

Moya, Marcos. *Diseño y evaluación de un sistema de manufactura mediante simulación: sistema de manufactura justo a tiempo. Tecnología en marcha*. Vol. 10, no. 1. 1990. p. 17-25.

DISEÑO Y EVALUACION DE UN SISTEMA DE MANUFACTURA MEDIANTE SIMULACION. SISTEMA DE MANUFACTURA JUSTO A TIEMPO

Marcos Moya*

RESUMEN

El siguiente artículo tiene como objetivo mostrar, en primera instancia, cómo la simulación puede ayudar a los ingenieros a diseñar y evaluar sistemas de manufactura, con flujos de producción complejos, que se ajustan a las necesidades de cada proceso productivo.

Asimismo, mediante el proceso de simulación, se demuestran algunas de las ventajas de usar un sistema de manufactura justo a tiempo, tales como reducción de los tiempos de ciclo, disminución de los inventarios en proceso, y disminución de los tiempos de espera de las unidades procesadas.

También el uso de esta técnica demuestra las ventajas de balancear las líneas de producción.

sistemas para estudiar su comportamiento. Se comparan los resultados obtenidos al ensamblar los carritos bajo un **sistema de ensamble justo a tiempo (JAT)**, con los resultados obtenidos con el sistema tradicional de ensamble, en donde se permite tener inventarios en proceso.

DESCRIPCION DE LA LINEA DE PRODUCCION QUE SE VA A ESTUDIAR

En virtud de que este trabajo es totalmente experimental, se montó una línea piloto de producción en el Centro Experimental de la Producción Industrial (CEPI), en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, como parte de las prácticas de laboratorio que hacen los estudiantes del curso de Métodos y Tiempos II, de la carrera de Ingeniería en Producción Industrial del ITCR. El montaje de esta línea de producción fue supervisado por el profesor Ing. Hugo Pereira.

Se determinaron ocho estaciones de trabajo, para el ensamble de estos juguetes y se hizo el correspondiente estudio de tiempos. Los datos de las operaciones, así como sus respectivos tiempos se muestran en el Cuadro 1.

Para efectos de la simulación, se supone que los tiempos de servicio de cada una de las estaciones se comportan según una distribución normal. La media y la desviación estándar de estas distribuciones se obtuvieron del estudio de tiempos que se hizo y se muestran en el Cuadro 1. Sin embargo, aquí surge una pregunta. ¿Cómo se determina la desviación estándar de los tiempos de servicio, cuando los tiempos de ciclo de las operaciones son muy grandes, y por lo tanto no cronometrables? T. M. Ozan² propone usar la relación

INTRODUCCION

En este trabajo, se ha concentrado el esfuerzo en estudiar una línea de producción que fabrica un solo producto, carritos de juguete, construidos con madera. A través de esta línea de producción, fluyen los componentes que conforman el producto, los cuales son ensamblados en forma manual. Los puestos de trabajo que llevan a cabo las operaciones de ensamble están dispuestos en serie y en paralelo, y se denominarán de ahora en adelante estaciones de servicio.

El objetivo de este trabajo es mostrar las ventajas de usar la simulación para el diseño y la evaluación de sistemas complejos de manufactura, sin tener que recurrir a la implantación de tales

* Profesor del Departamento de Producción Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

CUADRO 1. Actividades y tiempos de procesamiento para el ensamble de un carro de juguete (tiempo en segundos por unidad).

ACTIVIDADES	Tiempos de ensamble por unidad (segundos)	
	Tiempo esperado	Desviación estándar
1. Ensamblar guardabarros con laterales y colocar tornillos. (E-1)	21,30	1,10
2. Unir E-1 a piso del carrito. (E-2)	52,24	1,34
3. Colocar dos llantas a cada eje.	11,46	0,17
4. Unir E-2 a ejes con llantas. (E-3)	63,91	2,62
5. Colocar pasajeros y repuesto a E-3.	23,81	1,43
6. Colocar cabina y atornillar.	228,00	2,87
7. Hacer la inspección.	20,36	1,50
8. Empacar el juguete	299,78	12,77

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{36}$$

donde "b" es un estimado pesimista y "a" es el estimado optimista de los tiempos de servicio de las operaciones.

El suponer normalidad implica que va a haber ciertas fluctuaciones en los tiempos de servicio de las actividades. En la práctica, en los procesos manuales, estas fluctuaciones se dan por diversas razones. Una de ellas es el coeficiente de presión que se origina sobre los servidores cuando se forman colas muy grandes esperando por servicio (sistema de manufactura tradicional). Otra razón es que normalmente se da una cierta tasa de rotación de personal, lo que implica que debe de entrenarse a la gente cada tiempo.

