

TOCNUN. Simulador y editor gráfico de plantas de fabricación para el aprendizaje de la Teoría de las Limitaciones

Javier Santos¹, Igor Gaztelu¹, Rodrigo Romero¹

¹ Escuela Superior de Ingenieros (TECNUN). Universidad de Navarra. Paseo Manuel Lardizábal 13, 20018, San Sebastián, Guipúzcoa, España. jsantos@tecnun.es, A901028@alumni.tecnun.es, rromero@tecnun.es

Resumen

En este artículo se presenta un simulador gráfico que apoya el correcto entendimiento de las operaciones en una planta productiva bajo el prisma de la Teoría de Limitaciones (TOC) desarrollada por Goldratt. Se trata de una herramienta pensada para ser incorporada en la docencia de Dirección de Operaciones, donde sólo se dispone de unas pocas horas para explicar los conceptos de TOC. El artículo, además, presenta la estructura de las prácticas docentes propuestas para usar el simulador. Por último, el simulador se complementa con una herramienta para diseñar otras plantas de producción con objeto de evaluar los conocimientos de los alumnos.

Keywords: Simulación, docencia, Teoría de las Limitaciones, Anylogic.

1. Introducción

Creada por Eliyahu M. Goldratt (1993), la TOC defiende que la mayoría de las empresas tienen un solo recurso con capacidad restringida denominado CDB (cuello de botella) o CCR (Capacity Constraint Resource) y, por lo tanto, la correcta administración de ese recurso llevará a la empresa a alcanzar su meta, maximizar los beneficios.

Con el objetivo de ayudar a las empresas en su camino hacia dicha meta, Goldratt (1988) desgrana en su libro *La Carrera*, una metodología llamada DBR (formado por las iniciales de Drum, Buffer, Rope) que resulta ser la aplicación de su Teoría de las Limitaciones al área de producción. La técnica del DBR consta de cinco pasos fundamentales que, en el apartado donde se explica el uso del simulador, se describen más detalladamente:

- 1.- Identificar el cuello de botella.
- 2.- Decidir cómo explotar el cuello de botella.
- 3.- Subordinar todo a la decisión anterior.
- 4.- Elevar el cuello de botella.
- 5.- Si se ha eliminado el cuello de botella volver al paso 1.-

En los temarios de las asignaturas de Dirección de Operaciones de la mayoría de escuelas de ingenieros y facultades de economía se incluye la TOC como un tema independiente, ubicado normalmente en la parte de la asignatura dedicada a la planificación y secuenciación de la producción. Algunos libros de referencia sobre Dirección de Operaciones, como Chase et al. (2000, páginas 788-832) y Domínguez et al. (1995, páginas 267-290), dedican incluso un capítulo independiente a este concepto. Es, por tanto, un tema que seguro formará parte de los

temarios de alguna de las asignaturas del área de Organización de Empresas que se ofrezca a los alumnos tras la reforma de los planes de estudios impulsada por Bolonia.

Según plantea esta reforma en el BOE (2007), los planes de estudio y, por tanto, las asignaturas, deben buscar la adquisición de competencias y situar al alumno como protagonista de su formación y del proceso de aprendizaje.

Para tener una buena comprensión en cualquier tema es necesario que el conocimiento adquirido sea completo. Según Kolb (1984) en el proceso de aprendizaje, el conocimiento se crea por una transformación de lo que se experimenta. Para aprender no sólo es importante el entendimiento teórico de cualquier idea, sino también la experiencia y la comprobación de que esa teoría tiene aplicabilidad en la vida real (Lewis y Maylor 2007).

Además, se hace creciente la necesidad de nuevos métodos que aceleren el diálogo entre el conocimiento teórico y la práctica para que haya un aprendizaje eficiente sin el riesgo de experimentar, y fracasar, en la vida real (Smeds 1993). En concreto, los alumnos deberían poder usar herramientas donde vivan, de una manera simulada, lo que puede pasar en diferentes circunstancias sin tener que operar una máquina real (Haapasalo et al, 2001).

