

Aplicación de la Metodología de Simulación para Sincronizar el Flujo del Producto en una Planta Tipo A con Componentes Compartidos por Medio de la TOC

Fernando Ortíz Flores*
Baldomero Gómez Bernardi**

Resumen

Partiendo de la idea de que las empresas necesitan, cada vez más, contar con procesos productivos eficientes y eficaces para poder mantenerse en condiciones de competitividad en mercados globalizados, este artículo presenta la aplicación de la metodología de simulación propuesta por Law y Kealton para construir dos modelos de una planta tipo A con componentes compartidos, uno bajo conceptos de costos estandar y el otro de acuerdo con la metodología basada en el sistema logístico TAC. Este sistema de logística TAC pretende sincronizar el flujo de la producción en una planta de manera rápida con miras a reducir los inventarios, mejorando la calidad e incrementando el servicio al cliente.

Según los resultados obtenidos, el modelo que opera bajo los conceptos de costos estandar obtiene un valor mayor en el número de piezas promedio que el modelo del enfoque TAC. El tiempo de permanencia en el sistema fue menor para el modelo del enfoque TAC. El número de unidades producidas, el dinero generado por las ventas y la utilidad neta conseguida, fueron similares en ambos modelos, pero el retorno sobre la inversión fue mayor con el modelo que emplea el sistema TAC.

Introducción

En la actualidad las empresas se ven obligadas a tener procesos productivos eficientes y eficaces si quieren mantenerse vigentes en un mercado cada vez más competitivo y globalizado, por lo tanto el conocimiento y aplicación de las tecnologías y filosofías que generen avances significativos en los procesos productivos no se pueden aplazar más. Diferentes alternativas de la ingeniería industrial se presentan para que las empresas resuelvan las diversas problemáticas que se viven en el ámbito industrial, por ejemplo: aplicación de los elementos justo a tiempo (JAT), planeación de los requerimientos de la empresa (ERP), aplicación de los conceptos

*Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba. Profesor-Investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Orizaba. Correo electrónico: ferchilo@prodigy.net.mx.

**Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial por el Instituto Tecnológico de Orizaba. Correo electrónico: gbernardi2@hotmail.com.

del sistema logístico TAC, entre otros.

Los conceptos del sistema TAC, sobre los cuales está enfocado este artículo, buscan sincronizar el flujo de la producción en una planta de una forma rápida para reducir los inventarios dentro de la planta, mejorar la calidad -al incrementar el nivel del servicio al cliente- y disminuir trabajos atrasados (Umble, 1997a).

Con respecto a la aplicación del sistema logístico TAC, los autores del presente artículo han observado la carencia de información sobre su aplicación e implementación, y la que existe se maneja a precios elevados. Existen publicaciones en libros, revistas o páginas de *Internet* que mencionan sus ventajas, pero sólo proporcionan directrices superficiales para su implementación. De la misma forma, en el mercado se pueden encontrar cursos, que ofrecen empresas de consultoría en teoría de restricciones a costos exorbitantes para las pequeñas empresas que buscan permanecer vigentes en el mercado⁽¹⁾.

En este documento se muestra la aplicación de la metodología de simulación (propuesta por Law y Kealton) para construir dos modelos de una planta tipo A con componentes compartidos⁽²⁾; trabajando bajo los conceptos del sistema de costos estándar (CE) y otro bajo la metodología desarrollada que se basa en los conceptos del sistema logístico TAC (TAC), se mencionan los elementos del *software ProModel* empleados para la construcción del modelo, se describe lo relativo a la verificación y validación, se muestra el cálculo de las réplicas óptimas a ejecutar.

Finalmente se muestra una comparación de las medidas de desempeño definidas en la etapa 2, en este artículo, para los dos modelos construidos, con esta comparación fue posible indicar cuál modelo ofrece los mejores resultados.

