

# **Training in decision-making in manufacturing with simulation**

**Jaime A. Giraldo G.**

Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas, Colombia, [jaiagiraldog@unal.edu.co](mailto:jaiagiraldog@unal.edu.co)

**Omar D. Castrillon G.**

Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas, Colombia, [odcastrillong@unal.edu.co](mailto:odcastrillong@unal.edu.co)

**William A. Sarache C.**

Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Caldas, Colombia, [wasarachec@unal.edu.co](mailto:wasarachec@unal.edu.co)

## **RESUMEN**

Los procesos de entrenamiento industrial, han adquirido un rol cada vez más crucial en las empresas. Los resultados de estos procesos, se potencian enormemente con la incorporación de la simulación a los mismos. Los seres humanos somos expertos en aprender desde el futuro. En general, nuestra mente imagina y evalúa los impactos de nuestras acciones antes de pasar a la acción. Luego de esa evaluación, elegimos aquella intervención que generará –según nuestra estimación– el efecto deseado (toma de decisiones). Luego de actuar, la realidad confirma o refuta nuestra simulación. En ese ir y venir de comparar nuestra lectura de lo que imaginamos que podría suceder con lo que “realmente” sucede, se genera aprendizaje. A partir de este argumento, se pretende presentar un modelo de simulación de un sistema de producción que permite a los usuarios entrenarse en toma de decisiones relacionadas con: el nivel de producción, tiempo de ciclo, costo y tasas de utilización de recursos. Para ello, el usuario puede crear diferentes escenarios, usando una interfaz que le permite configurar los valores de diversos parámetros de operación del sistema, simularlos y visualizar cuadros y gráficos de rendimiento del sistema de producción.

**Palabras clave:** Sistema de producción, simulación, entrenamiento industrial, toma de decisiones.

## **ABSTRACT**

The processes of industrial training, have acquired an increasingly crucial role in business. The results of these processes are enhanced greatly with the addition of simulation to them. Humans are experts in learning from the future. In general, the mind imagines and assesses the impacts of our actions before going into action. After this evaluation, we chose the one intervention that will, according to our estimation, the desired effect (decision making). After acting, reality confirms or disproves our simulation. In this coming and going to compare our reading of what they imagine might happen with what "really" happens, there is learning. From this argument, it is intended to present a simulation model of a production system that allows users to train in making decisions related to the level of production, cycle time, cost and resource utilization rates. For this, the user can create different scenarios, using an interface that allows you to set the values of various parameters of system performance, simulate and display pictures and graphics performance of the production system.

**Keywords:** Production system, simulation, industrial training, decision-making.

## 1. INTRODUCCION

En el documento de prospectiva **Visión Colombia II Centenario: 2019**, en su capítulo 3, la meta 4 se refiere a “... incrementar la capacidad innovativa y emprendedora de las empresas, empresarios y trabajadores, mediante la formación del recurso humano para la competitividad: estrechando la relación entre educación y trabajo; fortaleciendo el vínculo escuela-empresa”. En el mundo actual, los países han comprendido que el desafío consiste en lograr una mayor agregación de valor y conocimiento en procesos de producción y, para ello, la ciencia, la tecnología y la innovación son indispensables. Este mayor valor se logra si se presenta la posibilidad de hacer pruebas y tests antes de invertir tiempo y capital en un proceso de producción, para lo cual es extremadamente atractiva la tecnología soportada en simulación por computador (Banks et al., 2004).

Marcos Cristal y Miriam Kurlat afirmaron en el marco del XIII Congreso Nacional de Desarrollo y Capacitación, Buenos Aires, Argentina, de diciembre 2002 que: *“en muchas actividades orientadas a la acción (complejas como la medicina o más mundanas como andar en bicicleta), el aprendizaje no se alcanza leyendo libros, ni escuchando a gurúes. En este tipo de actividades incluimos al aprendizaje para manejar negocios. Si a la lectura o los gurúes, le agregamos el análisis de casos, el proceso se enriquece; pero no es suficiente. Para todas estas actividades el aprendizaje real se completa en la práctica, a través de la experiencia. Pero todos conocemos el costo y los tiempos que requiere el aprender actuando sobre la realidad. Entonces el gran desafío: ¿Cómo acumular experiencia “real” sin el costo de experimentar en la realidad? ¿Cómo aprender del futuro antes de entrar en él? ¿Cómo “aprender-haciendo” antes de hacer?”*.

Hoy, el avance en tecnologías de la información, sumado a desarrollos en temas didácticos, permite recrear con facilidad, ámbitos “reales” para el aprendizaje práctico. Estos avances posibilitan la acumulación de experiencia “real” a través de la realidad virtual, dando lugar a lo que se conoce como “Learning by Doing”, aprender-haciendo, con resultados superiores, tanto en términos de aprendizaje, como de aceleración de tiempos y reducción de costos, según lo dice reiteradamente (Senge, 1993) en sus trabajos, para analizar el uso de la simulación y modelización.