La tasa a la cual debe ensamblarse el producto se considera constante y determinística. Varía de acuerdo con las tasas de demanda de este producto en el mercado. Así por ejemplo: si se deben producir 17280 carros por semana, entonces para efectos de la simulación, la tasa de arribos o de llegadas se calcula así:

$$\lambda = \frac{17280 \text{ unidades}}{\text{sem}} \times \frac{1 \text{ sem}}{6 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} \times \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$\lambda = \frac{17280 \text{ unidades}}{172800 \text{ s}} = 0,10 \text{ unidades/segundo}$$

El tiempo entre llegadas será constante con valor:

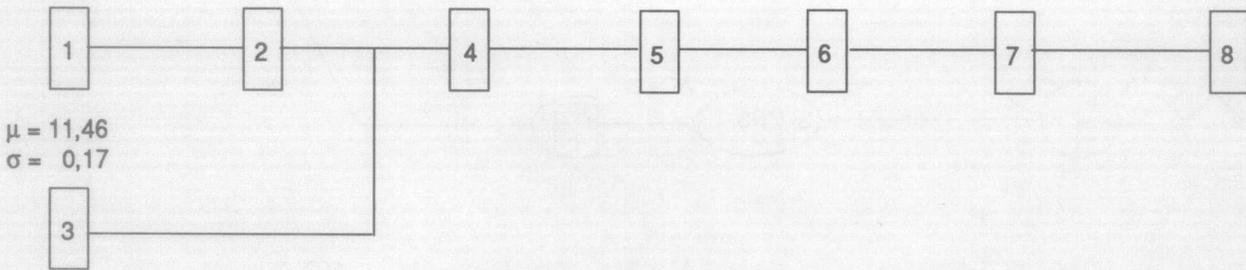
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{172800}{17280} = 10 \text{ segundos/carro}$$

La Figura 1, correspondiente al diagrama de secuencia de las operaciones de ensamble del carrito, completa los datos necesarios para llevar a cabo el proceso de simulación.

DISEÑO DE UN MODELO SLAM PARA LA SIMULACION DE LA LINEA DE ENSAMBLE DE CARROS DE JUGUETE

El paquete de simulación SLAM (*Simulation Language for Alternative Modeling*), introducido en 1979 por Pristker y Asociados, y mejorado significativamente en 1981, resultando en SLAM II, ha sido el lenguaje de programación de propósito especial utilizado para realizar este trabajo, por cumplir con las características de operación internas,

$\mu = 21,00$	$\mu = 52,24$	$\mu = 63,91$	$\mu = 23,81$	$\mu = 228,00$	$\mu = 20,36$	$\mu = 299,78$
$\sigma = 1,10$	$\sigma = 1,34$	$\sigma = 2,62$	$\sigma = 1,43$	$\sigma = 2,87$	$\sigma = 1,50$	$\sigma = 12,77$



Donde: μ = Tiempo promedio de servicio de la operación
 σ = Desviación estándar del tiempo de servicio de la operación
i = Estación de trabajo que desarrolla la operación *i*
 Las operaciones de esta línea de producción están descritas en el Cuadro 1.

FIGURA 1. Diagrama de secuencia de las operaciones para el ensamble de un carro de juguete.

necesarias para simular las operaciones de ensamble justo a tiempo.

En 1984, SLAM II tenía más de 400 instalaciones como usuarios. La experiencia con cientos de modelos demostraron la flexibilidad del lenguaje².

Las etapas iniciales en cualquier proceso de simulación de un sistema real son la definición del sistema a través del análisis de las características de operación del mismo, y la formulación del modelo que representará al sistema estudiado. En la primera etapa se definen todas las variables que interactúan en el modelo, y se construyen los diagramas de flujo que describen en forma simbólica el comportamiento del sistema estudiado. El proceso de definición del sistema que estamos estudiando ya está cumplido, y la información resultante se resume en el Cuadro 1 y en la Figura 1. El siguiente paso será construir el modelo de simulación que permitirá estudiar las características de operación del sistema de ensamble tradicional y el sistema de ensamble justo a tiempo.

SLAM II requiere que el sistema de producción mostrado en la Figura 1 sea representado mediante una red, en donde cada nodo corresponde a un aspecto de la operación del sistema. Así por ejemplo, cuando las distintas partes que componen el carro de juguete fluyen a través de la línea de ensamble, se requiere que el operario que va a realizar determinada operación esté disponible. Si

esto no ocurre, la unidad que está fluyendo a través de la línea tiene que esperar. Del mismo modo, si un operario está disponible, pero no hay unidades esperando por servicio en ese momento, entonces el operario tendrá necesariamente un tiempo de ocio. Los tiempos de ocio determinan las tasas de utilización de las distintas estaciones que conforman la línea de producción. En los sistemas tradicionales de manufactura, en donde se permiten los inventarios en proceso, los tiempos de espera de las unidades que fluyen a través de la línea determinan el tamaño de esos inventarios en proceso.

