

# Discrete event simulation for production planning in modular garment manufacturing systems

**Jose Alejandro Cano, Emiro Antonio Campo, Rodrigo Andrés Gómez.**

*Universidad de Medellín. Cra 87 N° 30 – 65. Tel: (57) 3014011400. jacano@udem.edu.co*

*ESACS – Escuela Superior en Administración de Cadena de Suministro. Calle 4 N° 18 – 55. Tel: (57) 3004912887.*

*emiroa86@hotmail.com*

*Universidad Nacional de Colombia. Calle 80 N° 65 - 223. Tel: (57) 3217493669. ragomez@unal.edu.co*

## Abstract

This article aims to solve a NP-Hard production planning problem with stochastic variables in a modular manufacturing plant of a large company. In order to minimize costs per batch a mixed programming model is proposed, which is based on results of a discrete simulation model executed in MS Excel and VBA Applications. The simulation model presents variables such as manufacturing modules, setup staff, space and machinery resources, among others. After finding the optimal solution of the production problem, it is concluded that the discrete simulation for modular manufacturing systems is adaptable to basic software, allows to propose new scenarios, articulate complex information, customize models and facilitates parameterize a large number of variables.

**Keywords:** Simulation; discrete events, modular manufacturing; clothing and fashion; setup times.

## Simulación de eventos discretos en la planificación de producción para sistemas de confección modular

### Resumen

Este artículo tiene como objetivo solucionar un problema *NP-Hard* de planificación de producción con variables estocásticas en una planta de confección modular de una gran empresa con el fin de minimizar costos por lote, a través de un modelo de programación mixta, el cual se basa en resultados arrojados por un modelo de simulación de eventos discretos ejecutado en MS Excel y VBA Applications. El modelo de simulación planteado tiene en cuenta variables como módulos de confección, equipos de montaje y alistamiento, recursos de espacio y maquinaria, tiempos de operación y actividades, entre otros. Al encontrar la solución óptima del problema, se concluye que la simulación en ambientes de sistemas modulares de confección es una herramienta adaptable a software de fácil adquisición y uso, permite plantear nuevos escenarios, articular información compleja, personalizar modelos y parametrizar fácilmente una gran cantidad de variables.

**Palabras clave:** Simulación; eventos discretos; producción modular; confección y moda; tiempos de alistamiento.

### 1. Introducción

A nivel mundial el sector textil, confección y moda ha venido desarrollándose en un ambiente competitivo de manufactura que ha inducido a que los fabricantes busquen nuevas estrategias que garanticen una efectividad operativa [1], motivando el rediseño de las

estructuras organizacionales y productivas, para alcanzar niveles satisfactorios de competitividad y un mayor grado de personalización de los productos con ciclos de vida de cada vez menores, de gran variedad, y pocas unidades por referencia [2,3,4]. Estas condiciones obligan a que los lotes de producción sean más pequeños y se entreguen en menores tiempos, y que las cadenas de suministro

globales de textiles y confección cambien su estructura para enfrentar los costos generados por los cambios de referencia, buscando tiempos mínimos de respuesta en producción según lo exija la dinámica del mercado [5,6].

Como respuesta a estas necesidades aparecen los sistemas de producción modular o módulos de confección, que han mostrado ser una respuesta innovadora a las necesidades en la industria de confección [4], con resultados superiores sobre sistemas tradicionales de fabricación en línea, facilitando la aplicación de la filosofía justo a tiempo y sistemas *Pull* para la industria de confección y moda [2,7,8]. Los sistemas de confección modular presentan una configuración de estaciones de trabajo donde se manejan tamaños de lote pequeños (entre una y seis piezas), lo cual permite operar con menos trabajadores que máquinas, eliminar inventarios de seguridad, equilibrar cargas de trabajo y aumentar la capacidad de producción [9,10,11,12]. Para optimizar un sistema de producción modular, este debe someterse a metodologías y herramientas que experimenten alternativas respecto a decisiones que se puedan tomar, modificando variables de un módulo de confección tales como el número de lotes, tamaño de lotes, personal disponible de producción, tiempos de alistamiento y montaje por referencia, entre otros. Es así como un sistema de confección modular, que presenta características estocásticas y dinámicas, puede diseñarse bajo el contexto de programación matemática y simulación de eventos discretos [13,14]. En este sentido, los problemas de producción en sistemas de confección, que involucran tiempos de montaje y alistamiento para cada referencia se consideran complejos o *NP-Hard*, y se han solucionado con métodos de optimización y heurísticos [15,16,17].

Sin embargo, debido a la complejidad de los ambientes de manufactura en el sector de confección y moda, se requiere incluir variables estocásticas y dinámicas, y considerar metodologías como la simulación de sistemas que pueden modelar funciones de probabilidad a diferencia de métodos donde no se conoce información a priori [18], para generar información útil y de fácil entendimiento por parte de los directores de producción y gerentes de planta. Autores como Wang, et al. [19] y Black y Schroer [7] utilizan la simulación para entender las características operacionales de la manufactura modular en la industria de la confección. Oliver, et al. [20] desarrollan un modelo de simulación para analizar eficiencias de sistemas *Push*, *Kanban* y modular en la industria de moda. Luego, Kalaoglu y Saricam [21] desarrollan una aplicación del sistema modular en la industria de la confección para determinar el desempeño del sistema en términos de productividad, eficiencia de máquinas y operarios, e inventarios. De manera similar, Kursun y Kalaoglu [22] aplican un modelo de simulación para balancear una línea de confección, validando los datos obtenidos con pruebas

de bondad y ajuste Kolmogrov-Smirnov para la generación de funciones de distribución de probabilidad.