Según (Shannon, 1988)), un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea, de forma diferente a la de la identidad misma. Usualmente, su propósito es ayudar a explicar, entender o mejorar un sistema. Se considera que las funciones de un modelo son la predicción y la comparación para proporcionar una manera lógica de predecir los resultados que siguen las acciones alternativas, e indicar una preferencia entre ellas. (Forrester, 1963) en su libro *“Dinámica Industrial”* señala que los físicos están tratando, con gran éxito, de modelar fenómenos naturales, mientras que los ingenieros están tratando de modelar sistemas determinados por el hombre. (Kelton y Law, 2007) categorizan los modelos en: físicos y matemáticos. A los modelos matemáticos los subdividen en modelos analíticos y en modelos de simulación.

Al aproximarse a la clase de modelos que se requiere para abordar el problema de construir un modelo que represente un sistema de producción, los autores (Kelton y Law, 2007) (17), (Banks et. al., 2004), (Pritsker, 2000), (Pegden et. al, 1995), están de acuerdo en que se ha de considerar el modelamiento de sistemas complejos mediante simulación si:

- No existe una completa formulación matemática del problema o los métodos analíticos para resolver el modelo matemático no se han desarrollado aun.
- Se desea observar el trayecto histórico simulado del sistema sobre un periodo, además de estimar ciertos parámetros.
- La simulación puede ser la única posibilidad, debido a la dificultad para realizar experimentos y observar fenómenos en su entorno real. Para el sector industrial experimentar con el sistema real:
  - Es costoso y difícil interrumpir las operaciones.
  - El hecho de observar a la gente puede modificar su comportamiento.
  - Es difícil mantener las mismas condiciones operativas para cada repetición o corrida del experimento

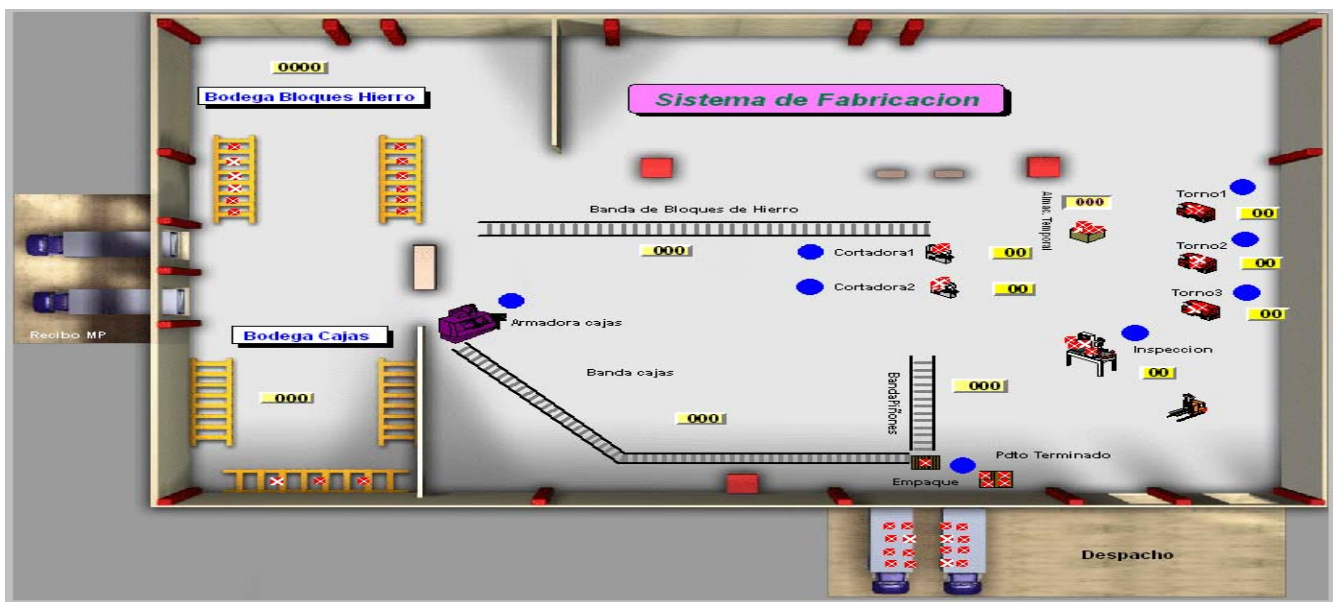
- Obtener el mismo tamaño de muestra ( y por tanto su significancia estadística) puede requerir más tiempo y ser más costoso
- Quizás no pueda ser posible explorar muchos tipos de alternativas en la experimentación
- Se requiere la aceleración del tiempo para sistemas que exigen de largo tiempo para realizarse

En relación con la experimentación en simulación discreta, en (Montgomery, 2004) anota que, en estudios con simulación discreta podemos encontrar a partir de varios parámetros y suposiciones estructurales cuales tienen un mayor efecto sobre una medida de rendimiento, o cual conjunto de especificaciones del modelo conducen a un rendimiento óptimo.