Antes de describir los pasos de la

- (1) Goldratt y Asociados México, www.moralestoc.com
- (2) La característica distintiva de las plantas A es la existencia de recursos o componentes compartidos.

metodología de simulación utilizada en la elaboración de los modelos, se da una descripción breve de cómo repercute el control de la producción en la sincronización del flujo de materiales en una planta tipo A, al utilizar el enfoque tradicional y el sistema logístico TAC.

Enfoque tradicional

En las plantas A dominan las interacciones entre recurso y producto, donde se ensamblan dos o más componentes para producir un producto base o fuente. Estos puntos en el flujo del producto se suelen conocer como puntos de ensamble o puntos de convergencia.

En las plantas A, el empleo de lotes grandes en un centro de trabajo ocasiona que los centros subsecuentes reciban el material en una forma muy errática. Este errático flujo del material ocasiona problemas que se pueden resumir como sigue (Umble, 1997b):

- En la sección de ensamble se quejan continuamente de escasez de material.
- El tiempo extra no planeado es excesivo.
- La *utilización*⁽³⁾ de los recursos es inaceptable.
- Toda la operación parece estar fuera de control.

El método tradicional para mejorar el desempeño de una planta A se suele concentrar en dar preferencia a la reducción de costos unitarios del producto y ejercer un control mejorado de las operaciones.

La administración, en un intento por reducir los costos de producción, hace hincapié en lo siguiente (Umble, 1997b):

1. **Mejorar la eficiencia de las operaciones.** Este esfuerzo va dirigido a mejorar la eficiencia de la mano de obra directa utilizada en producción.
2. **Control de uso de tiempo extra.** Debido al bajo grado de utilización, la aprobación de las solicitudes de tiempo extra

a menudo se demora, esto suele dificultar más el cumplimiento de las fechas de entrega.

3. **Enfocar los esfuerzos de ingeniería a reducir el costo unitario de producción.** Para reducir el costo del producto se busca sustituir los procesos efectuados a mano por procesos automatizados. Si con ello se pierde flexibilidad o se aumentan los tiempos fuera de servicio, el resultado de la automatización puede empeorar el problema del flujo errático del material.

Por otro lado, para ejercer un control mejorado la administración intenta establecer un sistema de producción integrado único. En este proceso debe evitarse que las diferentes secciones de la empresa tengan distintos criterios de lo que es un buen sistema, ya que esto ocasionaría que se enfoquen en metas locales que con frecuencia son incompatibles a la meta general de la empresa; el resultado de esto conduciría a la suboptimización.

Enfoque del sistema logístico TAC

La TOC controla la producción considerando que para lograr la sincronización de las operaciones de manufactura es necesario identificar y controlar las restricciones que hay en la empresa (materiales, capacidad, personal, entre otras), las cuales afectan la meta de cualquier organización: **ganar dinero**. Para lograr la sincronización, la TOC propone la utilización del sistema logístico TAC (Tambor-Amortiguador-Cuerda).

El **tambor** se define como aquella máquina del sistema de producción que tiene la capacidad de producción más lenta, conocido también como cuello de botella (CB). El **amortiguador** se define como un inventario representativo del tiempo de respuesta de las operaciones anteriores al CB, asegurando que éste siempre tenga material para trabajar. La **cuerda** es la que comunica al CB con los recursos restantes,

programando su carga de trabajo a la velocidad de trabajo del CB.

Metodología de simulación: modelo CE

Las etapas que se llevaron a cabo y que resumen la metodología de Law y Kelton (2000) para la construcción del modelo funcionando de acuerdo al enfoque de costos estándar son:

Etapa 1. Formulación del problema. En esta etapa se identificaron los objetivos del estudio: obtener un modelo de simulación de una planta A con componentes compartidos, generado en el programa computacional *ProModel*, que reflejará las problemáticas de un sistema real que opera sus recursos de acuerdo al sistema de costos estándar, para:

- Tener una animación del funcionamiento del modelo con el sistema de costos estándar. Analizar el modelo a través de las medidas de desempeño elegidas.
- Desarrollar y proponer un modelo de simulación funcionando de acuerdo al sistema logístico TAC, que forma parte de la filosofía de TOC.
- Comparar los resultados generados en cada modelo para determinar cuál sistema ofrece mayores beneficios.