Con idea de transmitir los conceptos de TOC y solventar la problemática descrita en el párrafo anterior, el Instituto Goldratt desarrolló hace ya tiempo un simulador en MS-DOS, denominado Selfsim (Goldratt, 1996), que posteriormente actualizó a un entorno más visual (Goldratt 2003). Sin embargo, estos simuladores están pensados para procesos de aprendizaje más largos que los que puede abarcar una asignatura en la universidad.

Además, no ofrecen la posibilidad de desarrollar plantas productivas diferentes a las incluidas en la licencia, por lo que la posibilidad de evaluar el aprendizaje con una planta original queda restringida a unos pocos años, hasta que los alumnos compartan los trucos y formas de conseguir la máxima puntuación en cada planta productiva.

Por este motivo, a comienzos de 2007, se decidió desarrollar en Tecnun (Universidad de Navarra) un simulador didáctico basado en la experiencia adquirida con el uso del simulador de Goldratt desde 1996. Las premisas para desarrollar la herramienta eran las siguientes:

- Se debería mejorar el entorno gráfico y la funcionalidad del programa, incorporando la utilización del ratón.
- Se desarrollaría en Java, un lenguaje que permitiría su difusión vía web, sin necesidad de instalaciones locales, salvo los requisitos de versiones de navegador y máquinas virtuales de Java.
- Se simplificarían algunas de las funcionalidades del simulador que no se empleaban en las prácticas por falta de tiempo o de interés en el aprendizaje, como el trabajo por lotes, la automatización de las decisiones de simulación, la variabilidad en los tiempos de producción o las averías en las máquinas.
- Se integraría con Microsoft Excel, para facilitar los cálculos y carga de datos en las últimas prácticas, como se verá en el epígrafe sobre su uso en la docencia.

- Se complementaría el desarrollo del simulador con una aplicación que permitiera, de forma gráfica y sencilla, desarrollar y compartir nuevas plantas productivas, almacenando su información en una base de datos.
- El resultado del proyecto desarrollado se denomina TOCNUN (Figura 1) y cuenta con dos aplicaciones distintas, una orientada a la simulación (TOCNUN Factory Simulator) y otra a la edición de plantas productivas (TOCNUN Factory Creator).

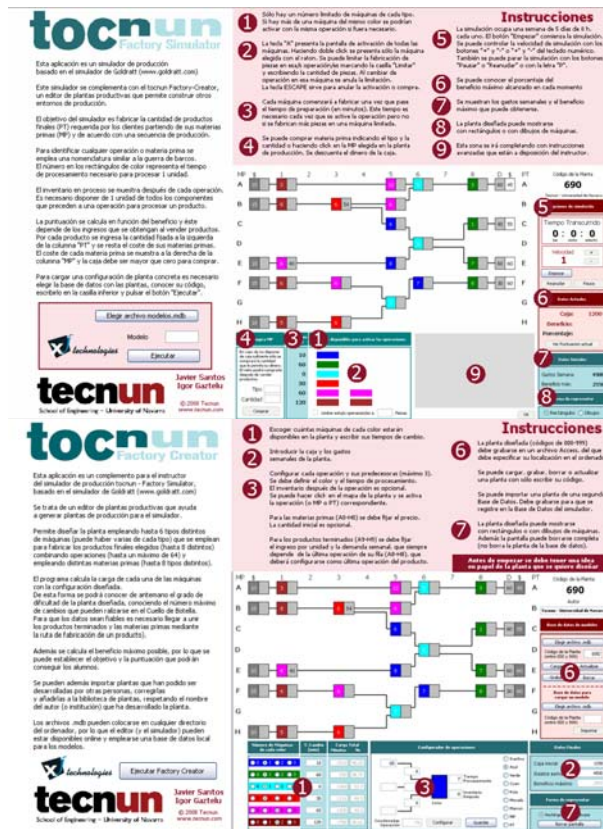


Figura 1. TOCNUN Factory Simulator y TOCNUN Factory Creator. Pantallas presentación

- Con TOCNUN Factory Simulator los alumnos podrán ver gráficamente las consecuencias de sus decisiones en el beneficio neto de una planta productiva y se podrán dar cuenta de cómo afecta que el recurso escaso (CCR) esté inactivo. En el simulador se pueden manejar las máquinas en tiempo real (activar o desactivar las máquinas manualmente) o fijar una secuencia de ejecución de trabajos en los recursos mediante Microsoft Excel.
- TOCNUN Factory Creator permite diseñar distintas configuraciones de tareas con diferentes materias primas y productos a fabricar. Se pueden variar los tiempos de ejecución de cada tarea, los tiempos de preparación de los recursos y los inventarios en proceso iniciales. Se tiene la posibilidad de guardar y cargar cada vez que se necesiten las diferentes configuraciones de plantas.