Teniendo muy presente estos conceptos sobre aprendizaje y modelamiento con simulación, la presente ponencia inicia describiendo los componentes estructurales de un sistema de producción y su cadena de suministro de materia prima. Seguidamente se muestra la estructura del sistema informático de soporte a un modelo de simulación del sistema de producción y suministro. Posteriormente se describe como el usuario puede modificar algunos parámetros del sistema, construyendo de esta manera escenarios y simular su operación. Finalmente se muestran las medidas de rendimiento obtenidas con la simulación con el objetivo que el usuario desarrolle habilidades para la toma de decisiones en el mundo real.

## 1. EL SISTEMA DE PRODUCCION Y SUMINISTRO

El sistema de producción que se simula corresponde a una empresa metalmecánica cuyo producto principal lo constituye un juego de 4 piñones para vehículos tipo camión. En la Figura 1 se muestra el diagrama de la planta según se distribuyen a escala, los centros de trabajo, almacenamientos, equipos de transporte, accesos, etc. El sistema básicamente consiste de dos bodegas de materia prima, tres bandas transportadoras, dos máquinas cortadoras, tres tornos, dos puntos de inspección, un almacén de producto en proceso, una máquina armadora de cajas, una sección de empaque y un área de despacho. Para efectuar el proceso de fabricación, se cuenta con dos líneas de producción. En la primera línea, los operarios empleando bandas van transportando los bloques de hierro hasta el corte, luego el torneado y finalmente el ensamble de los piñones obtenidos con las cajas de empaque. La segunda línea, a partir de pacas de cartón, procede a armar las cajas, se transportan hasta el empaque para ser ensambladas con los piñones obtenidos en la primera línea. Finalmente los montacargas llevan el producto a los camiones de despacho, para ser enviado a los clientes.



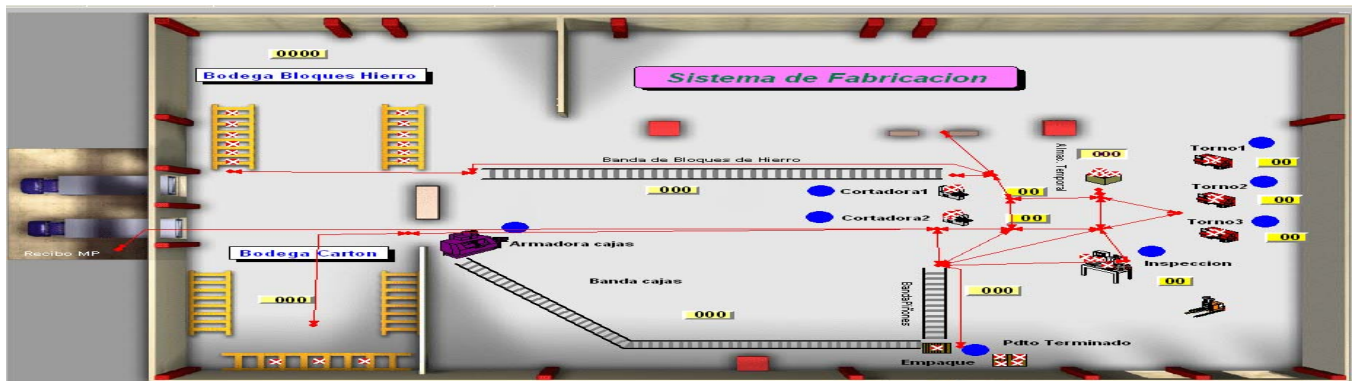
**Figura 1: Distribución en planta del sistema de producción. Fuente: elaboración propia.**

En la Figura 2 se muestra el encadenamiento de la planta de fabricación con el proveedor de cartón para la elaboración de las cajas de empaque y el proveedor de bloques de hierro para la elaboración de los piñones. Igualmente se muestra el centro de almacenamiento de estas materias primas. El proveedor de bloques procesa sus productos de acuerdo a los requerimientos de la planta, mediante sus propios medios de transporte entrega estos a la bodega principal, en la cual se efectúa un alistamiento previo al ingreso a la planta de producción. Similar procedimiento realiza el proveedor de cartón.



**Figura 2: Cadena de abastecimiento. Fuente: elaboración propia.**

El sistema puede emplear un número de operarios variable (entre 2 y 10), el cual es establecido por el usuario. La figura 3 muestra los trayectos (en color rojo) a través de los cuales se mueven los operarios.



