

# El enfoque de sistemas para la aplicación de la manufactura esbelta

**Yolanda Juárez-López<sup>1</sup>**  
**Jorge Rojas-Ramírez<sup>2</sup>**  
**Joselito Medina-Marín<sup>1</sup>**  
**Aurora Pérez-Rojas<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro de Investigación Avanzada en Ingeniería Industrial,  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,  
Mineral de la Reforma, Hidalgo,  
MEXICO.

<sup>2</sup>Posgrado en Ingeniería de Sistemas,  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación,  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,  
Instituto Politécnico Nacional,  
Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos',  
México DF, CP 07738,  
MEXICO.

correo electrónico (email): yolandaj@uaeh.reduaeh.mx  
jrojasr@ipn.mx  
jmedina@uaeh.edu.mx  
auropr@uaeh.edu.mx

Recibido el 13 de mayo de 2010; aceptado el 30 de noviembre de 2010.

## 1. Resumen

El enfoque de sistemas, por su potencial para apoyar conceptualmente la solución de problemas complejos en los dominios más diversos, es considerado de gran utilidad para guiar la aplicación de propuestas de mejora en organizaciones reales. Los sistemas de producción han evolucionado en los criterios de operación, de las decisiones del propio sistema a las que toman en cuenta a los usuarios de la producción, como en el pensamiento esbelto. En este contexto, se presenta el estudio de un sistema de manufactura, que se simula y se analiza para mostrar las relaciones entre parámetros y medidas de desempeño. Con él se comprueban los aspectos de complejidad en elementos y en interacciones del sistema. Se verifica así que es necesari-

rio el enfoque de sistemas para la formulación de un modelo de mejora dirigido a la empresa mexicana sobre bases esbeltas.

**Palabras clave:** enfoque de sistemas, manufactura esbelta, medidas de desempeño, simulación, sistemas de producción.

## 2. Abstract (The Systems Approach for Lean Manufacturing Application)

The systems approach, due to the potential to conceptually support the solution of complex problems in the most diverse fields, is very useful to guide the application of improvement proposals of actual organizations. In production systems an evolution in operational criteria has occurred, from the system-centered decisions to those taking into account the product customers, as lean thinking. With this background, the study of a manufacturing system is presented. It is simulated and analyzed to show the relationships between parameters and performance. This illustrates complexity aspects in system elements and interactions. A conclusion is stated about the need to include the systems approach in the proposal of a lean-based improvement model for Mexican enterprises.

**Key words:** lean production, manufacturing systems, performance criteria, simulation, systems approach.

## 3. Introducción

En este artículo se lleva a cabo un análisis de la administración del proceso en los sistemas de manufactura, con el objeto de resaltar los beneficios que el enfoque de sistemas aporta para mejorar la toma de decisiones. Esta aportación es necesaria, puesto que se trata de una organización de alta complejidad, con fuertes interacciones entre sus elementos, una amplia diversidad de puntos de decisión y variedad en la definición de las medidas para calificar su desempeño.

El trabajo proviene de un proyecto de investigación sobre la aplicación del paradigma de la manufactura esbelta a empresas en México, por la necesidad de precisar las ideas sistémicas de la propuesta sobre generalización y complejidad [1]. El valor de las soluciones está en función de lo espe-

cífico o general de los sistemas estudiados, de las relaciones de linealidad y recursividad entre los elementos de aquéllos y de la aplicación de los puntos de control de los procesos.

El pensamiento esbelto, de origen japonés y actualmente a disposición del mundo occidental [2], se fundamenta en la eliminación de todo desperdicio a lo largo del proceso de producción. Esta característica ofrece un gran interés para ser analizada bajo el enfoque de sistemas y volverla operativa en una guía de aplicación.

Como ilustración de las modificaciones potenciales para volver esbeltos a los procesos, se describe un ejemplo de sistema de producción de vehículos, que al inicio exhibe los desperdicios y su modificación mediante la propuesta, se experimenta en un simulador de procesos de manufactura, con cuyos resultados se evalúa su impacto.