La red de la Figura 2 muestra el modelo que permite simular, mediante el lenguaje de programación SLAM II, un sistema tradicional de ensamble para la elaboración de carros de juguete cuya secuencia de operaciones se presenta en la Figura 1.

El nodo CREATE indica que cada 10 segundos entrará una unidad de flujo al proceso, y marca el tiempo en que esta unidad entra al proceso. El nodo AWAIT determina un espacio de almacenamiento para guardar las unidades que esperan. El nodo ACTIVITY "captura" al cliente, e indica el tiempo de servicio de la actividad. El nodo FREE libera al servidor que brindó el servicio. El nodo ACUMULATE combina unidades que van a ser ensambladas. El nodo COLCT genera las distintas estadísticas y el nodo TERMINATE termina el proceso de simulación.

En el sistema de manufactura tradicional, se permite tener inventarios altos, para acomodar

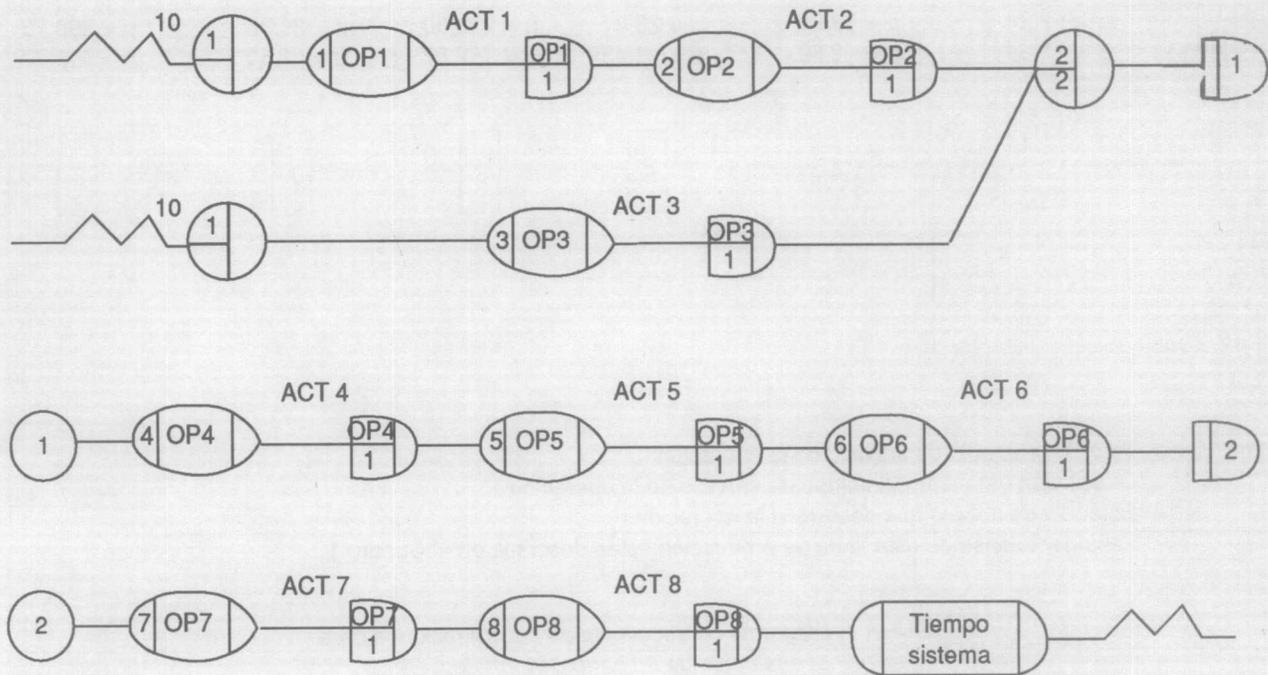


FIGURA 2. Red SLAM II para simular el proceso de ensamble de carros de juguete.

demanda del consumidor de una manera rápida. En el sistema de manufactura JAT, se requiere que haya una nivelación de la producción y que la producción sea justo a tiempo. Esto trae consecuentemente una reducción de los inventarios, y por ende de costos. Entre las principales ventajas del sistema de producción JAT están:

- Menor tiempo de ciclo
- Menos inventario
- Menos espacio
- Menos personal para controlar el inventario
- Menos equipo de almacenaje y manejo
- Menos capital ocioso
- Mejor calidad.

Para simular el sistema de manufactura JAT, se utiliza básicamente la misma red usada en el sistema tradicional. La diferencia está en que se usará la opción BLOCK, del nodo AWAIT que causa que la actividad de servicio anterior permanezca bloqueada, hasta que la entidad que permanece en el nodo AWAIT comience a procesarse. Obviamente en este nodo, solo podrá permanecer una entidad. El nodo AWAIT vendría a representar el espacio físico donde permanece la entidad que acaba de completar el servicio, en cada una de las estaciones.