**Figura 3: Especificaciones de movimiento de los operarios. Fuente: elaboración propia.**

Igualmente el sistema puede emplear un número de montacargas variable (entre 1 y 3), el cual es establecido por el usuario. La figura 4 muestra los trayectos (en color azul) a través de los cuales se mueven los montacargas.

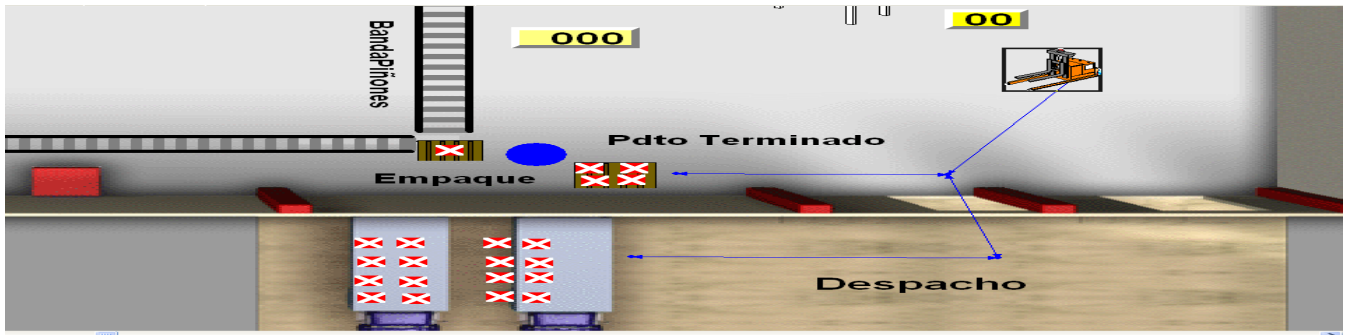


Figura 4: Especificaciones de movimiento de los montacargas. Fuente: elaboración propia.

## 2. EL SISTEMA INFORMÁTICO DE SOPORTE

El sistema informático se ha estructurado en tres niveles como se muestra en la Figura 5. En el nivel de presentación, se ofrece al usuario un menú desarrollado mediante un formulario MS-ACCESS 2007, a través del cual se le presenta al usuario la forma de fijar algunos parámetros de operación del sistema de producción y desplegar la simulación y las medidas de rendimiento generadas.

En el nivel de procesamiento, se escribió en código *Visual Basic for Application (VBA)* las instrucciones necesarias que a partir de los parámetros seleccionados en la capa de presentación, modifican propiedades y activan métodos de los objetos del modelo de simulación escrito en el software de simulación ProModel.

En el nivel de almacenamiento se emplean bases de datos Excel (manipulables por el usuario) que contienen los restantes parámetros de operación del sistema, los cuales son leídos automáticamente por el modelo de simulación ProModel.

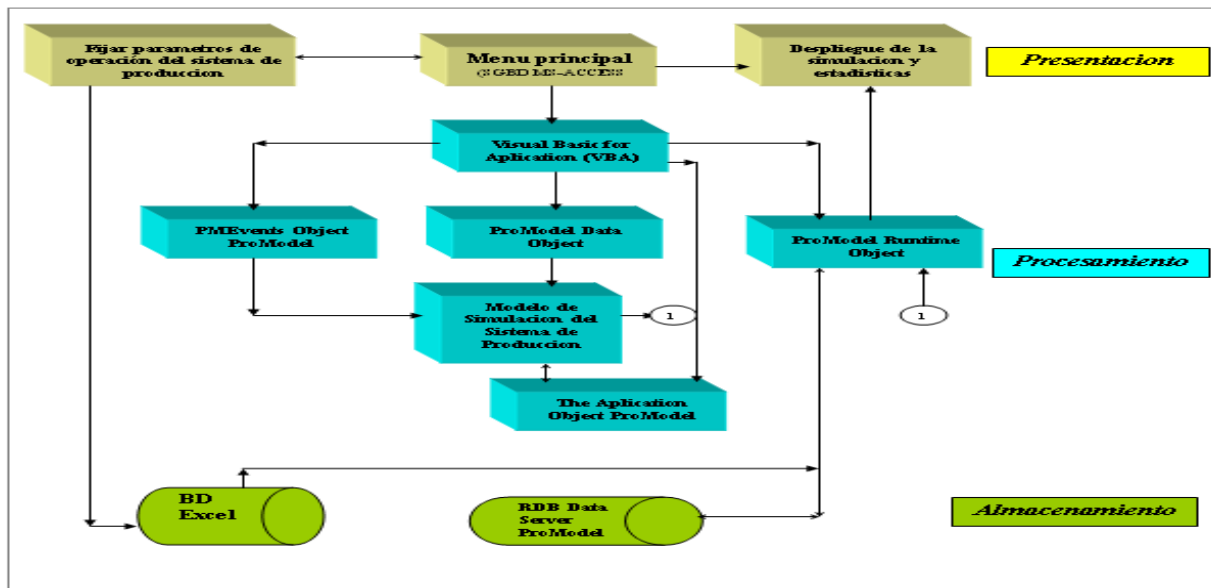


Figura 5: Arquitectura del sistema informático de soporte. Fuente: elaboración propia.