Ambas aplicaciones se han desarrollado en Java 1.6, empleando el software Anylogic (Borshchev y Filippov, 2004), un entorno de desarrollo de modelos de simulación que permite convertir los modelos en aplicaciones para navegadores de Internet. La elección de Anylogic está basada en tres motivos: la facilidad para disponer de una licencia educacional de este

software de simulación; la plataforma de desarrollo que la soporta, Open Source Eclipse (www.eclipse.org); y la posibilidad de emplear un entorno de desarrollo visual.

2. TOCNUN Factory Simulator

La figura 2 muestra la pantalla principal del simulador. El objetivo es fabricar la cantidad de productos finales (PT) requerida por los clientes partiendo de sus materias primas (MP) y de acuerdo con una secuencia de producción. Para identificar cualquier operación o materia prima se emplea una nomenclatura similar a la guerra de barcos. El número en cada recuadro de colores representa el tiempo necesario para procesar una unidad.

El inventario en proceso se muestra en un cuadro gris después de cada operación. Es necesario disponer de 1 unidad de todos los componentes que preceden a una operación para procesar un producto.

La puntuación se calcula en función del beneficio y éste depende de los ingresos que se obtengan al vender productos. Por cada producto se ingresa la cantidad fijada a la izquierda de la columna "PT" y se resta el coste de sus materias primas. El coste de cada materia prima se muestra a la derecha de la columna "MP" y la caja debe ser mayor que cero para comprar.

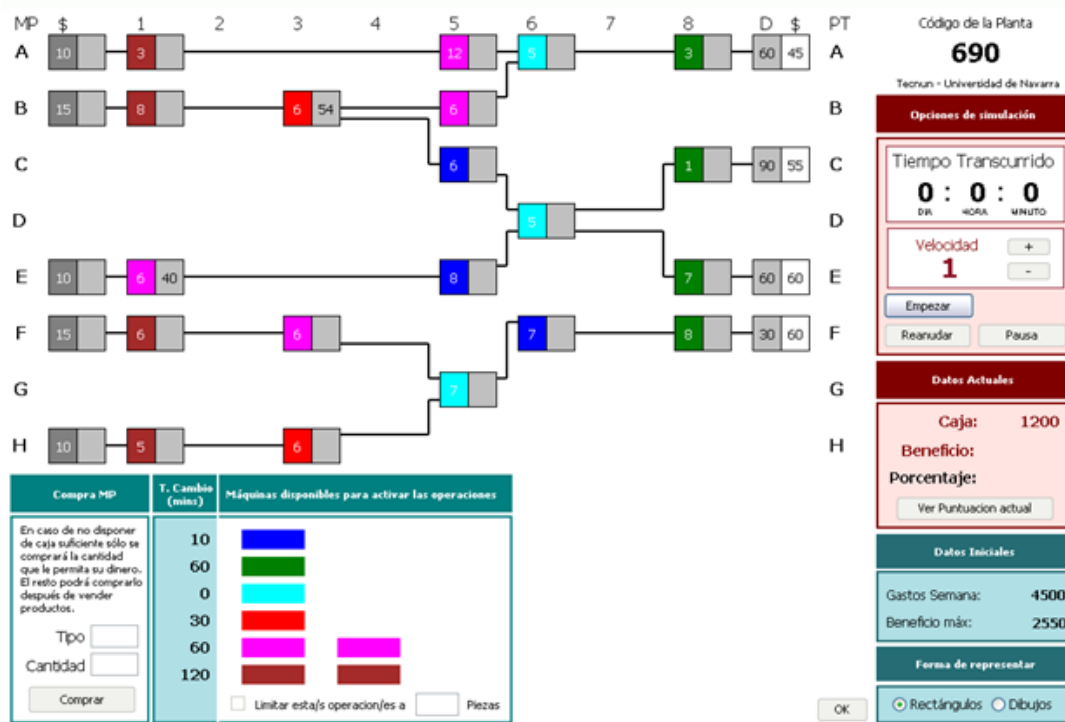


Figura 2. TOCNUN Factory Simulator. Pantalla principal

2.1. Instrucciones básicas del simulador

Sólo hay un número limitado de máquinas de cada tipo. Si hay más de una máquina del mismo color se podrían activar con la misma operación si fuera necesario.

