

COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DE PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN UTILIZANDO SIMULACIÓN

Berardi, María Betina⁽¹⁾, Tabone, Luciana Belén⁽²⁾, Zárate, Claudia⁽³⁾

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

Juan B Justo 4302, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

(1) bberardi@fi.mdp.edu.ar (2) ltabone@fi.mdp.edu.ar

(3) cnzarate@fi.mdp.edu.ar

RESUMEN.

Este trabajo se realiza sobre una empresa de la zona dedicada la comercialización de productos metalúrgicos. El objetivo del mismo fue el de observar ventajas y desventajas de aplicar dos modelos distintos de programación de las operaciones. El primer modelo representa la programación de las operaciones siguiendo un sistema de manufactura tradicional cuyo objetivo es el de obtener el máximo aprovechamiento de los recursos, también denominado, máximo local. El otro modelo de programación de la producción utilizado es el modelo DBR, derivado de la aplicación de la Teoría de las Restricciones, cuya visión holística permite arribar a dos resultados diferentes. Se simuló el proceso de fabricación para 160 horas utilizando el software Promodel®. Los resultados de la simulación fueron concluyentes. Se analizaron los parámetros que se consideran más relevantes y que inciden directamente en los costos de producción: la carga de trabajo en los distintos centros de trabajo, el tamaño de los inventarios en procesos y las unidades de salida generadas. Se observó una significativa disminución del tamaño de los almacenes intermedios y de las cargas de trabajo en los distintos centros y un flujo mucho más sincronizado para el caso del modelo DBR. Esto implica un importante aumento de la productividad de los recursos utilizados y su natural efecto sobre los costos unitarios. Estos resultados brindan un apoyo inestimable al logro de las ventajas competitivas de la organización. Se demuestra que la mirada sistémica que subyace en el enfoque de la Teoría de las Restricciones es sumamente apropiada y tiene repercusiones importantes en el sistema de administración de las operaciones.

Palabras Claves: programación de la producción, DBR, simulación, PROMODEL

ABSTRACT

This work is done on a company dedicated marketing area of metallurgical products. The objective was to observe the advantages and disadvantages of two different models of programming operations. The first model represents programming operations following a traditional manufacturing system whose objective is to obtain the maximum utilization of resources, also called, local maximum. The other model of production programming DBR model used is derived from the application of the Theory of Constraints, whose holistic approach allows us to reach two different results. The manufacturing process was simulated for 5000 hours using the software Promodel. The simulation results were conclusive. Were analyzed the parameters that are considered most relevant and which directly affect production costs: the workload in different workplaces, the size of inventories in processes and output units generated,. A significant decrease in the size of the intermediate stores and workloads in different centers and a much more synchronized flow model for the case DBR was observed. This implies a significant increase in the productivity of resources used and their natural effect on unit costs. These results provide invaluable support to achieve the competitive advantages of the organization. It is shown that the systemic approach underlying the approach of the Theory of Constraints is most appropriate and has a major impact on system operations management.

Keywords: production programming, DBR, simulation, Promodel®

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realiza en el marco de un proyecto que incluye la aplicación de técnicas tendientes a la mejora de los indicadores en PyME de la región de Mar del Plata. En este caso se analiza la gestión de la producción que se hace en una empresa comercializadora de productos metalúrgicos de la zona, comprendida dentro de la clasificación de PyME.

La empresa adquiere de sus proveedores materiales, los almacena y luego los distribuye a empresas de una zona de considerable extensión que incluye a Mar del Plata, Bahía Blanca y Puerto Madryn y todas las regiones aledañas a las mismas. Manipula alrededor de 40 tipos de productos, entre los que se cuentan chapas de diversos tipos y tamaños, caños, y artículos derivados de la industria metalúrgica que se utilizan en la industria de la construcción, pesquera y otras industrias de la zona. Posee alrededor de 20 personas entre operarios de planta y administrativos y un depósito de aproximadamente de 1300 metros cuadrados los cuales están destinados -prácticamente en su totalidad- a las actividades almacenamiento de los productos.

Los procesos que se desarrollan en la misma, involucran la recepción y almacenamiento de los materiales que ingresan al depósito, provenientes del mercado de los proveedores; el armado del pedido y el despacho hacia el mercado de los clientes.

Por tratarse de una pequeña empresa de carácter familiar las herramientas de gestión que utiliza, propias de este tipo de empresa, si bien suelen dar buenos resultados en el corto plazo, adolecen respecto de su alta dependencia de las personas que las aplican.

Es en este sentido, que se intenta implementar diversas técnicas relacionadas a la gestión de la organización, a fin de dar un respaldo consistente a las decisiones que se tomen.

En este caso se busca mejorar la productividad del sistema de fabricación, considerando dos modelos de gestión de flujos de producción: por un lado aplicando el sistema tradicional de asignación de cargas a los centros de trabajo y por el otro, utilizando el sistema DBR propuesto por la Teoría de las Restricciones. Se utilizará simulación a efectos de poder cuantificar las diferencias.

Como antecedente de este trabajo se puede citar a Ortiz et al (2008) [1], que aplica ambos modelos de gestión de flujos en una celda de manufactura en U para un único producto. A partir de simular el flujo de la producción según sendos modelos puede determinar indicadores que le permiten la toma de decisión relacionado con el mejor modelo de gestión. Como resultado obtiene que, para un flujo lineal como el que analiza, con una característica de baja incertidumbre en el pronóstico, el modelo DBR resulta ser mucho más adecuado.