### 3. SIMULANDO EL SISTEMA DE PRODUCCION

A través de la interfaz mostrada en la Figura 6, el usuario puede establecer los escenarios a simular. Cada escenario simulado, durante una longitud de corrida y numero de replicas dados y a partir de unos parámetros estructurales y de datos de operación, dará como salida diversas medidas de rendimiento del sistema, que permitirán al usuario “entrenarse” para la toma de decisiones en el mundo real. La idea central es que el usuario evalúe los escenarios en términos de las variables de rendimiento: nivel de producción alcanzado, tiempo de ciclo de fabricacion, costo de produccion y tasas de utilización de recursos (maquinas, operarios, almacenamientos). Se espera que a medida que el simula diversas configuraciones de operación, logre mejorar su toma de decisiones, basado en las medidas de rendimiento del sistema modelado.

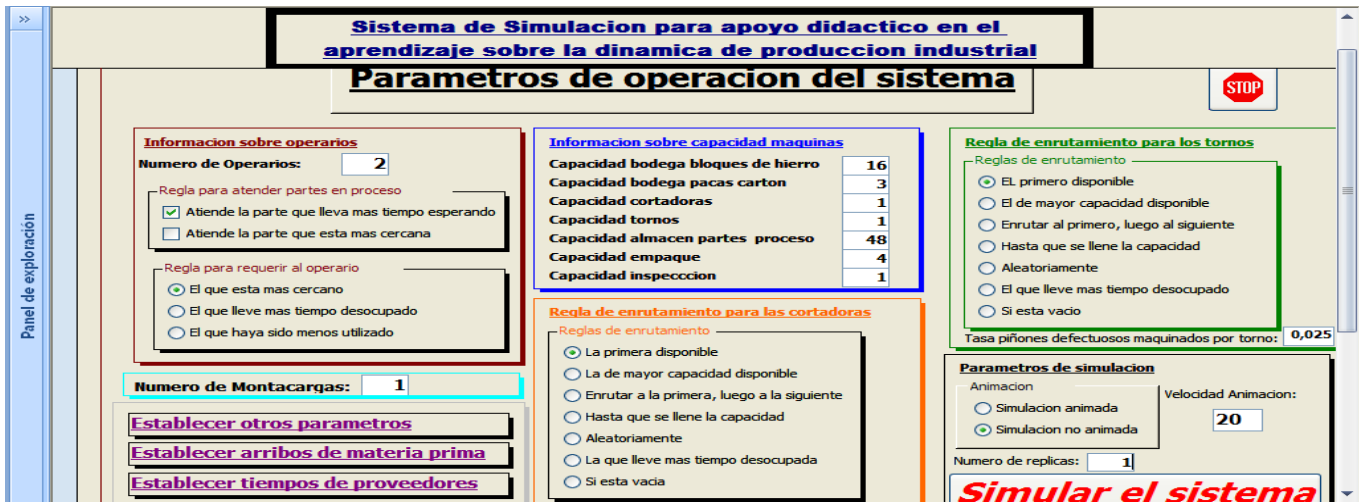


Figura 6: Interfaz usuario-sistema. Fuente: elaboración propia.

Recorriendo la interfaz de arriba a abajo y de izquierda a derecha, se explica a continuación los parámetros que puede establecer el usuario y bajo los cuales operara la simulación.

**Información sobre operarios:** Se puede establecer el número de operarios y las reglas que siguen estos para atender las partes en proceso y de requerimiento de estos operarios.

**Información sobre montacargas:** Permite fijar el numero de estos a emplear.

**Establecer otros parámetros:** Al activar esta opción se abre automáticamente varias hojas Excel que permiten manipular los parámetros de operación del sistema, con valores por omisión.

Mediante la Tabla 1 se pueden fijar los tiempos (en minutos) que emplean las maquinas u operarios para procesar las partes.

Tabla 1: Tiempos de operación de equipos y operarios.

Equipo/Operario	Parte a operar	Tiempo (minutos)	Estacion de W
Cortadora	Bloque pequeño	3	Cortadora
Cortadora	Bloque grande	5.5	Cortadora
Torno	Bloque cortado	2	Torno
Inspector	Piñon	0.75	Inspeccion
Empacador	Caja y piñones	1.2	Empaque
Armadora Cajas	Carton	2.5	Armadora de cajas

A través de la Tabla 2 se pueden establecer los tiempos (en minutos) que emplean los operarios para moverse entre estaciones de trabajo.