A continuación se presenta el análisis realizado para el ensamble de los carros, bajo los dos sistemas de ensamble, tradicional y justo a tiempo.

El primer análisis consistirá de una comparación entre los tiempos de ciclo, tasa de producción, tiempos de espera y tamaños del inventario en proceso para la línea de producción desbalanceada, tomando un solo operario en cada estación de trabajo. El segundo análisis se hará sobre una línea de producción balanceada.

Se parte del supuesto de que es necesario producir, bajo cualquiera de los dos sistemas, 17280 carros por semana, para poder hacer las comparaciones respectivas.

ANALISIS No. 1. LINEA DE PRODUCCION DESBALANCEADA

Un operario en cada estación de trabajo

La figura 3 muestra la relación entre los tiempos de ciclo generados por cada sistema de producción. Observe que el tiempo promedio de ciclo es bastante mayor en el sistema tradicional que en el sistema JAT. Esto obviamente es una de las ventajas del sistema justo a tiempo.

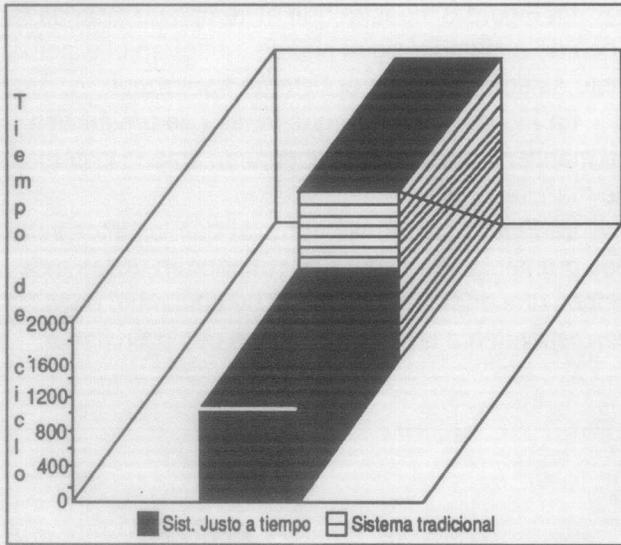


FIGURA 3. Tiempo promedio de ciclo.

La Figura 4 compara la tasa de producción en unidades por hora, generada por ambos sistemas de manufactura. En ésta se observa que las tasas de producción son iguales en ambos sistemas. Es decir, el que no haya inventarios en proceso, en ningún momento reduce la tasa de producción.

La Figura 5 muestra los tiempos de espera que se generan en ambos sistemas de producción. Este gráfico revela cómo, bajo el sistema tradicional, los tiempos de espera de las entidades que fluyen a través de las líneas de ensamble son muy grandes,

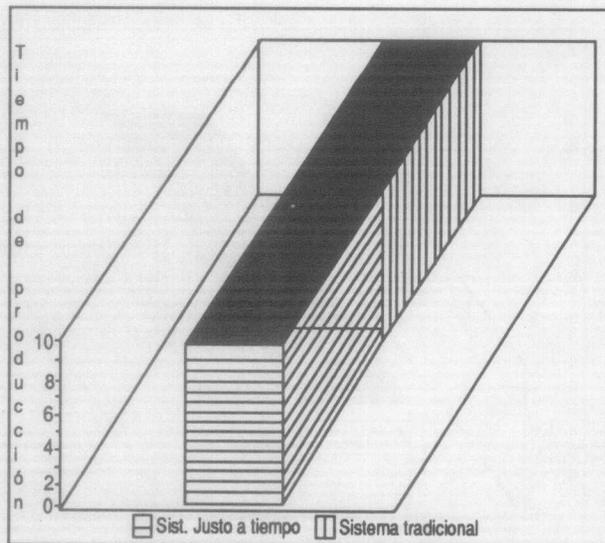


FIGURA 4. Tasa de producción en unidades por hora.

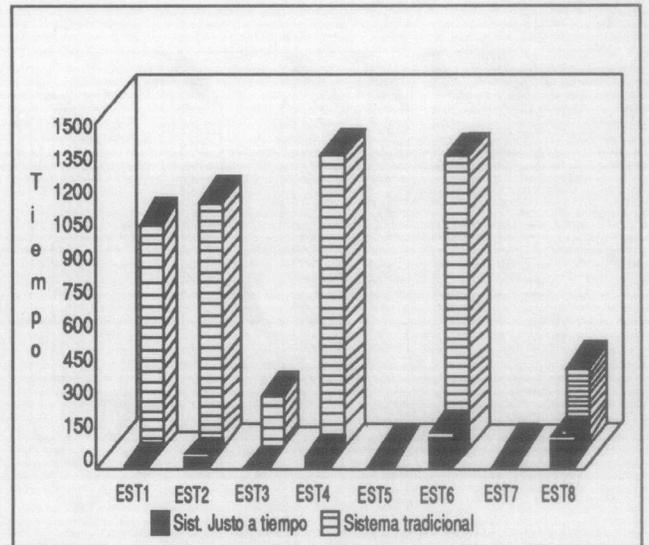


FIGURA 5. Tiempo promedio de espera en el sistema.

comparados con los tiempos de espera generados bajo el sistema justo a tiempo.