1.1 Principales características del sistema de producción de la empresa

Como ya se mencionó, la empresa trabaja con un número importante de productos. En consecuencia y para facilitar el análisis se ha realizado un estudio de Pareto a los mismos, identificándose a chapa, ángulo y brida como los más importantes.

A modo de caracterizar las instalaciones del almacén y su relación con los materiales, se puede mencionar que:

- Las chapas (1,2 m x 6 m) se almacenan en estanterías tipo rack.
- Los ángulos (3cm x 3cm x 6,1m) se almacenan en estanterías cantiléver de brazo horizontal.
- Las bridas se almacenan en cajas de madera contrachapadas.

A modo de caracterizar el transporte de los materiales, se puede mencionar que:

- Los productos llegan en camión
- Para la descarga de los productos se utiliza un puente grúa de 20 toneladas.
- Dentro del almacén los productos son trasladados por medio de dos autoelevadores.
- Para el despacho, los productos son cargados en un camión propiedad de la empresa.

1.2 Relevamiento de los procesos.

Las operaciones que se realizan en la empresa involucran la descarga, el empaque y estacionamiento y el despacho de los lotes de pedido.

En la figura 1 se pueden observar las etapas que cumplen las operaciones:

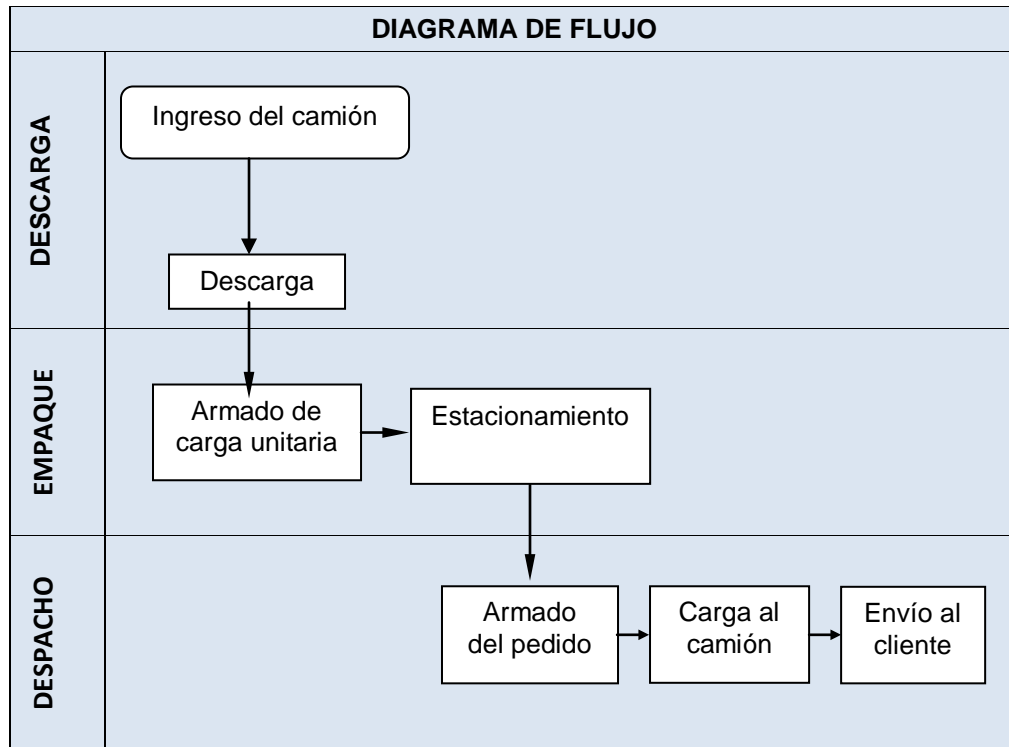


Figura 1: Operaciones

Se puede observar a través del diagrama de flujo que se trata de un proceso sencillo, lineal y que las actividades que se realizan básicamente son las de transporte y almacenamiento.

1.3 Determinación de los tiempos de procesos

Se resumen en la Tabla 1 los tiempos unitarios para cada operación según sea el producto.

Tabla 1: *Tiempo de proceso por producto*

PRODUCTO	DESCARGA	EMPAQUE	DESPACHO	Tamaño de lote
CHAPA	1,67 min/u	5,00 min/u	2,00min/u	6 u
ANGULO	0,75 min/u	1,00 min/u	0,35 min/u	20 u
BRIDA	0,42 min/u	1,15 min/u	0,126 min/u	39 u

Los datos que se presentan en la tabla han sido suministrados por la empresa. Cabe destacar que corresponden al promedio de una distribución normal con una desviación del 10% de valor medio.

1.4 Determinación de la mezcla óptima de producción

A partir de los valores previstos de demanda en el corto plazo y del cálculo de los costos unitarios de los productos, es posible la obtención de la mezcla de productos que maximice la rentabilidad del período.