**Tabla 2: Tiempos de movimiento de operarios.**

Desde	Hasta	Tiempo (minutos)
Bodega bloques hierro	Banda bloques	2
Banda bloques	Cortadora	0.2
Cortadora	Torno	0.3
Cortadora	Almacenamiento	0.1
Almacenamiento	Torno	0.1
Torno	Inspeccion	0.1
Inspeccion	Banda piñones	0.15
Inspeccion	Almacenamiento	0.2
Banda piñones	Empaque	0.1
Bodega Pacas Carton	ArmadoraCajas	2

Mediante la Tabla 3 se pueden fijar los tiempos entre mantenimientos (en horas o unidades procesadas) y tiempos de parada (en minutos) de las maquinas y equipo de transporte.

**Tabla 3: Parámetros paradas de maquinas.**

Equipo	Tiempo entre Mantenimientos (horas)	Duracion mantenimiento (minutos)	Unidades procesadas entre mantenimientos	Duracion mantenimiento (minutos)
Bandas transportadoras	36	30	0	0
Cortadoras	24	20	100	30
Tornos	48	45	120	25
Armadora cajas	60	25	800	30

A través de la Tabla 4 se pueden establecer los costos de materiales, mano de obra y uso de equipos.

**Tabla 4: Costos de materiales, mano de obra y uso de equipos.**

Equipo/Operario/Materia prima	Costo(\$)	Medida
Bloque hierro grande	5000	Unidad
Bloque hierro pequeño	2800	Unidad
Paca de carton	7500	Unidad
Cortadora	15000	Hora uso
Torno	25000	Hora uso
Armadora Cajas	20000	Hora uso
Banda transportadora	18000	Hora uso
Operario	4500	Hora uso
Montacargas	18000	Hora uso

**Establecer arribos de materias primas:** La Tabla 5 permite establecer el arribo de la materia prima desde los proveedores hasta la bodega principal en términos de material, lugar de arribo, cantidad cada vez, desde que momento, numero de arribos y frecuencia de los mismos.

**Tabla 5: Configuración de los arribos de materia prima.**

Materia Prima	Lugar Arribo	Cantidad	Primer	Numero Arribos	Frecuencia
---------------	--------------	----------	--------	----------------	------------

		cada vez	tiempo		
Metal	Bodega principal	10	0	20	E(2.5) hr
Carton	Bodega principal	5	0	15	E(10) hr

**Establecer tiempos de proveedores:** La Tabla 6 le permite al usuario fijar una estimación del tiempo requerido por cada proveedor para suministrar a la bodega principal un pedido de materia prima, dado en minutos. Para el caso se ha fijado tiempos aleatorios distribuidos según una distribución de probabilidad triangular con sus parámetros: mínimo, moda y máximo. Igualmente se puede fijar el tiempo de alistamiento de la materia prima previo al ingreso a la planta, que para el caso se ha fijado según un tiempo distribuido normalmente, a partir de la media y la desviación estándar. Podría simularse otras distribuciones: poisson, exponencial, erlang, etc.

**Tabla 6: Tiempos de proveedores y alistamiento**

Proveedor	Metal	Carton	BloqueHierro
Proveedor de Bloques Hierro	T(3,8,12)		
Proveedor de Carton		T(50,64,90)	
Bodega Principal		N(25,5)	N(40,3)

**Información sobre capacidades de maquinas:** Según muestra la Figura 6, le es permitido al usuario establecer la capacidad de las maquinas y centros de almacenamiento en términos del número de piezas que puede procesar o almacenar.

**Reglas de enrutamiento hacia las cortadoras y tornos:** Según muestra la Figura 6, se puede elegir entre varias reglas para enrutar las piezas hacia estas maquinas.