La Figura 6 revela evidentemente que el sistema de manufactura tradicional maneja inventarios en proceso, mientras que el sistema justo a tiempo trata de eliminarlos. Es necesario recordar que las entidades que están fluyendo a través de la línea de ensamble son lotes de tamaño uno.

La Figura 7 muestra el desbalance de las líneas de producción de ambos sistemas, y revela que éstas fueron sobreutilizadas.

Con este análisis se observan claramente las ventajas de implantar un sistema de ensamble justo

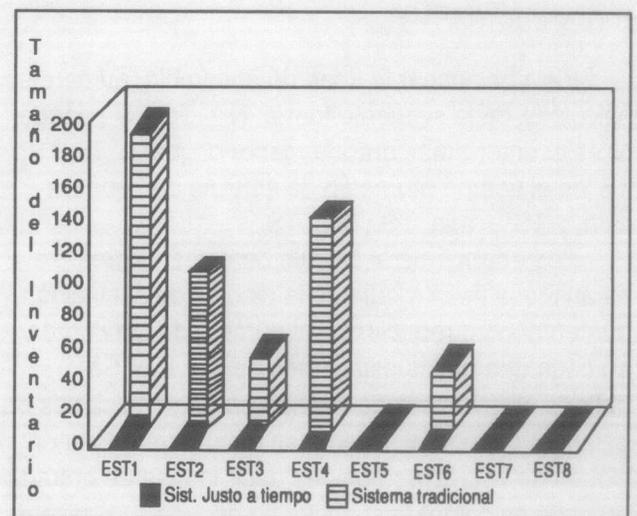


FIGURA 6. Máximo tamaño del inventario en cada uno de los puestos de trabajo.

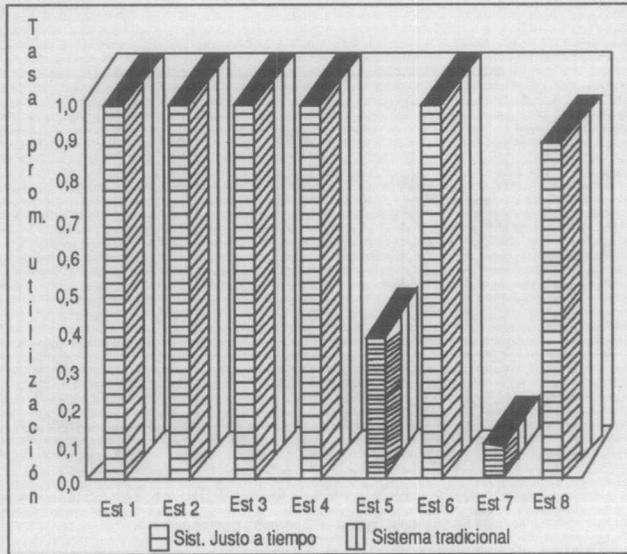


FIGURA 7. Tasa promedio de utilización.

a tiempo en cada una de las estaciones de trabajo que componen la línea, pues se ve que la tasa de producción no se reduce, se eliminan los espacios necesarios para almacenar los inventarios en proceso, pues éstos no existen y, como consecuencia, se reduce el tiempo de ciclo de la línea.

Se verá ahora, mediante la técnica de simulación, la importancia que tiene balancear una línea de producción, aún cuando se trabaje con el sistema tradicional de manufactura.

ANALISIS No. 2. LINEA DE PRODUCCION BALANCEADA

Para balancear la línea de ensamble, primero se calculó N_i de la siguiente forma: $N_i = TS_i / TS_a$, donde N_i es el entero más grande menor o igual a TS_i / TS_a , TS_i es el tiempo promedio de servicio de la operación, y $TS_a = \min TS_1, TS_2, TS_3, \dots$

Posteriormente al cálculo de estos valores, se balanceó la línea mediante la técnica de simulación, aumentando o reduciendo el número de servidores en cada una de las estaciones de servicio. Se obtiene N_{ib} (Número de servidores en condiciones de balance) cuando el sistema se encuentre en condiciones de estado estable, es decir la tasa de entrada en cada estación de servicio, no excede a la tasa de servicio en esa estación. Los resultados obtenidos después de balancear la línea se describen a continuación.

La Figura 8 muestra que el tiempo de ciclo de la línea de ensamble sigue siendo menor en el sistema justo a tiempo, que en el sistema tradicional.

La Figura 9 muestra que la tasa de producción se mantiene prácticamente igual en ambos sistemas de manufactura.