Sea:

- X1, X2 y X3 los productos chapa, ángulo y brida respectivamente
- Margen bruto X1: 120\$/u
- Margen Bruto X2: 26\$/u
- Margen bruto X3: 21\$/u

Entonces, es posible calcular la rentabilidad del período, entendida como la función a maximizar, formulándose de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Z = 120 X_1 + 26 X_2 + 21 X_3 \quad (1)$$

Z debe maximizarse sujeta a las restricciones de acuerdo a Tabla 2:

Tabla 2: Programación Lineal Salida de WinQSB

Variable -->	X1	X2	X3	Direction	R. H. S.
Maximize	120	26	21		
C1	0.0278	0.0125	0.0069	<=	160
C2	0.0833	0.0166	0.0191	<=	160
C3	0.0333	0.0058	0.0021	<=	160
C4	1			<=	1320
C5		1		<=	2500
C6			1	<=	3120
LowerBound	0	0	0		
UpperBound	M	M	M		
VariableType	Continuous	Continuous	Continuous		

Donde C1, C2 y C3 son las restricciones que representan las características de capacidad de los 3 centros de producción (descarga, empaque y despacho respectivamente). El valor de la derecha de las ecuaciones indica el valor máximo que puede tomar dicha restricción, en este caso los tres centros de producción trabajan 160 horas por período. Esto es el resultado del trabajo de 20 días, 8 horas por día.

Las restricciones C4, C5 y C6 corresponden a los valores de demanda máxima pronosticada durante el período, para los X1, X2 y X3 respectivamente.

El sistema de programación lineal se procesa en el software WinQSB, obteniéndose así la mezcla de productos que optimiza la rentabilidad. La misma se presenta en Tabla 3

Tabla 3: Mezcla óptima de productos. WinQSB.

	14:51:34		Wednesday	September	28	2016		
	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	X1	1.320,0000	120,0000	158.400,0000	0	basic	91,5864	M
2	X2	2.500,0000	26,0000	65.000,0000	0	basic	18,2513	M
3	X3	447,3298	21,0000	9.393,9250	0	basic	0	27,5150
	Objective	Function	(Max.) =	232.793,9000				
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	C1	71,0326	<=	160,0000	88,9674	0	71,0326	M
2	C2	160,0000	<=	160,0000	0	1.099,4760	151,4560	211,0480
3	C3	59,3954	<=	160,0000	100,6046	0	59,3954	M
4	C4	1.320,0000	<=	1.320,0000	0	28,4136	707,1789	1.422,5690
5	C5	2.500,0000	<=	2.500,0000	0	7,7487	0	3.014,6990
6	C6	447,3298	<=	3.120,0000	2.672,6700	0	447,3298	M

A partir de los valores de la Tabla 3 se puede observar que:

- La mezcla óptima es 1320 u de X1, 2500 u de X2 y 447 u de X3.
- La rentabilidad obtenida es de \$232.793,9
- El centro C2 es el que primero agota sus horas de producción, lo que significa que restringe la producción
- Quedan 2673 unidades de X3 sin vender que, aunque se demandan, no es posible fabricarlas.

A partir de la mezcla óptima de producción, el objetivo del presente trabajo es asignar la carga a los centro de producción a efectos de poder decidir la mejor manera de efectuar dicha tarea. Para ello se compararán los resultados de aplicar dos modelos de gestión de flujos de producción: el sistema tradicional y el sistema DBR. Los parámetros que se considerarán para la toma de la decisión serán el inventario promedio, la producción obtenida y el tiempo de ciclo.

2. MARCO TEÓRICO

En la gestión de las organizaciones actuales, la gestión eficiente y eficaz del gerente de operaciones es decisiva a la hora de posicionar a la empresa frente a la competencia.

El diseño de los sistemas productivos para cumplir con una estrategia de operaciones centrada en el cliente refleja el claro entendimiento de los objetivos a largo plazo de la organización. De acuerdo a Krajewsky et al, 2008 [2], una empresa logra una ventaja gracias a su sistema de operaciones si consigue superar el rendimiento de sus competidores en una o varias de las siguientes prioridades competitivas:

- costo
- tiempo de entrega
- entrega a tiempo
- calidad
- flexibilidad

A efectos de lograr el mejor desempeño en dichas prioridades competitivas la tarea de planificación del gerente de producción toma una relevancia fundamental.

Las planificaciones en el largo y mediano plazo, generan planes de producción y de requerimientos de materiales que deberán contemplar ya sea los requisitos de la demanda en tiempo y cantidad, como así también la capacidad del sistema de producción. El plan de producción o Plan Maestro determina la cantidad de unidades que el sector deberá producir para hacer frente a la demanda con los recursos que cuenta, optimizándose a través de una buena gestión de los flujos de la producción. En consecuencia, deberán asignarse las cargas necesarias para cumplir con dicho plan de forma tal que los costos sean los mínimos posibles y se cumpla con los tiempos de entrega pactados.

2.1. El sistema tradicional de la gestión de los flujos de la producción

La gestión de los flujos productivos se ha desarrollado tradicionalmente siguiendo dos reglas fundamentales [3].

- i. obtener la máxima eficiencia en cada uno de los centros de trabajo, evitando los tiempos ociosos y de esta forma minimizar los costos unitarios, y
- ii. el equilibrio entre las capacidades de los centros de producción y la demanda

Si bien ambos preceptos han generado resultados favorables en ciertos entornos de estabilidad, el hecho de que las organizaciones de hoy se vean inmersas en entornos inciertos y muy competitivos hace que deban revisar sus estrategias para adaptarse al cambio.

La aplicación de estos conceptos en este contexto podría atender al cumplimiento de sus prioridades competitivas, ocasionando consecuencias tales como el aumento en los niveles de inventarios – y su correspondiente aumento en costos- y del ciclo de tiempo o tiempo de fabricación.