Etapa 2. Recolección de datos y definición del sistema a simular.

En esta etapa se definieron las particularidades y las medidas de desempeño a evaluar del modelo de la planta tipo A que se decidió simular.

Las características particulares para el modelo que se desarrolló se describen a continuación:

- El sistema de producción constó de 10 máquinas (Máquina 1 a máquina 10) diferentes e independientes, sólo se contó con una máquina de cada tipo

(3) La puesta en funcionamiento no es igual a la utilización.

- y cada máquina tuvo capacidad unitaria de procesamiento.
- Las máquinas 7,8,9 y 10 ejecutaban operaciones de ensamble.
- Los tiempos de transporte del almacén a la planta y entre máquinas fueron despreciables.
- En la simulación ocurrieron mantenimientos preventivos en las máquinas; la duración y el tiempo entre mantenimientos fueron valores determinísticos.
- Las operaciones realizadas por el sistema de producción dieron como resultado un producto terminado de un sólo tipo.
- No existieron tiempos de preparación.
- Después de cada máquina existió un almacén temporal de capacidad finita, para acumular los materiales semiprosesados.
- El lote de transferencia del sistema (LT), determinó la cantidad de materiales semiprosesados que se debían acumular en un almacén temporal antes de viajar a la siguiente máquina.
- Los materiales semiprosesados fueron trasladados entre máquinas por medio de un transportador de capacidad finita.
- Se contó con siete almacenes principales de capacidad finita (la capacidad de estos almacenes fue mayor a la capacidad de las áreas temporales); uno para cada materia prima y maquila.
- Al iniciar la simulación, existió una cantidad predeterminada de inventario en los almacenes principales, de manera que el procesamiento de materias primas y maquilas fuera inmediato.
- Los precios de las materias primas y maquilas se definieron antes de iniciar la simulación. Existió la opción de emplear costos predeterminados o introducidos por el usuario dentro de un rango permitido.
- El modelo pudo ejecutarse utilizando datos predefinidos o datos definidos por el usuario, dentro de un rango apropiado.
- Al sistema llegaron cuatro materias primas y tres productos

semiprosesados, cada material se acumuló en un almacén principal (almacén MP1 a almacén MP7 respectivamente).

- Los tiempos de procesamiento de las máquinas fueron determinísticos (Figura 1).

Las medidas de desempeño que se evaluaron se indican a continuación:

- Número de piezas promedio en el sistema.
- Tiempo promedio de las piezas en el sistema.
- Número de unidades producidas al final de la simulación.
- Utilización de las máquinas al final de la simulación.
- Dinero generado por las ventas (*Throughput*).
- Inventario (I).
- Utilidad Neta (UN).
- Retorno sobre la inversión (UN/I).
- Flujo de efectivo al finalizar la simulación (FE).

Etapa 3. Verificación del modelo conceptual. La verificación consistió en asegurarse que las suposiciones a emplear para construir el modelo fueran correctas y representativas de las plantas tipo A con componentes compartidos.

La verificación se realizó mediante el sistema de rastreo integrado en *ProModel*, llamado *Trace*; esta opción mostró una lista de los eventos que ocurrían a lo largo de la simulación, de esta manera fue posible observar todas las operaciones del modelo, desde la entrada de materiales hasta la obtención del producto terminado.

La información desplegada en la ventana de *Trace* permitió confirmar que el modelo se desempeñaba según lo estipulado.