A pesar que la simulación ha sido una herramienta de gran utilidad para la planificación y toma de decisiones en sistemas de producción modular, en el sector de manufactura se han presentado problemas con la implementación de modelos de simulación, debido a las inversiones de tiempo y costo en el mantenimiento de los modelos creados [23], y a la dificultad en la interpretación adecuada de los resultados arrojados por los sistemas de cómputo especializados en simulación [24]. De acuerdo con lo anterior, el objetivo de este artículo es solucionar un problema *NP-Hard* de planificación de producción con variables estocásticas en una planta de confección modular, a través de un modelo de programación mixta, que apoya la toma de decisiones multicriterio [25] y un modelo de simulación de eventos discretos en un sistema de fácil acceso, adaptación, programación y personalización. En este sentido, se describe la situación actual de la empresa de esta investigación, se formula el problema de optimización matemática y el modelo de simulación para encontrar la solución que minimice el costo de producción por lote, teniendo en cuenta variables como tiempo disponible, módulos de confección, personal de montaje y alistamiento, operarios de producción, entre otros. Se analizan los resultados obtenidos con las simulaciones y la optimización de los modelos propuestos, y finalmente se presentan las conclusiones obtenidas con los modelos aplicados para la toma de decisiones empresariales.

## 2. Formulación del problema y modelo de simulación

El modelo de simulación propuesto surge como respuesta a la necesidad de una de las empresas de confección y moda más grandes de Colombia, que cuenta con más de 1.000 empleados, 12 líneas de productos, 10 referencias de línea, más de 100 referencias nuevas por colección (3 colecciones por año), fabricación mensual de más de 200.000 unidades en marcas propias y maquila, entre otros factores importantes que hacen que la empresa seleccionada sea líder del sector confección. El proceso de producción modular de confección se caracteriza a través de 5 etapas las cuales son la entrada de lotes de producción a zona de espera, elección de lote y selección de canaleta, montaje de maquinaria y lote en la canaleta, inicio de producción y finalización de producción. Se aclara que un módulo de confección representa un equipo de personas encargadas de procesar las prendas de vestir; las canaletas se definen como el espacio físico y maquinaria donde se instala un módulo de confección; y un equipo de montaje se define como un grupo de personas encargado de alistar las

canaletas para que un módulo de confección fabrique una referencia.

Esta empresa presenta un aumento en el incumplimiento de pedidos, altos tiempos de procesamiento por lote, un aumento de más del 40% en la utilización de la capacidad de almacenamiento y en tiempo de almacenamiento en el centro de distribución. Para enfrentar este problema, la empresa ha tomado la decisión de fabricar tamaños de lote de menor tamaño, que oscilen entre 100 y 1.000 unidades. En las primeras fases de implementación de esta nueva estrategia, se evidenció el aumento en tiempos improductivos de producción y

el represamiento de lotes de trabajo, debido al aumento del número de alistamientos que se generan para dar respuesta a la gran variedad de referencias a procesar en un periodo de tiempo.

## 2.1. Modelo de programación mixta

Teniendo en cuenta las características y relaciones entre elementos del sistema de confección modular, se establece en la Tabla 1 presenta las variables y parámetros del modelo de programación mixta a proponer.

**Tabla 1**  
Variables y parámetros del modelo de programación mixta

Variables	Descripción
$C$	Número de canaletas en la planta de confección
$EM$	Número de equipos de montaje en la planta de confección
$M$	Número de módulos de confección en la planta de producción
$C_{canaleta}$	Costo por periodo de tiempo por canaleta
$C_{módulo}$	Costo por periodo de tiempo por módulo de confección
$C_{montaje}$	Costo por periodo de tiempo por equipo de montaje
$NLS$	Número total de lotes fabricados por periodo de tiempo
Lotes ( $C, M, EM$ )	Número de lotes fabricados en el sistema con $C$ canaletas, $M$ módulos de confección y $EM$ equipos de montaje
$C_{max}$	Número máximo de canaletas en la planta de confección

En la ecuación (1) se presenta la función objetivo del modelo de programación mixta, que se encarga de minimizar el costo total por lote de producción. La ecuación (2) garantiza la fabricación de un número mínimo de lotes de prendas por semana para satisfacer la demanda de productos. De igual forma la ecuación (3) y la ecuación (4) representan las restricciones de capacidad, las cuales limitan el número máximo de canaletas y de módulos de confección.