Considerar la primera regla citada -obtener la máxima eficiencia en cada uno de los centros de trabajo- implica que el gerente deberá asignar las cargas teniendo en cuenta que debe evitar tiempos ociosos. Esto es, el centro nunca debe estar sin producir. De esta forma el costo de fabricación, en particular los costos fijos, se distribuirán en mayor número de unidades. Naturalmente y en la medida que el centro produzca un mayor número de unidades traerá como resultado la disminución de los costos unitarios. Este enfoque de obtener la máxima productividad en cada uno de los centros es de alcance local e incluye métodos para reducir, por separado, el costo de cada proceso y producto.

No obstante, y considerando las nuevas tendencias, la visión de la producción siguiendo el enfoque sistémico señala que si todas las partes del sistema se desempeñan de manera óptima, es probable que el sistema como un todo no lo haga. En consecuencia, al tratar de alcanzar estos valores óptimos locales se obtiene un sistema muy alejado del óptimo global.

Por otro lado, y considerando ahora la segunda regla citada, el equilibrio perfecto entre las partes del sistema es difícil de conseguir y aún en presencia del mismo, las características propias del comportamiento del sistema productivo, provocarán inevitablemente algún grado de inestabilidad.

Toda línea de producción se ve afectada por la conjunción de dos hechos: la existencia de flujos dependientes y las fluctuaciones estadísticas. Los primeros vienen determinados por la propia secuencia de operaciones que obligatoriamente tiene que seguir el producto en su elaboración, en un orden que no admite variación. Las fluctuaciones estadísticas provienen de que no existe ningún recurso cuya capacidad pueda considerarse determinística. La denominada capacidad de un recurso, responde a un valor promedio que proviene de una distribución normal que, en función de la fiabilidad del proceso, tendrá mayor o menor desviación. Esto significa que dependiendo de la variación asociada al valor promedio de la capacidad del recurso, incluso el recurso puede llegar a tener una producción de valor cero.

Una posible solución, es la de desacoplar la dependencia de los sucesos mediante la existencia de inventarios intermedios. De esta forma cada recurso se alimenta de un inventario y no de la producción del recurso inmediato anterior.[4]

En resumen, esta gestión de los flujos de la producción se basa en la suposición de que todas las máquinas o centros de trabajo deberían tener una capacidad balanceada, y que si no la tienen, es posible lograrla a través de generación de inventarios. Como también se persigue el objetivo de la máxima eficiencia de cada una de las máquinas, se busca que ninguno de sus recursos tenga tiempo ocioso. La práctica común al aplicar este sistema consiste en liberar la materia prima a la velocidad de procesamiento de la primera máquina, ya que se pretende obtener la mayor eficiencia posible de cada centro de trabajo. Cabe destacar que, bajo esta consigna sólo se obtiene la máxima eficiencia si:

$$C_1 > C_2 > \dots C_n.$$

Siendo C_i es la capacidad de cada uno de los "i" centros de trabajo.

En este breve análisis es posible observar que las reglas que rigen el modelo tradicional, no estarían exentas de efectos negativos, dado que podrían generar un aumento en el nivel de los inventarios y los tiempos totales de fabricación se dilatarían.

2.2. El sistema Tambor-Amortiguador-Cuerda (DBR) de la Teoría de las Restricciones

Hace aproximadamente 30 años, surgió una nueva forma de administrar operaciones, proporcionada por Eliyahu M. Goldratt en su libro *The Goal* (1994) [5]. En el mismo enuncia la Teoría de las Restricciones que ha obligado a los gerentes a repensar la planificación de los flujos de la producción.

El autor hace hincapié en que la única meta de la organización es la de ganar dinero. De esta forma, si por ejemplo se aumenta el rendimiento individual de un centro de trabajo para conseguir un incremento de la producción que no es vendible en estos momentos, esto no es "productivo" para la empresa, al contrario de lo que tradicionalmente se pensaría.

El concepto fundamental en el que descansa la Teoría de las Restricciones es que toda planificación hacia la generación de un producto se verá restringida por el recurso de menor capacidad, denominada operación limitante o cuello de botella, que es la que determina la cantidad de producción del proceso, sin importar la capacidad de los procesos restantes.

Algunos de los lineamientos fundamentales para entender los principios de la Teoría de las Restricciones podrían resumirse en los siguientes puntos [2]

- El desempeño óptimo de un sistema NO equivale a la suma de los óptimos locales, tema abordado previamente en el análisis del sistema de gestión de flujos tradicionales;
- los sistemas son como cadenas, y todos poseen un "eslabón más débil";
- las restricciones del sistema pueden ser restricciones físicas o restricciones políticas;
- la atención debe centrarse más en equilibrar el flujo de producción que en equilibrar la capacidad productiva de la planta;
- una hora perdida en una operación limitante es una hora perdida para el rendimiento del proceso completo;
- una hora perdida en una operación "no limitante" sólo representará exceso de capacidad, pero no afectará el rendimiento del proceso general.

Para que la capacidad de un sistema productivo sea conocida y gestionable, ésta debe coincidir con la del recurso de menor capacidad –la limitación del sistema- y debe existir un margen de capacidad para el resto de recursos.