La Figura 10 permite apreciar que los altos tiempos promedio de espera se concentran en las estaciones que originan el proceso de ensamble pues corresponden a las entidades que debieron haber

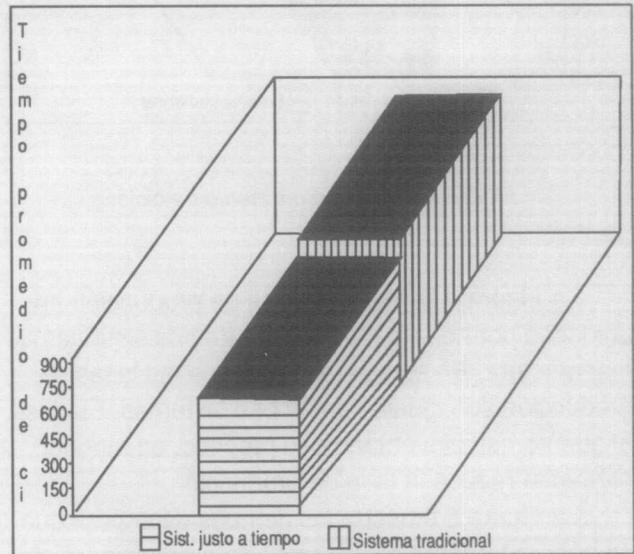


FIGURA 8. Tiempo de ciclo en un sistema balanceado.

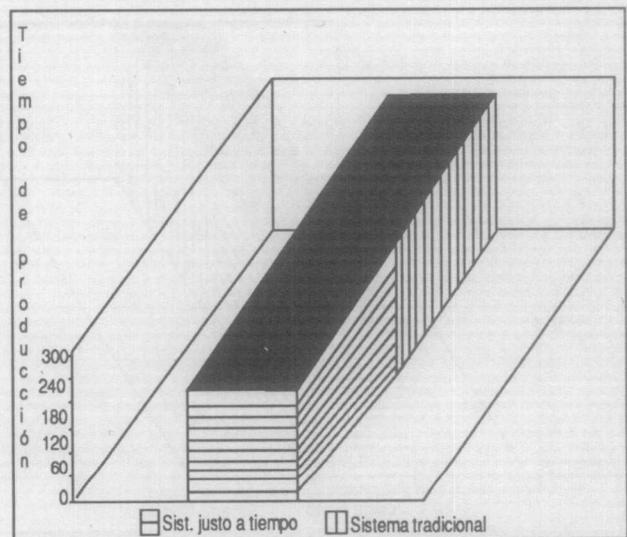


FIGURA 9. Tasa de producción en un sistema balanceado.

entrado, para cumplir con la tasa de producción fijada.

La Figura 11 muestra el inventario máximo en proceso en ambos sistemas de ensamble.

Nótese que estos inventarios en proceso se originan en las mismas estaciones donde se produjeron los tiempos de espera de las entidades.

La Figura 12 muestra las tasas de utilización de las distintas estaciones de servicio. Obsérvese que el sistema está balanceado.

La Figura 13 muestra la utilización de los recursos bajo los dos métodos de trabajo. Obsérvese que para la tasa de producción de 17280 carros por semana, se utilizaron todos los recursos disponibles en ambos sistemas de manufactura.

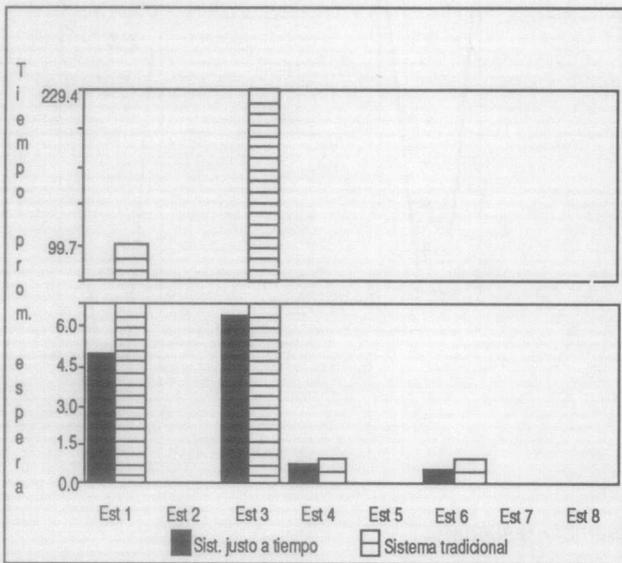


FIGURA 10. Tiempo promedio de espera en un sistema balanceado.