Etapa 4. Construcción y validación de los programas. Para cumplir con la primera parte de esta etapa: construcción; se generó el modelo de simulación para reproducir el

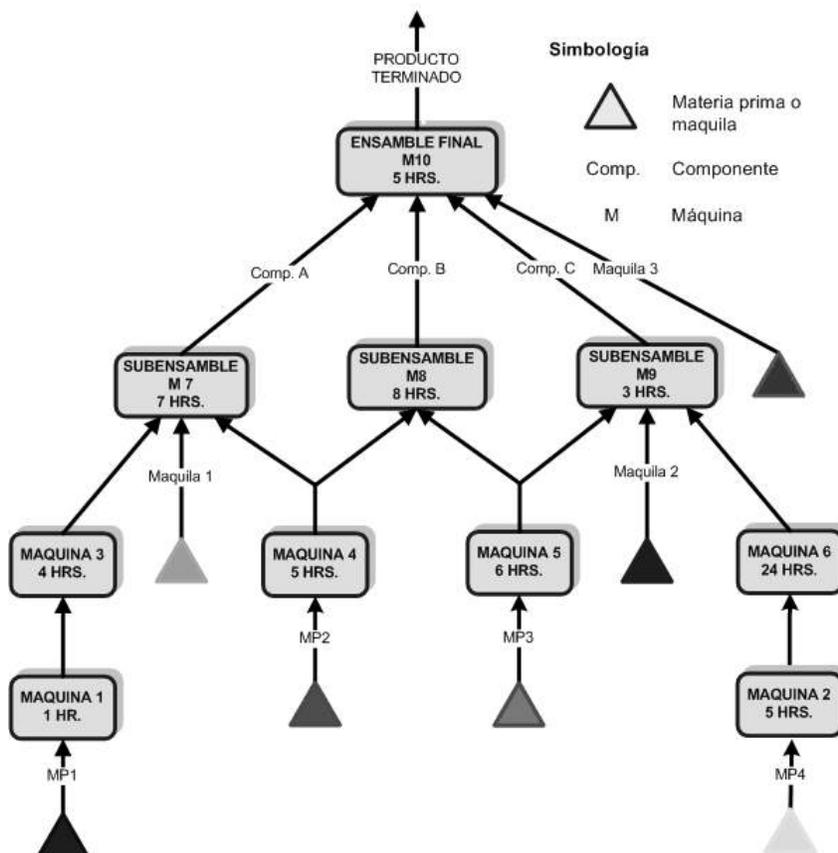


Figura 1. Flujo de materiales del modelo.

comportamiento del sistema de producción bajo estudio. En este modelo se controló la producción mediante el enfoque tradicional (Figura 2) en el cual se buscó la máxima eficiencia de cada centro de trabajo.

Para la creación del modelo se empleó el *software* de simulación profesional *ProModel*.

El primer paso en la construcción del modelo fue ingresar la información requerida en los módulos empleados: *Locations, Entities, Processing, Arrivals, Attributes, Variables, General Information* y *Background Graphics* (*ProModel*, 1999).

Para plasmar la lógica del proceso de los programas se emplearon comandos de programación y palabras reservadas del *software* que permitieron representar las características deseadas en cada modelo.

Para cumplir la segunda parte de esta etapa de la metodología de simulación de Law y Kelton: validación de un modelo; se debe determinar si éste es una representación adecuada del sistema real bajo estudio, siendo posible identificar deficiencias en la formulación del modelo conceptual.

Generalmente la validación del modelo se realiza utilizando la prueba t apareada, la cual consiste en comparar datos del sistema real con datos generados por el modelo de simulación para analizar si el modelo representa adecuadamente el sistema real.

Puesto que en el desarrollo del modelo bajo estudio se emplearon datos experimentales, no fue preciso realizar la validación, únicamente se efectuó la verificación, ya que no existieron datos de un sistema real con los cuales el modelo pudiera ser comparado.

Etapas 5 y 6. Corridas piloto y diseño de experimentos. El número de corridas piloto es arbitrario y para este estudio de simulación se

realizaron doce corridas independientes.