#### 4. El enfoque de sistemas y la producción

El conocimiento de los sistemas de producción no es fácil de generalizar, pues cada organización real posee características propias, de manera que se justifica profundizarlo bajo el enfoque sistémico [3].

A pesar de lo sencillo que es comprender un proceso de transformación como el de la Fig. 1(a), mediante el cual se obtiene un producto útil al conjugar materiales, maquinaria, personal, energía e información tecnológica, la expresión que adquiere un conjunto interconectado de estos procesos introduce nuevos elementos, con lo que aparece un aumento en la complejidad [4]. Uno de estos casos, por ejemplo el de la Fig. 1(b), es la secuenciación de dos procesos productivos. Si el primero suministra de manera continua a lo largo del año una materia que el segundo ocupa para entregar un producto de naturaleza estacional, que sólo es demandado la mitad del año, entre ambos aparece un desfase del flujo. La manera de hacerle frente es desacoplar las dos velocidades con un inventario de producto intermedio. Mientras el segundo proceso no tiene demanda, se acumula el material de entrada, para utilizarse en su periodo de funcionamiento. En consecuencia, las nuevas decisiones incluyen a los dos elementos productivos iniciales, más el elemento de inventario, requerido para la operación conjunta, con un aumento en complejidad.

Otro ejemplo se encuentra al estudiar un proceso en el que no se fabrica un solo tipo de producto, sino que es capaz de programarse para varios. El acondicionamiento requerido para cambiar de un tipo de producto a otro, genera un tiempo llamado de preparación, durante el cual el proceso no es productivo. El tratamiento de este periodo nuevamente da lugar a

una situación adicional a la del sistema original. El caso se ilustra en la Fig. 1 (c).

Además de lo anterior, en los sistemas reales aparecen fallas en las máquinas, productos inaceptables en calidad, ausencia de personal y otros, al grado de que el esquema inicial es difícilmente logrado. Como señala Churchman [5] al describir un sistema, existen objetivos, ambiente, recursos, componentes y administración, que es el aspecto que decide sobre los otros.

En la evolución mundial de los sistemas de producción, la manera de definir y aplicar la administración ha marcado su grado de avance. En este sentido, es necesario señalar las características de los paradigmas predominantes a lo largo de la historia [6, 7].

### 5. Cambio de paradigmas en los sistemas productivos

La aplicación del enfoque de sistemas a la producción tiene una evolución desde la administración científica, con criterios del máximo aprovechamiento, a la producción en masa, pretendidamente llevada por la eficiencia de las operaciones de la cadena, de ahí a la automatización y la informatización por las facilidades de procesamiento y almacenamiento de volúmenes de datos, y algunas alternativas, como la producción justo a tiempo y la teoría de las restricciones.

#### 5.1. El paradigma de empujar la producción

La época de la administración científica de Taylor buscaba sentar el proceso de producción sobre bases numéricas rígidas y era el empresario quien imponía los ritmos y normas de fabricación a conveniencia del sistema y no del mercado [6], de donde se deriva la denominación de sistema de empujar. Se identifica con la cadena de montaje, la medida de tiempos y movimientos, la producción de artículos estandarizados y en grandes series. La economía del tiempo y las tecnologías de medición y control del trabajo caracterizan al modo de producción en masa.

Durante la primera mitad del siglo XX se despertó el interés por este sistema de producción, adoptado por los fabricantes estadounidenses de automóviles y convertido en el modelo a seguir por las demás empresas [7]. Su principal exponente fue el sistema Ford de fabricación de autos *Modelo T*, de color negro. La idea de que los consumidores sólo preferían esta opción no llegó más allá del año 1927, cuando se hizo patente que el cliente es también capaz de expresar sus necesidades.