La tecla "A" presenta la pantalla de activación de todas las máquinas (Figura 3). Haciendo doble click sobre una máquina se presenta sólo la máquina elegida con el ratón. En el recuadro debe escribirse la operación que quiere activarse y pulsar "enter".

T. Cambio (mins)	Máquinas disponibles para activar las operaciones (SU) Preparación; (P, PL o PS) Produciendo; (i, iL, iS) Inactiva	
15	PS	F5
120	P	F1 S C1
60	iS	A8 SU A6
15	PL	F7
0	i	B3
	<input type="checkbox"/> Limitar esta/s operacion/es a <input type="text"/> Piezas	

Figura 3. Detalle de la zona de máquinas con máquinas en distintos estados

Se puede limitar la fabricación de piezas en esa/s operación/es marcando la casilla "Limitar" y escribiendo la cantidad de piezas. Al cambiar de operación en esa máquina se anula la limitación. La tecla ESCAPE sirve para anular la activación o compra de materia prima.

Cada máquina comenzará a fabricar una vez que pase el tiempo de preparación (en minutos) representado a la izquierda de las máquinas. En ese momento la máquina se señala con las letras "SU". Este tiempo es necesario cada vez que se active la operación pero no si se fabrican más piezas en una máquina limitada.

Cuando la máquina está procesando se señala con "P", "PL" si se ha limitado la producción, o "PS" si se ha planificado (opción avanzada explicada en el uso del simulador). En caso de no disponer de componentes para procesar estando activada, se marcará con una "i", iL" o "iS" respectivamente, indicando al usuario su estado inactivo.

Se puede comprar materia prima pulsando la tecla "M" e indicando el tipo y la cantidad o haciendo click en la MP elegida en la planta de producción y escribir la cantidad requerida. Se descuenta el dinero de la caja.

La simulación ocupa una semana de 5 días de 8 horas cada uno. El botón "Empezar" comienza la simulación. Se puede controlar la velocidad de simulación con los botones "+" y "-" o las teclas "+" y "-" del teclado numérico. También se puede parar la simulación con los botones "Pausar" o "Reanudar" o con la letra "P".

Por otro lado, se puede conocer el porcentaje del beneficio máximo alcanzado en cada momento, los gastos semanales y el beneficio máximo que puede obtenerse.

La zona en blanco de la figura 2 se irá completando con instrucciones avanzadas que están a disposición del instructor. También se explican en el siguiente apartado sobre el uso docente del simulador.

3. Uso docente del simulador y del editor

Como se ha comentado, en el simulador no existe variabilidad en los tiempos de procesamiento. Así se evita que los alumnos acaquen a esta variabilidad el no haber conseguido el objetivo del beneficio máximo. Por ese mismo motivo las máquinas no se estropean. Además, si se dispone de caja suficiente, la materia prima se suministra de forma inmediata.

En este contexto, la forma de emplear esta herramienta en la docencia se concreta en 5 prácticas de 1 hora y media (incluyendo una pequeña explicación teórica) y una prueba

evaluada final. La experiencia con el simulador Selfsim recomienda hacer las prácticas por parejas.

El material docente relativo al uso del simulador, es decir, las dos aplicaciones, las transparencias y el contenido de cada clase, estará disponible a partir de septiembre de 2008 en la web de Organización de la Producción II, en el área de ingeniería del OCW de la Universidad de Navarra (<http://www.unav.es/ocw/orgproduccionII/default.html>).

3.1. Práctica 1. Empleando la intuición.

En esta práctica no se dispone de tiempo para pensar la estrategia. Sólo deben fabricarse los productos finales sabiendo que hay capacidad productiva para hacerlo. Las instrucciones del programa para esta práctica son las básicas que aparecen en la pantalla de presentación (Figura 1) y que se han descrito en el apartando anterior.