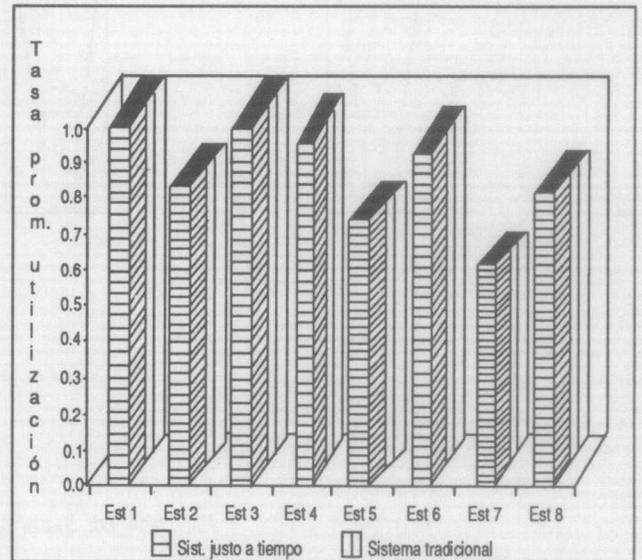


FIGURA 12. Tasa promedio de utilización en un sistema balanceado.

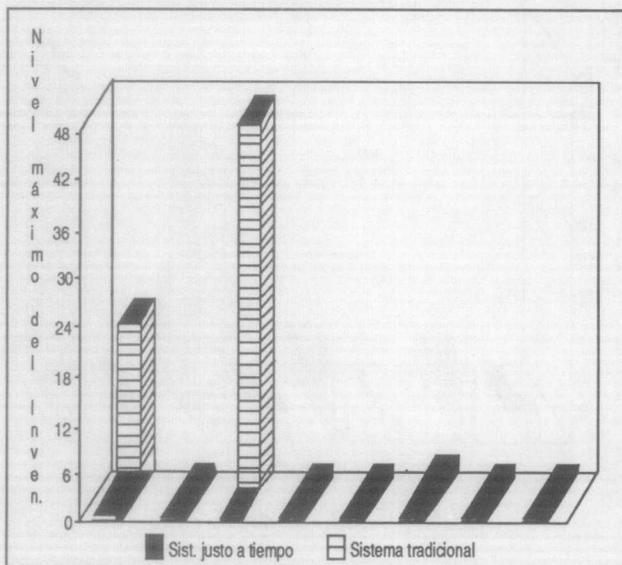


FIGURA 11. Tamaño máximo del inventario en un sistema balanceado.

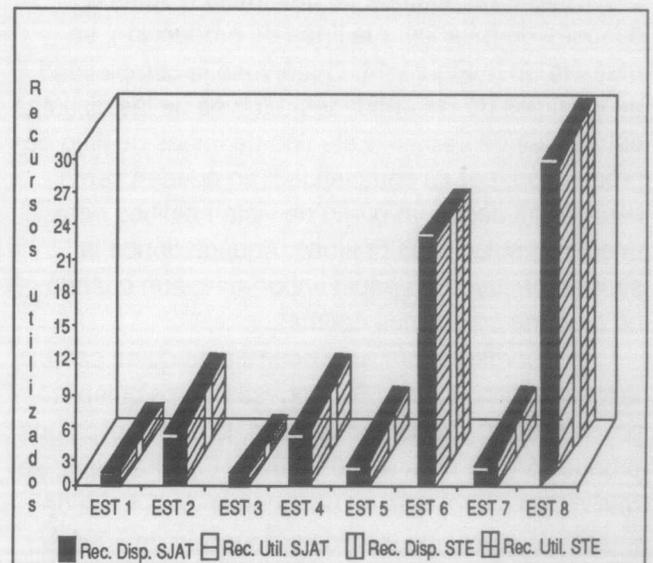


FIGURA 13. Utilización de recursos en un sistema balanceado.