En los años sesenta y setenta se observó que producir en masa requería que el sistema no sólo contara con elementos de producción, sino que adicionaba los de inspección, de trans-

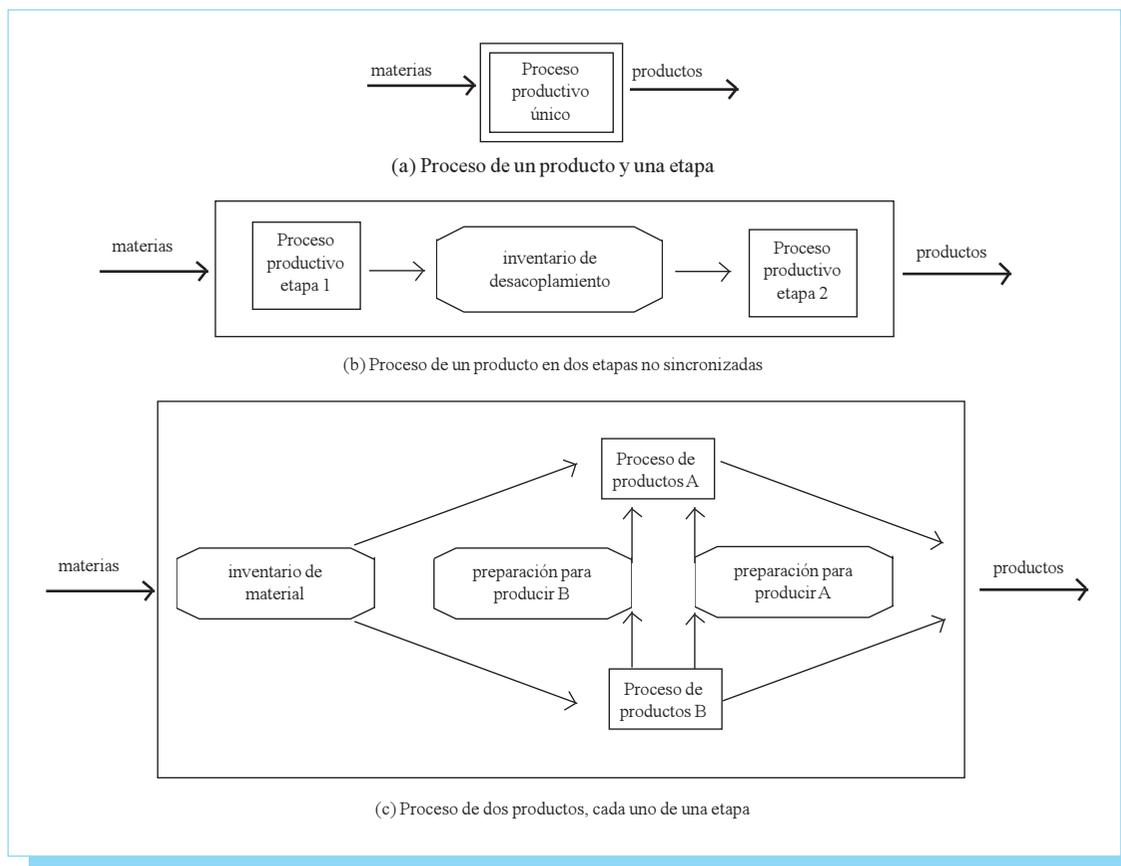


Fig. 1. Aumento de complejidad en un sistema de manufactura por la adición de elementos.

porte, de almacenamiento, de mantenimiento y de administración, lo que implicaba enormes inventarios, tanto de producto terminado, como de materia prima.

En épocas más recientes, una de las tendencias en la fabricación de empujar, que a veces se establece como único paradigma, es la que se inclina por la automatización [8]. En este tema es muy importante señalar que los sistemas altamente automatizados sólo pueden justificarse cuando la demanda es de cantidades muy grandes y no hay cambios de preparaciones, o sea, fabrican un solo tipo de producto. En el renglón tecnológico son de gran interés por las oportunidades de informatización que ofrecen, pero no se apegan a muchos mercados, que requieren de variedad.