Para familiarizarse con el funcionamiento del programa, los 15 primeros minutos se lleva a cabo una simulación de prueba, seguida de la primera simulación completa, valorada según el porcentaje de beneficio conseguido. Ese será el punto de inicio para la mejora. Algunos alumnos muy intuitivos son capaces de obtener el máximo beneficio (vendiendo todos los productos demandados), pero no saben si podrían repetirlo con cualquier planta y en cualquier circunstancia.

En la explicación teórica, después de la práctica y de la discusión sobre los problemas encontrados en el desarrollo de la prueba, se presenta el marco donde surgió la Teoría de las Limitaciones y el concepto de cuello de botella, que se trabajará en la segunda práctica.

3.2. Práctica 2. Identificando el cuello de botella (CCR o CDB).

La explicación teórica, antes de la segunda práctica presenta los pasos 1 y 2 del DBR y las formas que existen para identificar el CDB de una planta productiva. No todos los recursos son igual de importantes y, por tanto, es necesario identificar aquel que tiene una mayor carga de trabajo.

Para evitar que los alumnos inviertan mucho tiempo realizando los cálculos de carga de los recursos de la planta en estudio, la tecla “Q” muestra un resumen de la carga teniendo en cuenta el inventario en proceso (Figura 4).

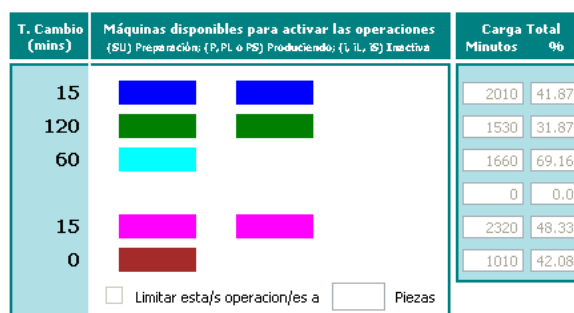


Figura 4. Carga de cada máquina según la configuración de la planta cargada en el simulador.

En esta práctica los alumnos intentarán evitar que el CDB se pare, aprovechando al máximo su capacidad y decidiendo cómo explotar esa limitación. Para ello se debe fijar un número de cambios que aproveche el tiempo restante entre la carga y la capacidad del recurso (Paso 2 de

la TOC). Es de esperar que los resultados mejoren, pero que no se alcance el máximo, ya que la estrategia seguida ha sido local para el recurso limitante, sin tener en cuenta otros recursos de la planta.

3.3. Práctica 3. Subordinar las compras al CDB.

El paso 3 del DBR recomienda fijar un buffer de tiempo para asegurar que el cuello de botella no se detenga. Una posible causa por la que no se ha conseguido el beneficio máximo en la planta es porque, aunque la política era que el cuello de botella no parase, los materiales no llegan a tiempo. También puede haber ocurrido que las compras de materia prima se retrasaran o incluso se olvidaran.

Por este motivo, se planificarán los lanzamientos (compra de MP) en la fábrica para que no se pare la limitación teniendo en cuenta un buffer de 8 horas (un día completo) para la compra de la materia prima necesaria. Es decir, sabiendo el minuto en que empezará a trabajar el cuello de botella con un producto, puede determinarse el momento de compra de sus componentes restando 8 horas a ese instante. En realidad no se dispondrá de un buffer de 8 horas porque se necesita un tiempo para conseguir que las unidades compradas lleguen delante del cuello de botella, pero de esta forma los cálculos se simplifican y se transmite fácilmente el concepto de buffer de tiempo desarrollado por Goldratt.

Estos cálculos deben hacerse empleando la plantilla de Microsoft Excel que acompaña al programa (Figura 5), de forma que, una vez determinada la secuencia y las compras necesarias, la tecla “Y” cargará esa secuencia en el simulador (Figura 5). El simulador permite planificar todas las máquinas, pero se recomienda que sólo se emplee y se fije la secuencia del CDB.