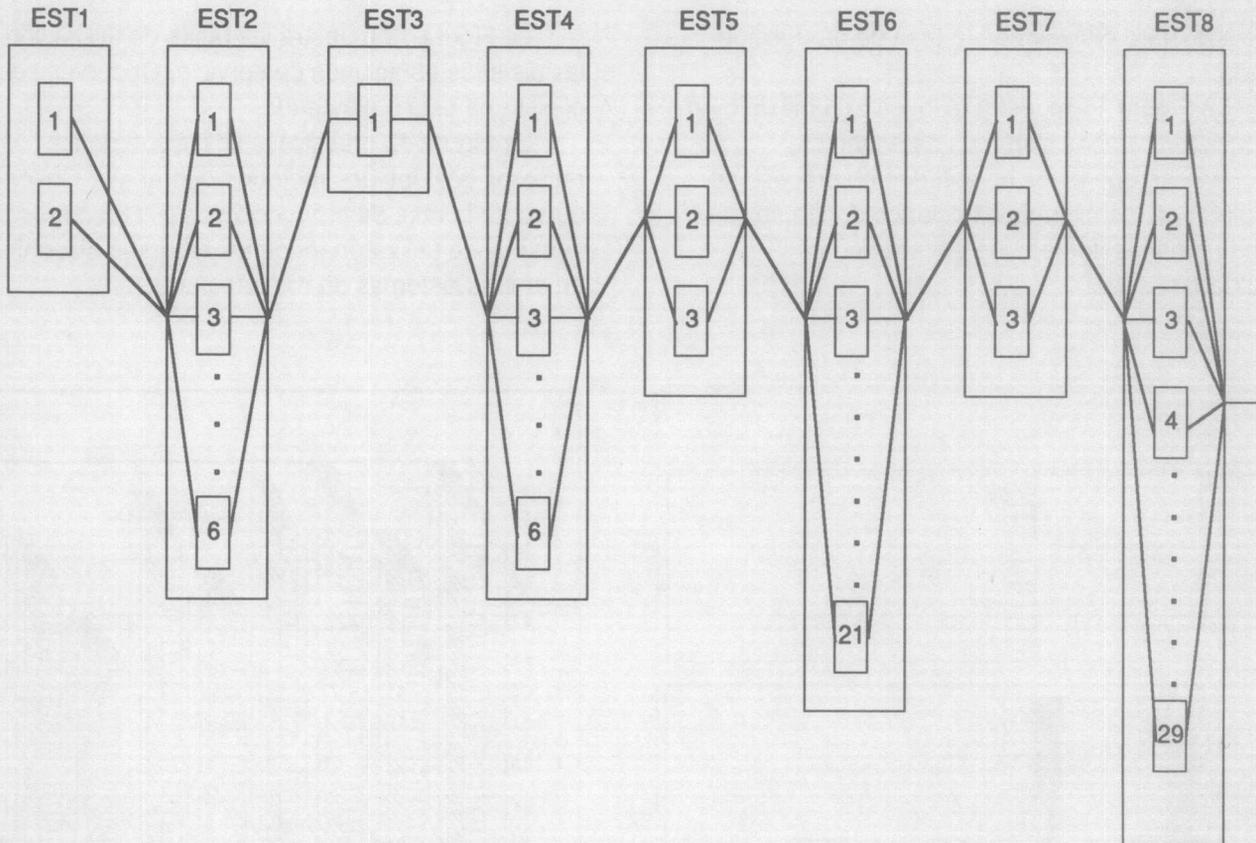


FIGURA 14. Sistema de ensamble resultante.

Este gráfico permite construir el sistema de línea de ensamble de carros de juguete que cumple con las tasas de producción establecidas.

El sistema de línea de ensamble resultante, después de balancear la línea de producción, se muestra en la Figura 14. Obsérvese la complejidad de los flujos de las entidades a través de las distintas estaciones de trabajo. Este tipo de líneas de flujo de producción, por su complejidad, no pueden ser estudiadas desde un punto de vista analítico para encontrar soluciones óptimas. Aquí es donde la simulación juega un papel importante, aún cuando no produce soluciones óptimas.

Obsérvese ahora, qué ocurre cuando se cambia la tasa de producción. Supóngase que se quieren producir 5000 carros por semana, lo que implica una producción por hora de 105 carros. Originalmente se realizó, en forma manual un balance de la línea de ensamble, para una tasa de producción de 5000 carros por semana, y se corrió el modelo de simulación con estos nuevos datos. Posteriormente se corrió el modelo original, cambiando únicamente la tasa de llegada de las entidades a la línea de en-

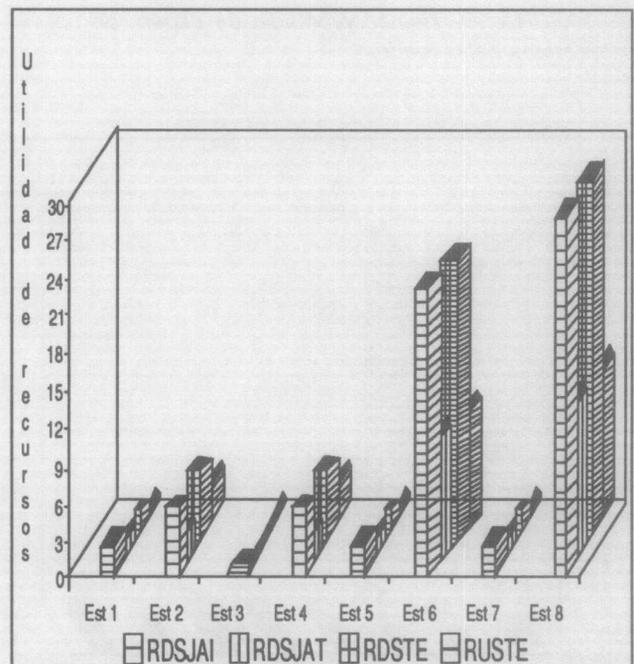


FIGURA 15. Utilización de recursos de un sistema balanceado. Tasa de producción de 500 unidades por semana.