## 5.2. El paradigma de jalar la producción

La designación como sistemas de jalar les es dada por ser el cliente, al pedir las especificaciones, las cantidades y las variantes de los productos, quien define las decisiones de pro-

ducción, con lo que "jala" las decisiones internas del proceso [6]. La consideración de la calidad y de las preferencias del cliente se manifestó en los sistemas japoneses después de la Segunda Guerra Mundial, al observar los sistemas de producción americanos y adecuarlos a su manera de pensar [9].

Uno de los primeros en hacer operativas estas ideas fue el Sistema de Producción Toyota (TPS) [10, 11] y al extender su aplicación a otros procesos fue conformando lo que se conocería como la producción Justo a Tiempo (JIT). Ésta llamó la atención del mundo occidental y el problema por resolver se centró en la adecuación hacia una aplicabilidad más generalizada [12, 13]. Convencidos los países de Occidente de las ventajas de coordinar las decisiones de producción con las necesidades del mercado, mediante la eliminación de los elementos no productivos con el adelgazamiento del proceso, ha promovido la nueva designación de manufactura esbelta (*Lean Production*) [7]. Su cualidad es la de cumplir los objetivos del sistema sin cargar con actividades superfluas a la producción, al tiempo que consumen recursos del mismo.

## 6. El pensamiento esbelto en manufactura

La manufactura esbelta se fundamenta en la reducción del desperdicio y en la calidad de los productos a través del compromiso de cada uno de los integrantes de la organización, así como de una fuerte orientación a la participación en las tareas [8]. Con estos principios, el desempeño se traduce en mayor productividad, menor tiempo invertido, mayor calidad, mayor satisfacción del cliente, mayores ventas y, consecuentemente, mayores utilidades.

Dentro de la finalidad de mejorar el desempeño del sistema, anteriormente comentada, de cubrir los verdaderos objetivos productivos con el mecanismo de suprimir las actividades innecesarias, catalogadas como desperdicios, la definición del paradigma de la manufactura esbelta aparece como un dominio de estudio que ofrece grandes perspectivas de buen éxito. Sistémicamente se muestra coherente, al poseer en común la eliminación de los desperdicios en todas sus herramientas, con lo cual se espera que la aplicación de una de ellas no genere un impacto negativo en otra.

Si bien reúne una colección de herramientas dirigidas a la eliminación de la variedad de los tipos de desperdicios, la manufactura esbelta no constituye en sí un método definido. Por esta razón, la investigación en curso, en función de un conjunto de empresas mexicanas analizadas, busca definir un procedimiento de aplicación que aproveche sus fundamentos y estructura, en función de aquéllas, la mejor manera de seleccionar las herramientas.

Una de las maneras de explicar el funcionamiento en la práctica de los principios esbeltos se hace a través de su desglose en herramientas. Así, cada una se dedica a un aspecto particular de eliminación del desperdicio en cada parte del proceso. Como ilustración, algunas de las citadas herramientas se describen en seguida:

- Control autónomo de defectos. Son técnicas que disminuyen las posibilidades de cometer errores en el proceso, controlan la calidad en el origen y no al final de la línea de producción y facultan al operario para detenerla en caso de problemas, frecuentemente con señalizaciones visuales y sonoras, evitando la propagación de fallas en la producción. En la terminología japonesa se identifica con *jidoka*, *poka-yoke* y *andon*.
- Mantenimiento productivo total. Abreviado como TPM (*Total Productive Maintenance*), se destina a eliminar las pérdidas del sistema por tiempos muertos en las máquinas y la generación de productos defectuosos por las máquinas.
- Reducción de las preparaciones. Conocido como SMED (*Sim-*

*gle Minute Exchange of Die*), es el cambio de tiempos de preparación a un dígito en minutos, es decir, menos de 10.

- Distribución de planta eficiente. Bajo el término de *shojinka*, se refiere a la disposición física del proceso en que se origina el acortamiento de las distancias recorridas por el producto.
- Mayor participación del elemento humano. Es una de las expresiones del concepto *soikufu*, en que se motiva la acción humana para sugerir las mejoras al proceso y extenderlas a las de preparación, supervisión y mantenimiento, en vez de asignarlas a personal especializado.