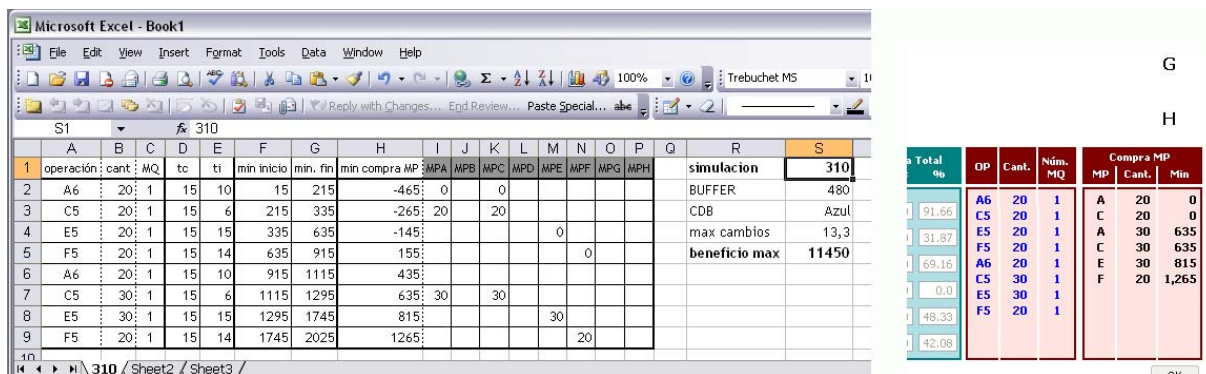


Figura 5. Integración del simulador con Microsoft Excel

Tras esta práctica, los resultados deberían ser los mejores, y conseguirse el beneficio máximo.

3.4. Práctica 4. Elevando la limitación.

Los pasos 4 y 5 de la TOC buscan elevar la capacidad del recurso limitante una vez que se ha conseguido aprovechar al máximo su capacidad. Para ello se cargará una planta diferente pero con la misma estructura productiva que la inicial (Figura 6), preparada de forma que la limitación original haya dejado de serlo y sea necesario repetir el proceso con una nueva máquinas. En este caso se ha añadido una nueva máquina del tipo 1 (Azul oscuro).

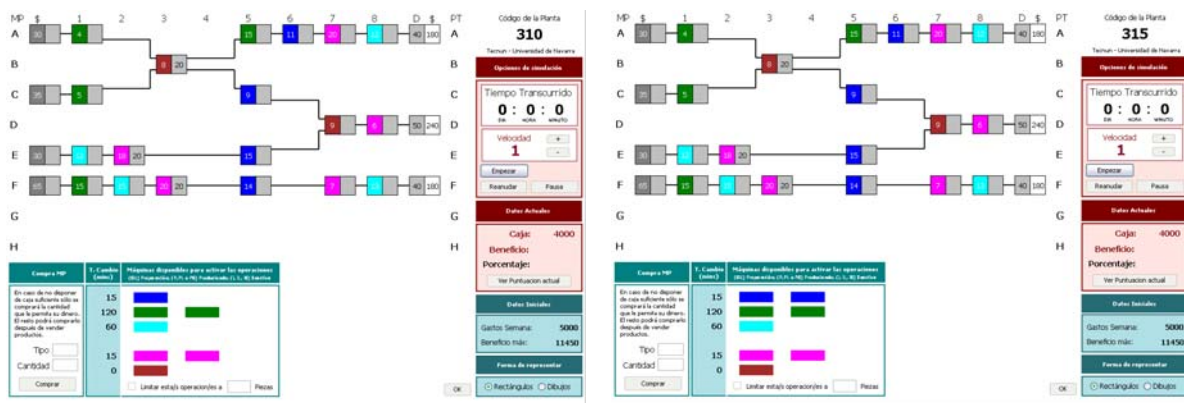


Figura 6. Configuraciones 310 y 315 preparadas para la estructura de prácticas propuesta

Para facilitar el aprendizaje se recomienda que la nueva máquina que limite la producción sea única, ya que, aunque el simulador lo permitiría, la secuencia de producción con dos máquinas es más difícil de definir.

3.5. Práctica 5. Aplicando lo aprendido.

Se trata de repetir todos los pasos explicados en alguna de las otras plantas que ya están definidas en el simulador y cuyo número irá creciendo si se ofrece la posibilidad a los alumnos de diseñar, como trabajo voluntario, nuevas plantas de producción.