Las corridas piloto fueron necesarias para:

1. Obtener el estadístico media y varianza de una medida de desempeño de interés, que en este caso fue el *número de piezas promedio en el sistema*, por ser considerada una medida trascendental.
2. Calcular el número óptimo de corridas.

$$n^*(\beta) = \min \left\{ i \geq n : t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S_n^2}{i}} \leq \hat{a} \right\}$$

Donde:

- i* = Número óptimo de corridas.
- β = Error máximo permitido.
- $1-\alpha$ = Nivel de confianza.
- S_n^2 = Varianza de las corridas piloto.
- t* = Valor de la tabla t de *student*.
- n* = Número de corridas piloto.
- n** = Número óptimo de corridas.

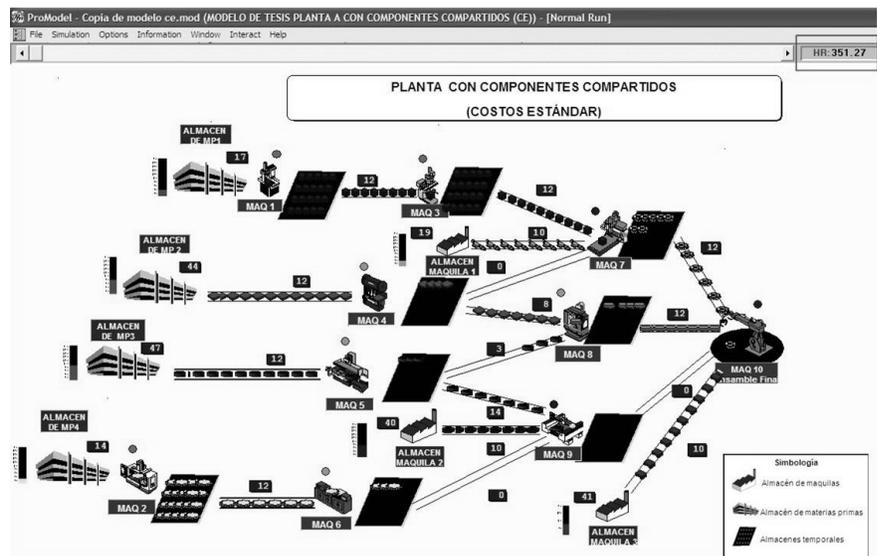


Figura 2. Modelo operando de acuerdo al sistema de costos estándar.

Los resultados de las doce corridas piloto de la medida de desempeño analizada se muestran en la Tabla 1.

Estadístico	Número de piezas en el sistema
Media	420.751
Varianza	167.847

Tabla 1. Resultado de las corridas piloto.

La ecuación 1, que se empleó para calcular el número óptimo de corridas, utiliza la varianza de las corridas piloto y un error estimado llamado Beta (β). La Beta, que es el máximo error absoluto que se puede permitir de la medida de desempeño (Law y Kelton, 2000), se fijó en este estudio en 6. El valor $(1-\alpha)$ es el nivel de confianza que se desea; para obtener un valor en la tabla t-*student*, en este estudio el nivel de confianza se precisó en 0.95.

Los cálculos son iterativos y el número de corridas óptimas *i* es alcanzado cuando el valor calculado de $n^*(\beta)$ es menor o igual al valor establecido de β . Puesto que se diseñó una hoja de cálculo⁽⁴⁾ indicada para esta tarea, únicamente se muestran los resultados en la Tabla 2, donde también se aprecia que los cálculos finalizaron cuando el valor $n^*(\beta)$ fue igual a 5.897, que es menor al valor de $\beta=6$ y fue alcanzado cuando *i* fue igual a 21.

Por lo tanto, el número óptimo de replicaciones es igual a 21; con esto se aseguró con un 95% de confianza que el error absoluto de la medida de

(4) Esta hoja de cálculo desarrollada forma parte de las aportaciones del trabajo de Gómez (2005).

desempeño evaluada fuera menor o igual a 6 piezas.

i	$n^*(\beta)$
12	8.232
13	7.829
14	7.480
15	7.175
16	6.904
17	6.661
18	6.443
19	6.244

Tabla 2. Cálculo de $n^*(\beta)$.