Los cuatro últimos conceptos se eligen para llevar a cabo una prueba de impacto sobre el desempeño del sistema total, resultante de promover ajustes razonables en los parámetros del proceso relacionados con ellos. Lo anterior proporcionará información sobre las interdependencias y la sinergia en el sistema de manufactura.

## 7. Definición del problema

Por las condiciones ventajosas que implica la simulación en computadora y la orientación de esta investigación a la identificación de herramientas esbeltas aplicables, es esta técnica la que se utiliza. El simulador seleccionado para la experimentación es *ProModel* [14].

La ubicación del problema en el caso analizado requiere un acercamiento progresivo. En su generalidad, la empresa estudiada refleja baja competitividad internacional y altos índices de costos. La organización no sabe cómo llegar a resolver estos problemas por desconocimiento de técnicas de aplicación. Las soluciones se plantean a corto plazo y en entornos locales, con lo que un problema desaparece a costa de dejar que aparezcan otros.

Comprendiendo la complejidad que conlleva este tipo de sistema, una organización industrial está sujeta a eventos cambiantes y está formada por factores humanos, técnicos y ambientales. Al concretar los problemas de producción, resaltan: la mala calidad, los retrabajos, las interrupciones y los tiempos y esfuerzos perdidos, lo que impide un flujo continuo de productos, y todos tienen en común que constituyen desperdicios. Resalta entonces la oportunidad de aplicar la manufactura esbelta.

### 7.1. El modelo utilizado

Para las empresas estudiadas, objeto de las propuestas de mejora, se ha conformado un caso representativo de la industria de fabricación de material ferroviario. Entre un pro-



**Tabla 1.** Resultados de los experimentos con el simulador.

Experimento	Reducción de preparaciones	Reducción de recorridos	Capacitación del operario	Agilización del mantenimiento	Disponibilidad $Q_a$	Calidad $Q_b$	Global $Q$ (media)	Global $Q$ (desv. est.)
1	-	-	-	-	0.8931	0.9013	0.8052	0.0414
2	+	-	-	-	0.8935	0.9018	0.8060	0.0434
3	-	+	-	-	0.9041	0.9038	0.8174	0.0427
4	+	+	-	-	0.9041	0.9014	0.8152	0.0407
5	-	-	+	-	0.8928	0.9022	0.8057	0.0416
6	+	-	+	-	0.8940	0.9038	0.8083	0.0422
7	-	+	+	-	0.9039	0.9007	0.8145	0.0413
8	+	+	+	-	0.9047	0.9035	0.8176	0.0410
9	-	-	-	+	0.9861	0.9013	0.8889	0.0395
10	+	-	-	+	0.9862	0.9072	0.8947	0.0394
11	-	+	-	+	0.9868	0.9015	0.8896	0.0392
12	+	+	-	+	0.9867	0.9036	0.8917	0.0391
13	-	-	+	+	0.9868	0.9015	0.8896	0.0392
14	+	-	+	+	0.9861	0.9024	0.8896	0.0390
15	-	+	+	+	0.9865	0.9031	0.8910	0.0403
16	+	+	+	+	0.9865	0.9019	0.8898	0.0382

La variable  $Q_a$  se emplea para representar la disponibilidad del equipo, medida para la etapa de pintura final. Se obtiene dividiendo el tiempo del estado de falla de la instalación entre el total de los tiempos de los demás estados y restando el resultado de uno. Para el caso de un equipo con pocas descomposuras, su indisponibilidad tenderá a cero y su complemento tenderá a uno.

Por su parte, para la calidad de la producción,  $Q_b$  se obtiene del cociente de productos correctos, sobre la suma de productos correctos, retrabajados y rechazados. No se requieren ajustes al indicador, pues una producción sin fallas genera un valor uno y, conforme crece el número de productos con cualquier tipo de error, tiende a cero.