**Tasa de piñones defectuosos:** un valor que denota el porcentaje de piñones que salen defectuosos del torno.

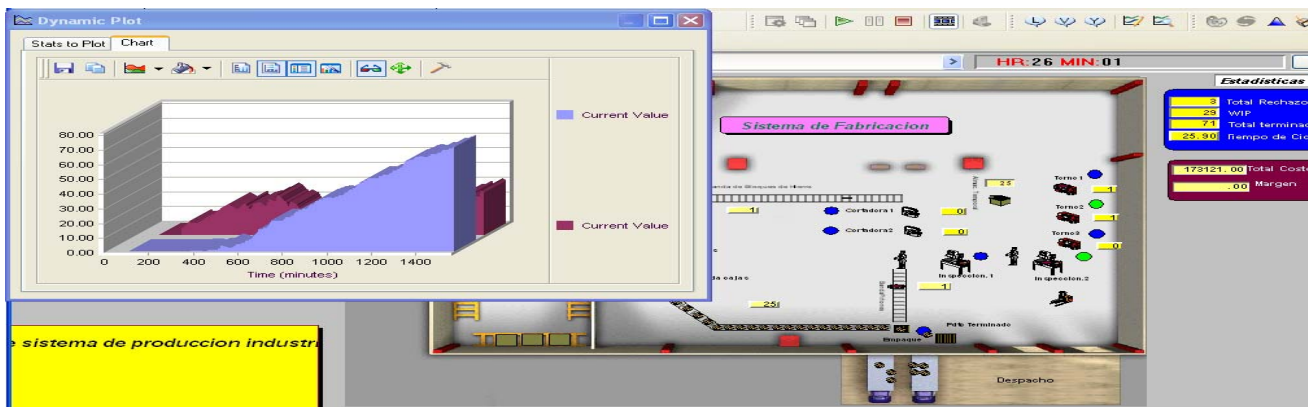
**Parámetros de la simulación:** permite establecer el número de replicas, si se animara la simulación y la longitud de corrida.

#### 4. MIDIENDO EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Considerando como escenario los parámetros y datos de operación dados por omisión en la interfaz de la Figura 6 y Tablas 1 a 6, y bajo la consideración de una longitud de corrida de 72 horas, se obtiene, entre otras, las siguientes medidas de rendimiento en la operación del sistema.

**Medidas de rendimiento generales:** A medida que la simulación transcurre se muestra constantemente en el recuadro azul de la Figura 7: numero de productos terminados, tiempo de ciclo de fabricación, numero de productos defectuosos e inventario en proceso. En el recuadro rojo de la Figura 7, se muestra el costo total de producción. Igualmente se muestra un grafico de tendencia en tiempo “real” que muestra el nivel de WIP en cada una de las líneas de producción.





**Figura 7: Visualización de nivel de producción, tiempo de ciclo, costo y WIP alcanzados a medida que se simula.**

**Tasas de utilización de recursos:** terminada la simulación se pueden obtener reportes como los siguientes:

En la Figura 8 se muestra por cada máquina o lugar de almacenamiento el tiempo de programación, la capacidad, el total de entradas, el contenido promedio y el porcentaje de utilización.

modelodidacticoV15.MOD (Normal Run - Rep. 1)					
Name	Scheduled Time (HR)	Capacity	Total Entries	Avg Contents	% Utilization
BodegaBloquesHierro	72.0	16.0	57.0	15.3	95.9
BandaBloques	70.7	999999.0	71.0	0.5	0.7
Cortadora 1	70.7	1.0	59.0	0.3	33.3
Cortadora 2	70.8	1.0	11.0	0.1	7.0
Cortadora	141.6	2.0	70.0	0.2	20.1
AlmacenamientoProductoEnProceso	72.0	999999.0	267.0	24.1	0.0
Torno 1	70.7	1.0	82.0	0.7	65.6
Torno 2	70.4	1.0	82.0	0.7	65.1
Torno 3	70.5	1.0	80.0	0.7	68.3
Torno	211.7	3.0	244.0	0.7	66.6
BandaPifones	71.2	999999.0	231.0	2.3	47.5
Empaque	72.0	4.0	229.0	0.1	3.3
Inspeccion 1	72.0	1.0	122.0	0.6	56.4
Inspeccion 2	72.0	1.0	119.0	0.5	49.2
Inspeccion	144.0	2.0	241.0	0.5	52.8
BodegaPaquetesCarton	72.0	3.0	20.0	0.7	69.6
ArmadoraCajas	70.9	1.0	17.0	0.7	74.4
BandaCajas	71.0	999999.0	254.0	21.2	86.5
Ensamble	72.0	1.0	229.0	0.9	89.5
CamionDespacho	72.0	16.0	228.0	7.5	46.5
ProveedorBloquesHierro	72.0	999999.0	400.0	7.2	0.0
TransportadorBloqueHierro	72.0	999999.0	24.0	3.4	0.0
ProveedorCarton	72.0	999999.0	105.0	61.1	0.0
TransportadorCarton	72.0	999999.0	65.0	0.1	0.0
BodegaPrincipal	72.0	999999.0	80.0	32.9	0.0