Etap 7. Análisis de resultados. Tomando en cuenta el resultado obtenido en el diseño de experimentos, tanto el modelo original (Costos estándar) como el sincronizado (aplicando la metodología propuesta), se corrieron 21 veces. De esas corridas, se obtuvieron y compararon los resultados que se presentan en la sección VI, con el fin de identificar el mejor sistema de administración.

Desarrollo de una metodología.

Por medio del software ProModel fue posible, además de construir el modelo CE, probar las alternativas que condujeran a sincronizar el flujo de materiales y a desarrollar una metodología basada en los principios del sistema logístico TAC.

Metodología de simulación: Modelo TAC

Las etapas de la metodología de simulación aplicadas fueron las mismas que las empleadas para construir el modelo CE y puesto que estas etapas fueron similares, no es necesario describirlas nuevamente. El segundo modelo, operando mediante la metodología desarrollada, se basó en los conceptos del sistema logístico TAC (Figura 3), buscando obtener un flujo suave y sincronizado dentro de la planta y una reducción del inventario en proceso.

Comparación de resultados

Los resultados de las corridas ejecutadas de ambos modelos

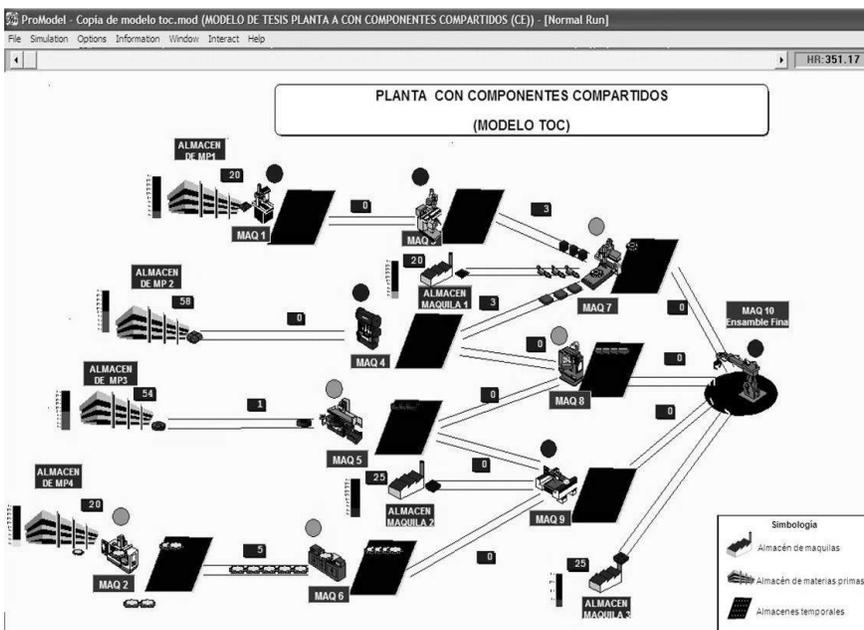


Figura 3. Modelo sincronizado con la metodología propuesta.

desarrollados se confrontan a continuación.

Número de piezas promedio. El número de piezas promedio en el modelo trabajando bajo el enfoque TOC fue menor al valor de la misma medida de desempeño obtenida en el modelo operando bajo los conceptos de costos estándar (Figura 4). Esto se debió a que en el modelo operado bajo el sistema TAC únicamente ingresan materiales de acuerdo a la capacidad de producción del cuello de botella (CB).



Figura 4. Número de piezas promedio.

Tiempo promedio de permanencia en el sistema. El tiempo promedio de permanencia para el modelo trabajando bajo el enfoque TAC fue menor al valor de la misma medida de desempeño obtenida en el modelo operando bajo los conceptos de

costos estándar (Figura 5). Esto se debió a que en el modelo TAC, las materias primas se liberaban sólo cuando se necesitaba, por ello su tiempo de permanencia fue menor.



Figura 5. Tiempo de permanencia.