Finalmente, el indicador de desempeño global  $Q$ , es obtenido con el producto directo de los dos anteriores, también con rango de 0 a 1,

$$Q = Q_a \times Q_b \quad (1)$$

Realizadas las pruebas de simulación, los desempeños del sistema resultantes se ilustran, para cada uno de los 16 experimentos, en la tabla 1.

Una primera observación conduce a confirmar que cada una de las modificaciones propuestas efectivamente mejora el desempeño global  $Q$ . Los experimentos 5, 2, 3 y 9, que corresponden a las mejoras por capacitación, preparaciones, recorridos y mantenimiento, alcanzan valores de 0.06, 0.1, 1.51 y 10.3%, respectivamente, sobre el experimento 1. El mantenimiento supera notoriamente a los demás.

Sin embargo, la aplicación de dos o más modificaciones al sistema no provoca mejoras proporcionales. Como un ejemplo, se cotejan los experimentos 3, 4 y 7. El primero corresponde a una sola mejora, que es la de reducción de recorridos, mientras que los otros tienen la misma mejora acompañada de una segunda (en preparaciones o en capacitación). El resultado numérico es que ninguno de estos dos supera el

rendimiento del experimento 3, de 0.8174, al quedarse en 0.8152 y 0.8145, respectivamente.

La comparación de los experimentos 8 y 9, por su parte, señala la ventaja en rendimiento para el segundo, de 0.8889 contra 0.8176, a pesar de que en éste se ejecutaron tres acciones y en el otro, sólo una.

Si ahora la búsqueda se interesa en el sistema con el máximo desempeño global, se encuentra que lo logra el experimento 10, que, con 0.8947 es mejor que el 16, de 0.8898, aun considerando que éste se modificó en cuatro parámetros y el experimento 10, en dos.

En cuanto al indicador de desempeño global  $Q$ , contrastado con sus dos componentes, también se presentan comparaciones que denotan la complejidad de las interrelaciones. Ya se ha mencionado que el máximo desempeño correspondió al experimento 10, pero si bien el indicador parcial de calidad  $Q_b$  coincide como el máximo, no ocurre así para el indicador de disponibilidad  $Q_a$ , para el que los experimentos 11 y 13 fueron mejores.

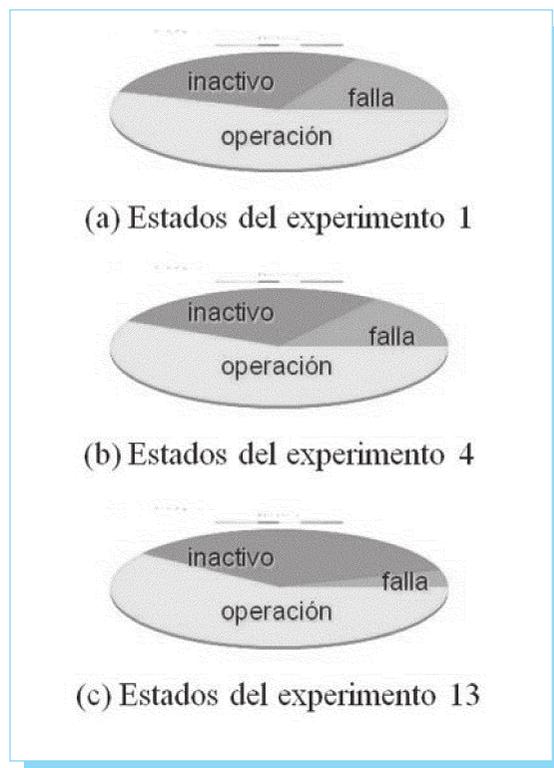
Con estos resultados solamente se ilustra una fracción de las variadas reacciones que los factores de un sistema de manufactura tienen sobre el desempeño, pero suficientes para mostrar los aspectos de complejidad y de interrelación planteados. Un complemento en la percepción de los resultados es entregado por los gráficos. Por ejemplo, dentro de los estados de operación del sistema, el porcentaje que corresponde a la indisponibilidad de tres de los experimentos, los casos 1, 4 y 13, se muestran en la figura 3, representativos del indicador  $Q_a$ .