3.6. Práctica 6. Prueba evaluada.

El profesor sustituirá el archivo mdb o colocará uno nuevo que incluya alguna planta inédita y que permitirá evaluar el aprendizaje de los alumnos. La nota se puede obtener empleando como referencia el porcentaje del beneficio total obtenido. Conocer al final de la prueba la nota de forma inmediata permite situar a la pareja de alumnos en la tesitura de tener que elegir, una vez terminada una simulación sin éxito, probar de nuevo renunciando a toda o parte de la nota obtenida. Se fomenta así la habilidad de negociación de los alumnos y convierte las prácticas en una especie de reto personal siempre que el valor relativo de la práctica en la nota final no sea muy alto. En el caso de Tecnun siempre se utiliza el valor de 1 punto sobre 10 en la nota final.

4. TOCNUN Factory Creator

El editor de plantas (Figura 8) permite diseñar la planta empleando hasta 6 tipos distintos de máquinas (puede haber hasta 3 de cada tipo) que se emplean para fabricar los productos finales elegidos (hasta 8 distintos) combinando operaciones (hasta un máximo de 64) y empleando distintas materias primas (hasta 8 tipos distintos).

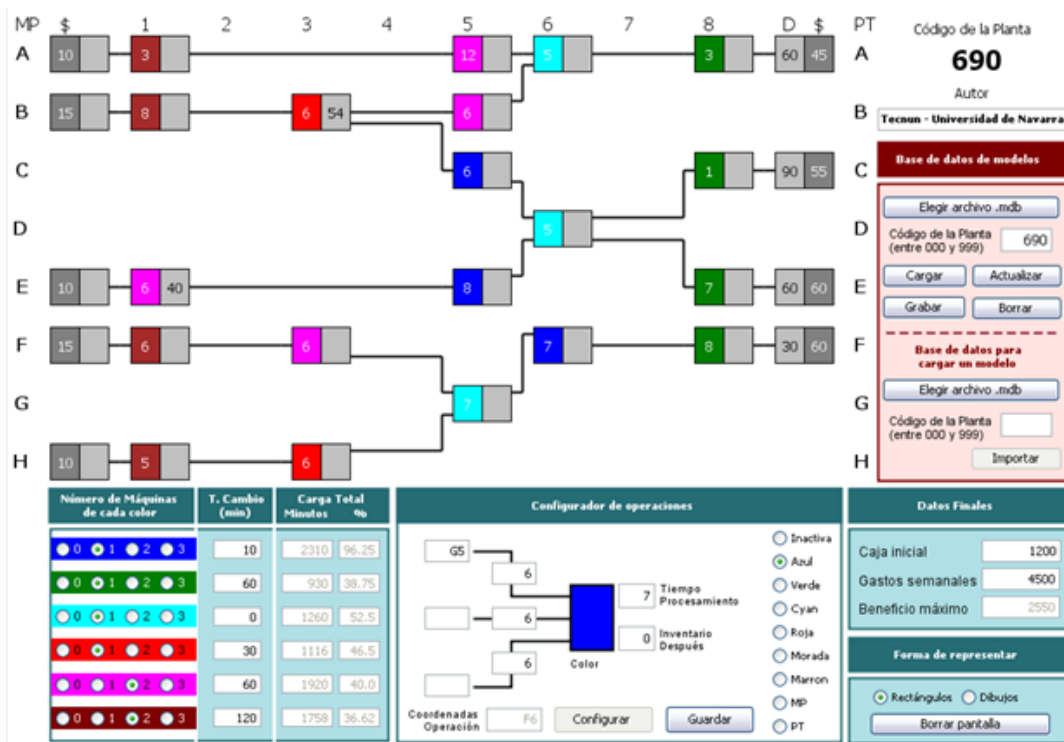


Figura 8. TOCNUN Factory Creator. Pantalla principal

El programa calcula la carga de cada una de las máquinas con la configuración diseñada. De esta forma se puede conocer de antemano el grado de dificultad de la planta diseñada y así determinar el número máximo de cambios que pueden realizarse en el cuello de botella. Para que los datos sean fiables es necesario llegar a unir los productos terminados y las materias primas mediante la ruta de fabricación de un producto.