La solución genérica de TOC para escenarios productivos operativiza estos aspectos a partir de un sistema y método de gestión denominado DBR (por sus siglas en inglés: *Drum-Buffer-Rope*); tambor - amortiguador - cuerda, siendo:

- el tambor aquella máquina del sistema de producción que tiene la capacidad de producción más lenta, conocido también como cuello de botella;
- el amortiguador, el inventario representativo del tiempo de respuesta de las operaciones anteriores al cuello de botella, que asegura que éste siempre tenga material para trabajar.
- la cuerda, el sistema o plan que se encarga de comunicar al cuello de botella con los recursos restantes, programando su carga de trabajo a la velocidad de trabajo de este cuello de botella.

Atento a este criterio, el gerente asignará la carga a aquel centro de trabajo cuya capacidad sea la que restringe la salida del sistema.

2.3. Simulación

La complejidad de las operaciones en organizaciones industriales y de servicios requiere de una modelización cada vez más apegada a la realidad y que permita un análisis detallado y profundo. La simulación es una herramienta que permite evaluar diversos escenarios, considerando múltiples variables de decisión y visualizar su comportamiento a través del tiempo. [6].

El concepto de simulación consiste en reproducir en un ordenador el comportamiento que tiene un sistema en la vida real, con la finalidad de estudiar y analizar situaciones en las que un análisis en la situación real sería poco deseable, ya sea por motivos económicos o incluso porque el sistema real no existe y lo que se quiere comprobar es cómo funcionaría. Para ello se construye un modelo sobre el cual se estudian los comportamientos y respuestas del sistema a eventos que ocurren en momentos puntuales en el desarrollo del mismo.

La simulación por eventos discretos es el tipo de simulación en la que se generan y administran eventos en el tiempo por medio de una serie de eventos ordenados según el tiempo de simulación en que deben ocurrir. Esta modalidad se usa típicamente en el diseño de la mayoría de eslabones de la cadena de suministro tales como: líneas de producción, plantas de procesamiento, almacén de materia prima, inventario de producto terminado, puntos de atención a clientes, entre otros.

Los primeros intentos para simular sistemas de eventos discretos, datan de la década de los años 60, donde se desarrollan las primeras simulaciones en ordenador para planear proyectos de gran envergadura, aunque a un costo muy alto. En la década de los 90, la difusión de los ordenadores personales, y la aparición de paquetes de simulación que se programan en ambientes gráficos, y con capacidades de animación, permite que la simulación se difunda ampliamente como herramienta para el diseño y análisis. Hoy en día los programas de simulación son muy utilizados en la industria para planificar ya que son programas muy gráficos cuyo entendimiento de manejo es muy sencillo y de bajo costo.

El software Promodel® es una herramienta que permite la simulación de los procesos productivos. Cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto a las decisiones a tomar.

Para construir el modelo se deben definir los siguientes componentes:

- Las entidades, que son las piezas o personas que son procesadas.
- Los arribos, que determinan la frecuencia de llegada de las entidades al sistema.
- Las localizaciones, que representan lugares físicos donde las entidades son procesadas o esperan su turno para ser procesadas.
- Los procesos, que permiten definir la lógica de simulación, es decir, las operaciones que se realizan sobre la entidad y que toman lugar en una localización.
- Los recursos, que son mecanismos que requieren las entidades para completar una operación y pueden ser estáticos o dinámicos. Los estáticos llevan a cabo una tarea dentro de una localización y no poseen ruta de movimiento. Los dinámicos permiten transportar entidades entre localizaciones y se mueven a través de una red de rutas.
- Las rutas de movimiento, que son las rutas de transporte por las que se mueven los recursos dinámicos.

3. METODOLOGÍA

Considerando los dos enfoques planteados para el control del flujo de la producción, se simuló utilizando el software Promodel®, un escenario de demanda al que se aplicaron los modelos de gestión de flujo presentados.

3.1 Tiempo de simulación

Para determinar el tiempo de simulación del proceso para cada uno de los productos se parte de la mezcla óptima obtenida. Las 160 horas mensuales que trabaja la empresa se prorratan entre el tiempo requerido para fabricar cada uno de los productos. Dicho tiempo va a estar determinado por la multiplicación entre la cantidad óptima y tiempo del proceso de la operación cuello de botella (CB) para cada producto, que corresponde al tiempo de la operación de empaque. De esta manera se obtienen los siguientes tiempos de simulación para cada uno de los productos como puede observarse en la Tabla 4.

Tabla 4: *Tiempos de simulación por producto*

Producto	Mezcla Óptima	Tiempo CB [h]	Tiempo de Simulación [h]
X1	1320	0,0833	110
X2	2500	0,0166	41,5
X3	447	0,0191	8,5

3.2 Tamaño de los amortiguadores

El tamaño del amortiguador se estimó como el número de piezas que podía producir la operación cuello de botella durante tiempo de producción de un lote de hasta dicho punto del proceso de acuerdo a la ecuación 2, obtenida a partir de la adaptación de la expresión formulada en Ortiz Flores (2008) [4]

$$\text{Amortiguador [u]} = \frac{(\text{TiempodeArribodelproducto} \left[\frac{\text{min}}{\text{u}} \right] + \text{Tiempodescarga} \left[\frac{\text{min}}{\text{u}} \right]) * \text{Tamaño de Lote [u]}}{\text{TiempodeEmpaque} \left[\frac{\text{min}}{\text{u}} \right]} \quad (2)$$

En la tabla 4 se presentan los valores del Tamaño de Lote (TL) y el tamaño del amortiguador de cada producto:

Tabla 5: *Tamaño del lote y Amortiguador por producto*

PRODUCTO	TL	AMORTIGUADOR
X1	6 u	9 u
X2	20 u	35 u
X3	39 u	54 u

Los valores de TL se utilizarán en la simulación del flujo de producción según ambos modelos. El valor de amortiguador se aplicará cuando se simule según el modelo DBR.