## 8. Conclusiones

Con los resultados de la simulación del caso de ejemplo de un sistema de manufactura, desarrollado con datos de una empresa mexicana, se ha comprobado que el enfoque de sistemas es ineludible para comprender los fenómenos que en él ocurren.

Queda demostrado que, por el número de elementos que lo componen, por el número de las interrelaciones entre ellos y por la naturaleza no lineal de éstas, no es razonable formular soluciones simples a su problemática.

Puesto que la pretensión de un proyecto de investigación en curso es proponer, con elementos del pensamiento esbelto, un modelo de mejora de los procesos productivos para la empresa mexicana, queda de manifiesto que necesita un sustento de enfoque de sistemas.



**Fig. 3.** Comparación del indicador de disponibilidad  $Q_a$  por estados en la etapa de 'pintura final' para tres experimentos.

Del caso analizado y simulado se han podido observar: las no linealidades de las variables, la necesidad de precisar la medida de desempeño adecuada, la correcta interpretación estadística de los experimentos en función de los aspectos aleatorios y la selección de los parámetros por someter a propuestas de mejora.

## Anexo

Una versión previa de este texto fue presentada en el XI Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, en noviembre de 2009.

## 9. Referencias

- [1] Allen, J., Robinson, C. y Stewart, D. (eds.), *Lean Manufacturing: A Plant Floor Guide*, Dearborn MI: Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [2] Schonberger, R. J., *World Class Manufacturing Casebook: Implementing JIT and TQC*, Nueva York: Free Press, 1987.
- [3] Durand, D., *La Systématique*, 7ª ed., Paris: Presses Universitaires de France, 1996.

- [4] van Gigch, J. P., *Teoría general de sistemas*, 2ª ed., México: Trillas, 1997.
- [5] Churchman, C. W., *El enfoque de sistemas*, México: Diana, 1981.
- [6] Sipper, D. y Bulfin Jr., R. L., *Planeación y control de la producción*, México: McGraw-Hill, 1998.
- [7] Womack, J. P., Jones, D. T. y Ross, D., *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production*, Nueva York: Free Press, 2007.
- [8] Domínguez Machuca, J. A., et al., *Dirección de operaciones: aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Madrid: McGraw-Hill, 1995.
- [9] Coriat, B., *Pensar al revés: Trabajo y organización en la empresa japonesa*, México: Siglo XXI, 1995.
- [10] Monden, Y., *Toyota Production System*, Norcross GA: Industrial Engineering and Management Press, 1993.
- [11] New, S. J., "Celebrating the Enigma: The Continuing Puzzle of the Toyota Production System", *Int. J. Prod. Res.*, vol. 45 núm. 16, 2007, pp. 3545-3554.
- [12] Bamber, L. y Dale, B. G., "Lean Production: A Study of Application in a Traditional Manufacturing Environment", *Prod. Plann. & Ctrl.*, vol. 11 núm. 3, 2000, pp. 291-298.
- [13] Bednarek, M. y Niño Luna, L. F., "The Selected Problems of Lean Manufacturing Implementation in Mexican SMEs", en *Lean Business Systems and Beyond*, T. Koch (ed.), Boston MA: Springer, 2008, pp. 239-247.
- [14] ProModel, *User's Guide*, v. 4.1, Orem UT: ProModel Co., 1998.
- [15] Hernández Osorio, A., "Evaluación de un Proceso Productivo Simulado bajo Criterios de Manufactura Esbelta", Tesis de Ingeniería Industrial, U. Autónoma Edo. Hidalgo, 2009.

# ACE-X 2011

## 5th International Conference on Advanced Computational Engineering and Experimenting

3, 4, 5 & 6 July 2011, Algarve, Portugal.  
[www.ace-x2011.com/](http://www.ace-x2011.com/)