestra que una programación óptima permite una ganancia en capacidad de 5.77% del total original (Tabla 10.3). Los equipos por lotes se operan a un 19.03% de su capacidad total.

Tabla 10.4 Nuevo equipo continuo. Volumen a fabricar por producto

PRODUCTO	EQUIPO					TOTAL
	CONTINUO	SEMI CONTINUO	LOTES 1	LOTES 2	LOTES 3	
A	594972	65656				660628
B	668661					668661
C	372850					372850
Capacidad del equipo	1636484	380324	145555	145555	145555	2453473
Producción	1636483	55656				1692139
Sobrante	0	324668	145555	145555	145555	761334

Incremento de la demanda: Se estima que la demanda de cada producto crecerá alrededor de un 25% para el siguiente año, por lo que se está evaluando la posibilidad de adquirir un nuevo equipo continuo y además de determinar cuál es la mejor distribución de la producción. Del resultado se desprenderán las políticas de planeación de la producción a emplear para cada caso.

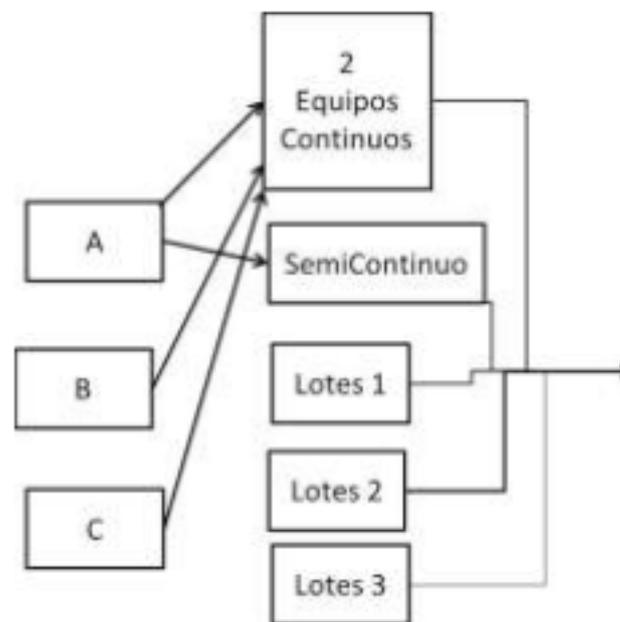
Tabla 10.5 Nuevo equipo continuo. Distribución de la producción en %

PRODUCTO	EQUIPO				
	CONTINUO	SEMI CONTINUO	LOTES 1	LOTES 2	LOTES 3
A	90.06%	9.94%			
B	100%				
C	100%				
Utilizado	100%	17.26%	0%	0%	0%

En un escenario de operación con un equipo continuo adicional la capacidad total del sistema se incrementa en un 69.78% (Tablas 5 y 6). Ahora bien, si se desea operar de manera óptima entonces la solución del modelo con esta nueva condición muestra que la producción del producto A debe programarse en el equipo continuo (90.06%) y el semi-continuo (9.94%). Los productos B y C deben programarse en su totalidad en el equipo continuo. Es de hacer notar que en un plan de producción óptimo los equipos continuos se utilizarían al 100% de la capacidad total conjunta y el semicontinuo al 17.26% de su capacidad.

Para efectos prácticos, en la solución se observa que los equipos por lotes pueden considerarse como un sistema auxiliar que apoya la producción del continuo y del semi-continuo y que pueden, en su caso, absorber incrementos de demanda como pudiera ser un pedido urgente no considerado en el plan original (Figura 10.6).

Figura 10.6 Políticas de producción con dos equipos continuos



10.4 Conclusiones

En este trabajo se muestra la aplicación del enfoque de flujo máximo para analizar la capacidad de producción de una planta de autopartes tomando como base la idea de optimizar el uso de los equipos, y de maximizar el flujo a la salida.

En este caso el resultado indica que bajo las condiciones actuales la sección analizada de la planta tiene capacidad para cumplir con la demanda del cliente, además la capacidad que se gana al aplicar el enfoque de optimización es de 83.357 piezas, en otras palabras, al realizar una programación óptima permite ganar un 5.77% de capacidad. En el análisis del escenario con mayor capacidad adicionando un nuevo equipo, se observa que en la programación óptima de la producción se utilizan de manera intensiva los equipos continuos y semi-continuo y se mantienen los equipos por lotes como un sistema auxiliar o de complemento contra períodos de demanda alta. El modelo se puede ampliar y tomar en cuenta nuevas políticas de producción, incorporar restricciones de cambios de programas o bien el manejo de lotes.

Si bien es muy ventajoso emplear el enfoque de optimización en el análisis de recursos, al final los responsables de la administración de las empresas son los que deben fijar los objetivos a perseguir y encuadrarlos en el enfoque adecuado (operar de manera óptima o bien realizar únicamente mejoras) esto determinará la selección

10.5 Agradecimientos

Agradecemos al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) el apoyo al cuerpo académico "Diseño, investigación y administración de las operaciones de manufactura" (ITCEL-CA-13).

10.6 Referencias

Akcali, E., & Lin, C. (2006). "A network flow approach to optimizing hospital bed capacity decisions". *Health Care Management Science*, Vol. 9(No. 4), 391-404.

Asad, M., & Dimitrakopoulos, R. (2013). "Implementing a parametric maximum flow algorithm for optimal pit mine design under uncertain supply and demand". *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 64(No. 4), 185-197.

Bazaraa, M., Jarvis, J., & Sherali, H. (1998). *Programación lineal y flujo en redes* (Segunda ed.). México: Limusa.

Chase, R., Aquilano, N., & Robert, J. (1998). *Administración de producción y operaciones* (Octava ed.). México: McGraw-Hill.

Gómez, A. R. (2012). "Propuesta y desarrollo de una herramienta matemática para programación de la producción en una empresa de autopartes". Celaya: Congreso de Investigación AcademiaJournals.com, 14-16 de Noviembre, pp 73-79.

Harrod, S. (2009). "Capacity factors of a mixed speed railway network". *Transportation Research part E*, Vol. 45(No. 5), 830-841.

Knod, E., & Schonberger, R. (2009). *Operations management. Meeting customers demand*. New York: McGraw-Hill.

Lee, Y., Songa, J., Gardonib, P., & Lima, H. (2011). "Post-hazard flow capacity of bridge transportation network considering deterioration of bridges". *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-cycle Design and Performance*, Vol. 7(No. 7-8), 509-521.

Liu, Y., & Luo, Z. (2012). "A Bi-level model for planning signalized un interrupted flow intersections in a evacuation network computer-aided". *Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 27(No. 10), 731-747.

Mitchell, J., Polishchuk, V., & Krozel, J. (2007). "Capacity estimation for airspaces with convective weather constraints.". South Carolina: AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit proceedings of the international conference in South Carolina, 2007.

Sierksma, G., & Ghosh, D. (2010). *Networks in action*. Berlin: Springer.

Yin, Y., Madanat, S., & Lu, X.-Y. (2009). Robust improvement schemes for road networks under demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, Vol. 198(No. 2), 470-479.