Además se calcula el beneficio máximo posible, por lo que se puede establecer el objetivo y la puntuación que podrán conseguir los alumnos.

Se pueden además cargar plantas que han podido ser desarrolladas por otras personas, corregirlas y añadirlas a la biblioteca de plantas. El simulador incluye el nombre del autor (o institución) que ha desarrollado la planta. Para ello se emplean dos fuentes de bases de datos distintas Microsoft Access.

Estos archivos de Access pueden colocarse en cualquier directorio del ordenador, por lo que el editor (y el simulador) pueden estar disponibles online y emplear una base de datos local para los modelos.

4.1. Instrucciones del editor

En primer lugar se deben escoger cuántas máquinas de cada color estarán disponibles en la planta y escribir sus tiempos de cambio (el mismo para todas las operaciones realizadas por la máquina). También es conveniente introducir la caja (dinero disponible para comprar materia prima) y los gastos semanales de la planta.

A continuación, se tiene que configurar cada operación y sus predecesoras (máximo 3). Se debe definir el color y el tiempo de procesamiento. El inventario después de la operación es

opcional. Se puede escribir la localización fila-columna en la casilla “Configurar operación” o hacer click en el mapa de la planta para activar la operación (o MP o PT) correspondiente.

Además, se puede cambiar, para cada predecesora, la columna en la que se produce el cambio de fila, únicamente por motivos estéticos. El valor por defecto realiza este cambio justo antes de la operación.

Para las materias primas (A0-H0) se debe fijar el precio. La cantidad inicial es opcional. Para los productos terminados (A9-H9) se debe fijar el ingreso por unidad y la demanda semanal, que siempre dependerá de la última operación de su fila (A8-H8), que deberá configurarse como última operación del producto.

La planta diseñada (códigos de 000-999) debe grabarse en un archivo Microsoft Access, del que debe especificarse su localización en el ordenador cada vez que se arranca el editor. Se puede cargar, grabar, borrar o actualizar una planta con sólo escribir su código. Así resulta sencillo hacer modificaciones sobre plantas disponibles. Además, se puede importar una planta de una segunda Base de Datos, pero debe grabarse para que se registre en la Base de Datos del simulador.

5. Conclusión

TOCNUN Factory Simulator (junto con TOCNUN Factory Creator) cumple su propósito: enseñar de una manera práctica y sencilla las consecuencias de utilizar la TOC en una planta de producción. Es una herramienta muy útil para el profesor porque puede diseñar varios tipos de escenario para mostrar las diferentes situaciones que se podrían presentar en una planta de producción. Al haberse diseñado usando licencias de software educacional el simulador estará disponible para su difusión y utilización gratuita.

Referencias

BOE (2007). REAL DECRETO 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales. BOE 260, página 44037

Borshchev A. y Filippov A. AnyLogic. (2004) “Multi-Paradigm Simulation for Business, Engineering and Research”. *The 6th IIE Annual Simulation Solutions Conference*, March 15-16, Orlando, Florida, USA.

Chase R.B.; Aquilano N.J.; Jacobs F.R. (2000). *Administración de producción y operaciones*, 8ª ed. Irwin / McGraw-Hill.

Dominguez J.A.; García S.; Dominguez, M.A.; Ruiz, A.; Alvarez, M.J. (1995). *Dirección de Operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, McGraw-Hill

Goldratt, E.M. (1988). *La Carrera*. Ediciones Taular.

Goldratt, E.M. (1993). *El síndrome del pajar*. Diaz de Santos.

Goldratt, E.M. (1996). *Producción. Cómo mejorar con TOC*, Avraham Y. Goldratt Institute, New heaven

Goldratt, E.M. (2003). *Production the TOC way revised version*, Avraham Y. Goldratt Institute, New heaven

Haapasalo, Harri and Johanna Hyvönen (2001). "Simulating Business and Operations management – a Learning Environment for the Electronics Industry." *International Journal of Production Economics*, 73(3):261-272.

Kolb, D. A (1984). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Lewis, M. y Maylor, H. (2007). "Game playing and operations management education". *International Journal Of Production Economics*, 105:134.

Smeds, R. (1993). "Simulation for accelerated learning and development in industrial management". *Production Planning & Control*, 14(2):107.