3.3 Parámetros de la simulación para los dos modelos de gestión de flujos productivos

Se simularon de manera independiente el proceso productivo de los tres productos para los dos modelos de gestión utilizando el software Promodel®.

Las características contempladas para su desarrollo se detallan a continuación:

- Existen tres operaciones (descarga, empaque y despacho) diferentes e independientes.
- La operación empaque es el cuello de botella o restricción del proceso, para los 3 productos.
- La materia prima llega tan pronto como se solicita.
- Todas las piezas terminadas son entregadas al cliente inmediatamente.
- No existen tiempos de transporte entre operaciones.
- Cada estación de trabajo consta de un almacén ficticio con capacidad infinita antes y después, esto es porque trabaja con un tamaño de lote mayor de 1.
- Al momento de iniciar la simulación no existe inventario en proceso.
- Los tiempos de simulación de cada producto se obtienen de la Tabla 3 y su suma total corresponde a las 160 horas de trabajo mensual de la empresa.

Los productos o materias primas que ingresan al sistema, se liberan de acuerdo a los siguientes esquemas:

- Modelo Tradicional: se esquematiza en figura 2. El sistema se alimenta según el tiempo de proceso de la operación inicial. El número de unidades en cada arribo, será equivalente al tamaño de lote de cada producto.

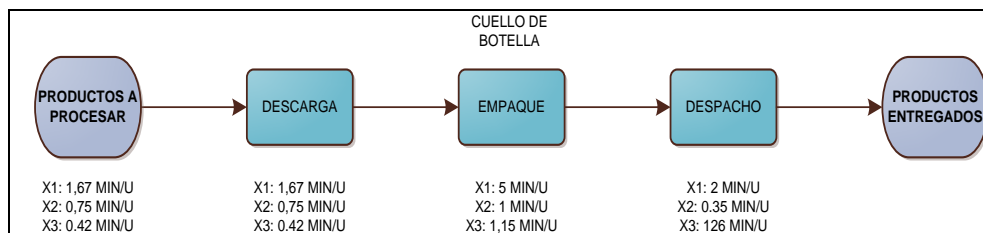


Figura 2: *Gestión de flujos productivos según Modelo Tradicional*

Se observa que la liberación de la Materia Prima -indicado en el gráfico como productos a procesar-, se realiza a la velocidad de producción de la descarga para los 3 productos.

- Modelo DBR: Se esquematiza en figura 3. El sistema se alimenta de acuerdo a la tasa de producción de la operación cuello de botella.

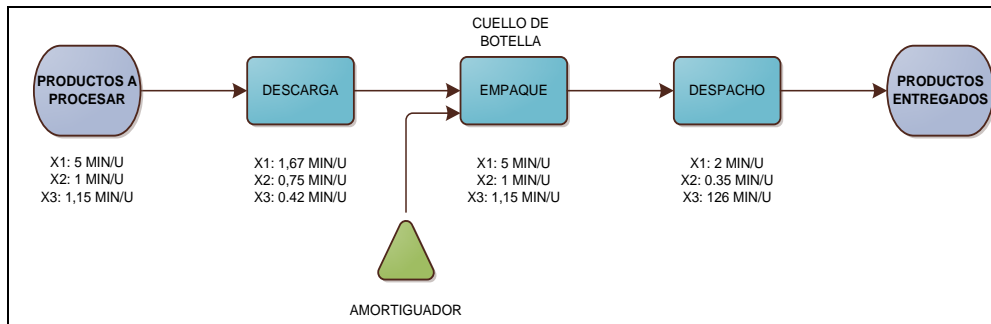


Figura 3: Gestión de flujos productivos según Modelo DBR

En este modelo, la liberación de los materiales se realiza a la velocidad de la operación empaque, que es la operación restrictiva para los 3 productos. Además, se mantendrá un amortiguador inicial según los valores de la Tabla 4.

3.4. Definición de medidas de desempeño

Se definieron las siguientes medidas de desempeño a efectos de poder comparar el comportamiento de ambos modelos:

- Inventario en proceso;
- Unidades producidas totales y por operación;
- Tiempo promedio que los productos permanecen en el sistema

5. RESULTADOS

Para simular los modelos se ingresaron al software Promodel® el sistema productivo, compuesto por 3 centros de trabajo. El tiempo de procesamiento de cada centro de trabajo, cuyo valor promedio se presentó en Tabla 1, se le asocia un valor de dispersión del 10% de dicho valor medio a efectos de representar el comportamiento probabilístico del sistema.

Se detallan a continuación la forma de evaluar las medidas de desempeño para cada uno de los modelos aplicados:

- El inventario en proceso en cada una de las operaciones se obtuvo sumando el número de productos que estaba en proceso en dicha operación y el número de productos que estaban en los almacenes ficticios al inicio y final de la misma.
- Las unidades obtenidas indican la cantidad de productos que han sido procesados en cada operación durante el tiempo de simulación.
- El tiempo promedio total que los productos permanecen en sistema está compuesto por el tiempo promedio que los productos están en operación, el tiempo promedio que esperan a que se acumule el tamaño de lote correspondiente y pasan a la siguiente operación (tiempo de espera) y el tiempo promedio que esperan a ser procesados en la siguiente operación (bloqueo).