Número de unidades producidas. El número de unidades producidas fueron semejantes para ambos modelos (CE y TAC); puesto que el CB determinó la cantidad máxima de productos que se podrían producir y éste tiene el mismo tiempo de procesamiento en ambos casos (Figura 6).



Figura 6. Unidades producidas.

Utilización de las máquinas. La utilización de las máquinas al final de la simulación, es el porcentaje del tiempo total que las máquinas

emplean para efectuar el proceso de manufactura. Los porcentajes de utilización de los dos modelos se presentan en la tabla 3.

La Tabla 3, muestra que la utilización del recurso cuello de botella (M6) fue mayor en el modelo TAC, esto se debió a que esta máquina constantemente tuvo material para trabajar; además, se aprecia que las utilizaciones en algunas máquinas se redujeron en el modelo TAC porque los recursos se utilizaron, no sólo se activaron.

Utilización de las máquinas (%)		
Máquina	CE	TAC
1	8.48	4.07
2	28.26	20.37
3	27.92	16.3
4	78.61	40.74
5	83.15	48.89
6	97.42	99.19
7	38.34	28.52
8	42.7	32.59
9	12.19	12.22
10	19.94	20.05

Tabla 3. Utilización de las máquinas.

Dinero generado por las ventas (Throughput). El dinero generado por las ventas, que es una medida operativa de TAC, representa la cantidad de dinero que se genera a través de la venta de artículos terminados menos los costos involucrados en la compra de las materias primas vendidas en un periodo; para el caso en estudio fue de 2209 horas.

Los resultados del *throughput* para ambos modelos se ilustran en la Figura 7, donde se puede ver que ambos modelos (CE y TAC) generaron aproximadamente la misma cantidad de *throughput*, debido a que esta medida de desempeño está en función de la cantidad de productos vendidos y para ambos modelos fue similar.

Inventario. El inventario, que es una de las medidas operativas de TOC, representa el costo de la materia prima de los productos que ya

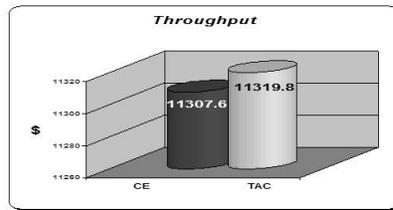


Figura 7. Dinero generado por las ventas.

fueron vendidos, así como de los productos que se encuentran como inventario en proceso.

Los resultados del inventario para los dos modelos se ilustran en la Figura 8, donde se comprobó que el modelo TAC tiene un valor menor, esto se debió a que la liberación de materias primas hacia el sistema en este modelo se controló para que no ingresaran materiales que no se convertirían en *throughput*, esto a su vez evitó la compra innecesaria de materia prima.

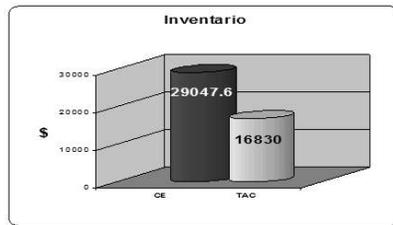


Figura 8. Inventario.

Utilidad Neta. La utilidad neta, que es una de las medidas financieras de TOC, representa el dinero que la empresa ha ganado después de restar los costos de materia prima y los gastos de operación. Como se muestra en la Figura 9, las utilidades netas obtenidas en ambos modelos fueron similares, esto se debió a que el número de unidades producidas -y por consecuencia el *throughput*- fueron similares en los modelos.

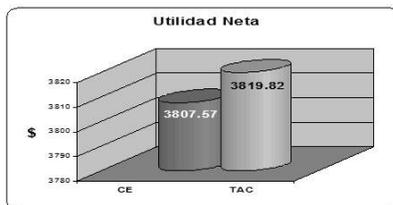


Figura 9. Utilidad Neta.

Retorno sobre la inversión. El retorno sobre la inversión (ROI), que

es otra de las medidas financieras de TOC, muestra cuánto dinero se ha ganado con respecto al dinero invertido. Esta medida está representada por un porcentaje obtenido de la relación de las utilidades netas entre el inventario.