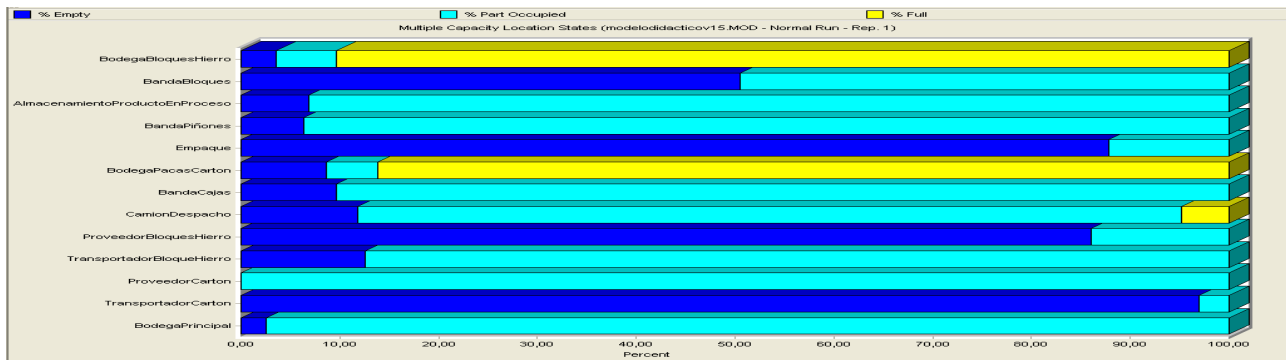
**Figura 8: Tasas de utilización de maquinas y almacenamientos.**

En la Figura 9 se muestra por cada operario y montacarga el tiempo de programación, el porcentaje de utilización, el porcentaje de tiempo viajando para ser usado y el porcentaje de tiempo desocupado.

Name	Scheduled Time (HR)	% In Use	% Travel To Use	% Travel To Park	% Idle	% Down
Operario 1	72.0	31.9	63.2	0.3	4.6	0.0
Operario 2	72.0	33.2	61.4	0.0	5.4	0.0
Operario	144.0	32.6	62.3	0.1	5.0	0.0
Montacarga	72.0	9.8	6.1	5.8	78.3	0.0

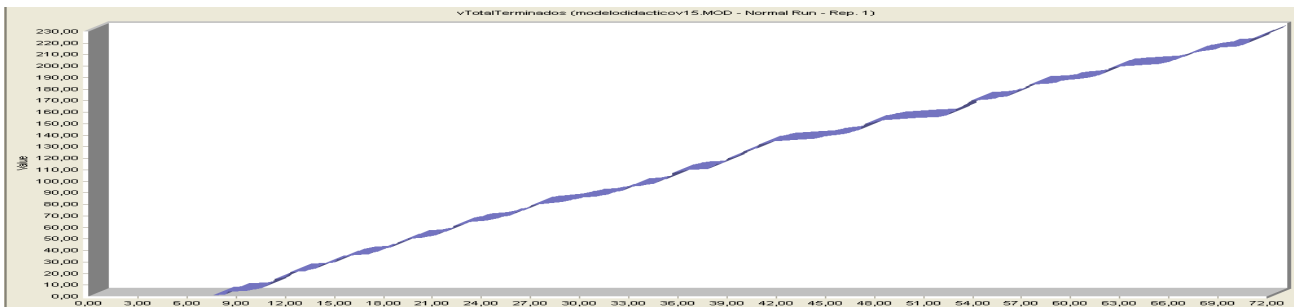
**Figura 9: Tasas de utilización de maquinas y almacenamientos.**

En la Figura 10 se muestra gráficamente por cada centro de trabajo los porcentajes de tiempo: desocupado (azul oscuro), a full capacidad (amarillo) y a parcial capacidad (azul claro).



**Figura 10: Tasas de utilización de maquinas y almacenamientos.**

Finalmente en la En la Figura 11 se muestra gráficamente la evolución en el tiempo del nivel de producción alcanzado.



**Figura 11: Nivel de producción.**

## REFERENCES

- Banks J.; Carson J.; Barry L. N. & Nicol D. (2004): *Discrete-Event System Simulation*. Fourth Edition. Prentice Hall. N.Y.
- Forrester, J. (1961): *Industrial Dynamics*. New York: MIT Press and Wiley.
- Kelton, W. D. & Law M. A., (2007): *Simulation modeling and analysis*. 4a edicion. McGrawHill-Industrial engineering series. Singapore.
- Montgomery D. C. (2003): *Design and Analysis of Experiments*. Ed. John Wiley & Sons. 2a Edicion.
- Pedgen, C.D.; Shannon R.E. & Sadowski (1995): *Introduction to Simulation Using SIMAN*, Second Ed, McGraw-Hill, New York.
- Pritsker, A.A.B. & Reilly J.J. (2000): *Simulation with Visual and AweSim*. Second Ed. John Wiley. New York.
- SENGE, P. (1993); *La quinta disciplina*. Ed. Granika, Buenos Aires.
- Shannon, E. R. (1988): *Simulación de Sistemas*. 1ª Ed. Editorial Trillas. México.

## Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.