5.1 Resultados de simulación según Modelo Tradicional (MT)

Las tablas 6a, 6b y 6c presentan los resultados de los tres indicadores obtenidos para la simulación del sistema administrando su flujo de acuerdo al Modelo Tradicional

Tabla 6a: Inventario en proceso –MT-

	Op1	Op2	Op3	Total
X1	2637	6	0	2.643
X2	849	9	0	858
X3	807	24	0	831

Tabla 6b: Unidades totales producidas y por operación –MT-

	UT	UT Op1	UT Op2	UT Op3
X1	1308	3940	1313	1308
X2	2460	3295	2468	2460
X3	390	1175	413	390

Tabla 6c: *Tiempo promedio de permanencia en el sistema –MT-*

Pieza	Tiempo promedio en sistema [min]	Tiempo promedio en espera [min]	tiempo promedio de bloqueo [min]	tiempo promedio en operación [min]
X1	2224,03	25,85	2189,51	8,67
X2	351,63	27,07	322,45	2,1
X3	202,24	40,2	160,34	1,7

De las tablas 6 se puede observar:

- que la operación descarga, que es la de mayor capacidad, genera un inventario en proceso importante, respecto al resto de las operaciones.
- Las unidades totales producidas no alcanzaron los valores planificados. Del producto chapa se produjo el 99%, de ángulo el 97,6% y de brida el 87,2%
- Del tiempo total que el producto permanece en el sistema, en el caso de X1 el 99,6% corresponde a tiempo de espera. Para X2 el 99,4% del tiempo está en espera y para X3 el 99,2%.

5.2 Resultados de simulación según Modelo DBR

Las tablas 7a, 7b y 7c presentan los resultados de los tres indicadores obtenidos para la simulación del sistema administrando su flujo de acuerdo al modelo DBR

Tabla 7a: *Inventario en proceso -DBR-*

	Op1	Op2	Op3	Total
X1	9	5	1	15
X2	39	9	0	48
X3	56	14	0	70

Tabla 7b: *Unidades totales producidas y por operación –DBR-*

	UT	UT Op1	UT Op2	UT Op3
X1	1314	1313	1318	1314
X2	2480	2477	2488	2480
X3	429	428	442	429

Tabla 7c: *tiempo promedio de permanencia en el sistema –DBR-*

Pieza	Tiempo promedio en sistema [min]	Tiempo promedio en espera [min]	Tiempo promedio de bloqueo [min]	Tiempo promedio en operación [min]
X1	74,33	34,08	31,59	8,66
X2	52,25	29,24	20,91	2,09
X3	86,03	50,98	33,41	1,64

De las Tablas 7 se puede observar:

- Que la operación descarga, que es la de mayor capacidad, al igual que en el modelo anterior, también es la operación que genera el mayor inventario en proceso.
- Las unidades totales producidas no alcanzaron los valores planificados. Del producto chapa se produjo el 99,6%, de ángulo el 99,2% y de brida el 96%.
- Finalmente, del tiempo total que el producto permanece en el sistema, en el caso de la chapa el 88,3% corresponde a tiempo de espera. Para ángulo el 96% del tiempo está en espera y para brida el 98,1%.

5.3 Comparación de resultados obtenidos por ambos métodos

Se comparan los resultados a efectos de resaltar las diferencias entre ambos sistemas:

- Inventarios en proceso: en la Tabla 8 se presentan los valores finales de inventario en proceso según los dos modelos

Tabla 8: *Inventarios en proceso*

	Total MT	Total DBR
X1	2.643	14
X2	858	48
X3	831	70

Como puede observarse, es notable la reducción de inventario en proceso bajo el sistema DBR. Para las chapas la reducción fue de un 99,5% para los ángulos fue de 94,4% y para las bridas de un 91,6%.

- Unidades Totales Producidas: en Gráfico 1 se representan las unidades totales obtenidas.

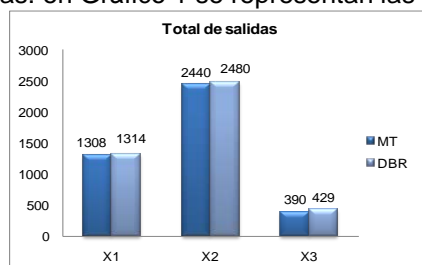


Gráfico 1: *Unidades Totales producidas*

Si bien la cantidad de unidades producidas para los tres artículos es superior en el Modelo DBR, se considera que la diferencia no es relevante.

En gráficos 2, 3 y 4 se representan las unidades obtenidas por operación para X1, X2 y X3 respectivamente.