Como se aprecia en la Figura 10, el ROI fue menor para el modelo operando bajo costos estándar que en el modelo de TAC, lo que significa que se ganó más dinero trabajando bajo los principios de la filosofía TOC en relación con el dinero que se invierte; esto se debió a que la inversión en la compra de materias primas en el modelo TAC se controló eficientemente.



Figura 10. Retorno sobre la Inversión.

Flujo de Efectivo. Como se muestra en la Figura 11, el flujo de efectivo fue menor en el modelo CE que el modelo TAC, esto confirmó que los principios de TOC proporcionan una ventaja competitiva

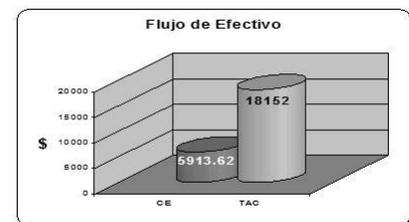


Figura 11. Flujo de Efectivo.

Conclusiones

Las características generales de las plantas A y las políticas de administración enfocadas a mejorar las eficiencias locales, generan que el flujo de materiales sea errático, crea acumulación de materiales donde no se requieren y escasez principalmente en el ensamble final; es por lo anterior que el sistema logístico TAC puede ser aplicado dentro de

este tipo de plantas para reducir el inventario y establecer un flujo de materiales más uniforme.

El modelo operando bajo el sistema logístico TAC, que tiene incorporada la metodología propuesta por los autores, proporciona mejores resultados que los obtenidos por el modelo operando bajo los principios de costos estándar. Esto se manifiesta en los indicado-

res financieros de TOC: Inventario, Retorno sobre la inversión y Flujo de Efectivo, y también en otros medidas importantes: Número de piezas promedio en el sistema, Tiempo promedio de las piezas en el sistema y Porcentaje de utilización de cada recurso.

El uso de la simulación permitió evaluar varias alternativas en los modelos y reforzar la metodología

diseñada para implantar el sistema TAC.

Aunque el flujo de materiales en las plantas tipo A con componentes compartidos es complejo, es posible ejercer un control efectivo considerando los recursos que controlan el sistema (CB) y de esta manera establecer la liberación de materiales. 

Bibliografía

Banks, Jerry. *Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 1998.

Castro Salas, Rosa Isela. *Desarrollo de una metodología para implantar TOC en una célula de manufactura a través de un modelo de simulación*, Tesis de Maestría, Asesor: M.C. Fernando Ortiz Flores, Instituto Tecnológico de Orizaba, 2005.

Goldratt, Eliyahu M. "Production the TOC Way", The North River Press, 1996.

Goldratt, Eliyahu M. & Robert E. Fox, La Carrera, Ediciones Castillo, segunda edición, México, 1992.

Gómez Bernardi, Baldomero. *Sincronización del flujo de materiales en una planta manufacturera tipo A con componentes compartidos*, Tesis de Maestría, Asesor: M.C. Fernando Ortiz Flores, Instituto Tecnológico de Orizaba, 2005.

Law, Averill M. *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, Third Edition, USA, 2000.

López Vigil, Carlos. *Metodología para implantar la técnica de optimización de la producción o sistema OPT*, Tesis de Maestría, Asesor: M.C. Fernando Ortiz Flores. Instituto Tecnológico de Orizaba, 1997.

Moras Sánchez, Constantino, "Apuntes de la Materia Simulación", Asignatura de Maestría, Instituto Tecnológico de Orizaba, 2004.

ProModel Corporation, "ProModel, Software de Simulación de Manufactura", Manual del Usuario, Estados Unidos de América, 1999.

Umble, Michael & M. L. Srikanth, *Manufactura Sincrónica*, CECSA, México, 1997a.

Umble, Michael & M. L. Srikanth, *Synchronous Management Volume Two*, The Spectrum Publishing Company, USA, 1997b.