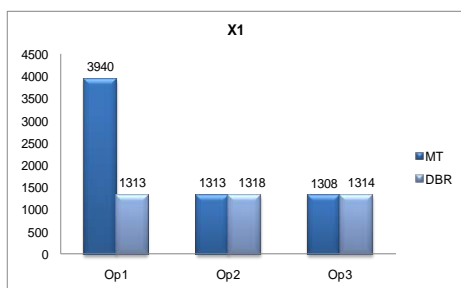


Gráfico 2: *Unidades X1*

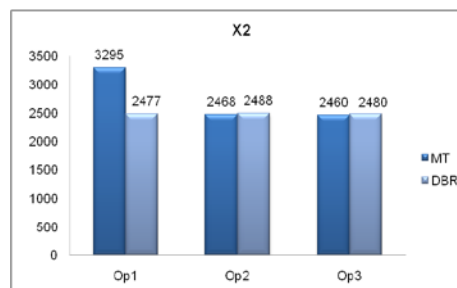


Gráfico 3: *Unidades X2*

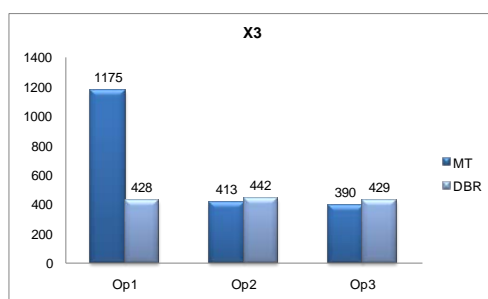


Gráfico 4: *Unidades de X3*

Se evidencia que en la operación 1 la producción en el Modelo Tradicional es significativamente mayor que el Modelo DBR. Para las operaciones 2 y 3 si bien los centros de trabajo producen una cantidad de unidades similar, en ambos casos, el Modelo DBR aumenta en un 2%. De todas formas, la producción final queda definida por las unidades producidas en la última estación de trabajo.

Es importante notar que de estos gráficos se puede apreciar la sincronización de la producción que genera el modelo DBR. Para los 3 productos, la producción en los tres centros de trabajo se mantiene aproximadamente constante e igual a la capacidad del Cuello de botella.

- Tiempo promedio que los productos permanecen en el sistema

Como se puede observar, el tiempo promedio total que los productos permanecen en sistema desciende de forma considerable al utilizar el sistema DBR. Esto se debe a la reducción del tiempo de bloqueo generado en la operación 1 al pasar del enfoque tradicional al sistema DBR. Tabla 9 indica la disminución de tiempo en proceso producto de comparar ambos modelos.

Tabla 9: *tiempo en proceso para ambos modelos*

	Tiempo en proceso MT	Tiempo en proceso DBR	Diferencia (disminución)
X1	2224,03	74,33	96,65%
X2	351,63	52,25	85,15%
X3	202,24	86,03	57,41%

En gráfico 5 se presentan los valores de porcentaje de tiempo de espera para cada producto.

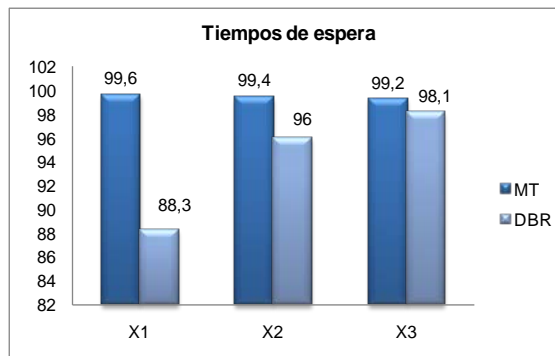


Gráfico 2: *tiempo de espera por producto para ambos modelos*

Se observa que hay una disminución en el porcentaje de tiempo de espera respecto del tiempo promedio total, aplicando el modelo DBR. Si consideramos además que el tiempo promedio total ha disminuido, tal como se indica en tabla 9, dicha las derivaciones de aplicar el modelo DBR son doblemente favorables: disminuye el tiempo promedio total que los productos permanecen en sistema y de ese total, también disminuye el tiempo promedio de la espera.

6. CONCLUSIONES

Se analizó un sistema productivo real, cuyo proceso está compuesto por 3 operaciones. Las capacidades de dichas operaciones no están balanceadas ni entre ellas ni con la demanda.

Se simularon 160 horas de trabajo que son las equivalentes a un mes, para producir la mezcla óptima de los productos más importantes que en este caso resultaron ser 1320 unidades de chapa, 2500 unidades de ángulo y 447 unidades de brida. Se utilizó el software Promodel®.

La gestión del flujo productivo se realizó según el Modelo Tradicional y según el Modelo DBR.

Finalmente, a partir del análisis de los resultados se puede concluir que la aplicación del modelo DBR en un sistema de producción con las características planteadas es mucho mas eficiente, dado que generó menor inventario en proceso, menor tiempo promedio total de los productos en el sistema, obteniendo prácticamente la misma producción. Estos resultados indicarían que los costos de operación finales serán menores.

Es importante destacar, de la misma forma, la consistencia de los resultados de este trabajo con los hallados en el estudio presentado por Ortiz et al.

7. REFERENCIAS.

- [1] Ortiz Flores, Fernando; Muño de la Parra, Pablo.(2008) "*Comparación del sistema de costos estándar y la teoría de restricciones para el control del flujo de materiales mediante un modelo de simulación*". Revista de la Ingeniería Industrial. Vol 2, N° 1
- [2] Krajewski,L; Ritzman, L; Malhotra,M: "*Administración de operaciones*". (2008) 8° Edición. Pearson Educación, México.
- [3] Umble, M.M. y Srikanth, M.L.(1997) "*Synchronous management: profit-based manufacturing for the 21 st century*". Volumen 2", Edit. The Spectrum publishing Company, USA,

- [4] Chapman, Stephen N.(2006).“*Planificación y control de la producción*”. Ed. Pearson. Prentice Hall. México.
- [5] Goldratt, E.M., y Jeff C., (1994) “*La meta*”, Ediciones Castillo.
- [6] Garcia Dunna, E; Garcia Reyes,H; Cárdenas Barrón,L (2006). “*Simulación y análisis de sistemas con Promodel®*”.1° Edición.Pearson Educación... México