$$\text{Min (Costo por Lote) } W = \frac{(C_{canaleta} \times C + C_{módulo} \times M + C_{montaje} \times EM)}{\text{Lotes } (C, M, EM)} \quad (1)$$

$$\text{Lotes } (C, M, EM) \geq NLS \quad (2)$$

$$C \leq C_{max} \quad (3)$$

$$M \leq C \quad (4)$$

$$c \in Z^+; m \in Z^+; em \in Z^+ \quad (5)$$

$$c \geq 0; m \geq 0; em \geq 0 \quad (6)$$

Para calcular la variable Lotes( $C, M, EM$ ), es necesario el planteamiento de un modelo de simulación que permita incluir variables estocásticas como el tiempo entre llegadas de lotes, tiempo de alistamiento y montaje, y el tiempo procesamiento o tamaño en minutos de cada lote. Para dar solución al problema, el modelo de programación mixta tiene que resolver dos sub-problemas a la vez, en el primero se debe determinar el número óptimo de Módulos de confección y los equipos de montaje con el fin de garantizar el procesamiento de todos los lotes de producción programados, y el segundo sub-problema se debe asignar a cada lote de producción, la canaleta, el equipo de montaje y el módulo de confección (triple asignación) donde el tiempo de alistamiento es dependiente de la secuencia y estocástico, y el tiempo de procesamiento también es estocástico lo cual hace que el problema de programación mixta se convierta en un problema *NP-Hard* debido que este es altamente combinatorial [26]. Adicional a esto, se desea calcular el número de lotes fabricados en diferentes horizontes de tiempo, para lo cual se propone el uso de la simulación de eventos discretos, con la cual se generan los diferentes

escenarios que proporcionen las variables de la función objetivo expresadas en la Ecuación 1.

## 2.2. Modelo de simulación de eventos discretos

Teniendo en cuenta las características del sistema de confección modular, y la necesidad de

calcular la variable Lotes( $C, M, EM$ ) para alimentar el modelo de programación mixta, se define en la Tabla 2 las variables exógenas, endógenas y de estado que permiten construir el modelo simulación para el cálculo de la tasa de producción de lotes de confección.

**Tabla 2**  
Definición de variables para el modelo de simulación de eventos discretos

Variables Exógenas	Descripción
TPLL	Tiempo de próxima llegada de lote de producción (Variable aleatoria)
TS	Tiempo de simulación
TES	Tiempo de estabilización del sistema
S	Número de corridas en la simulación
$c$	Número de canaletas ( $c = 1, \dots, C$ )
$em$	Número de equipos de montaje ( $em = 1, \dots, EM$ )
$m$	Número de módulos de confección ( $m = 1, \dots, M$ )
OPM	Número de operarios por módulo de confección
Variables Endógenas	Descripción
TM	Tiempo de alistamiento (Variable aleatoria)
TP	Tiempo de producción (Variable aleatoria)
$TSF_{em}$	Tiempo de terminación de alistamiento del equipo de montaje $em$
$TMF_m$	Tiempo de terminación de producción del módulo de confección $m$
$TCM_c$	Tiempo de terminación de proceso de la canaleta $c$
Variables de Estado	Descripción
COLA	Número de lotes en espera de asignación de canaleta
NMD	Número de módulos de confección disponibles
NED	Número de equipos de montaje disponibles
NCD	Número de canaletas disponibles para iniciar alistamiento
$WS_{em}$	Tiempo total trabajado por el equipo de montaje $em$
$WM_m$	Tiempo total trabajado por el módulo de confección $m$
$LOTES_m$	Total lotes procesados por el módulo de confección $m$

Para el cálculo de las variables aleatorias del modelo se realizó un muestreo de tiempos de alistamiento y montajes, tamaños de lote en minutos y tiempo entre llegadas de lotes al proceso de producción. Estas muestras de datos se evaluaron en el software *Statgraphics Centurion XVI*, el cual permite elaborar pruebas de bondad de ajuste

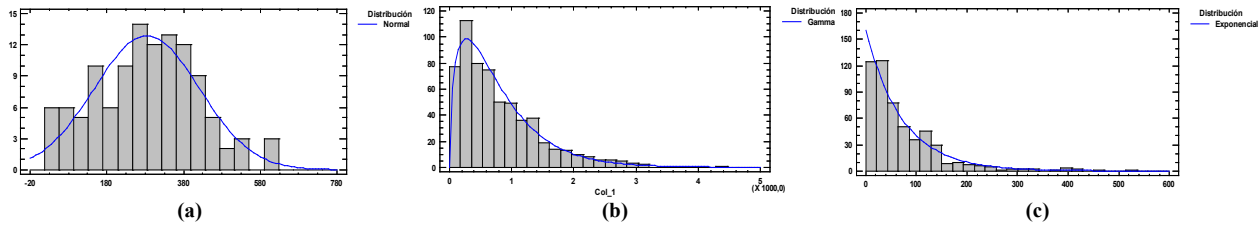
a una serie de datos hacia una función de probabilidad. La Tabla 3 muestra para cada variable aleatoria el tamaño de muestra de tiempos, funciones de probabilidad sugeridas, valor-p de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov, parámetros de la función de probabilidad y valor esperado.

**Tabla 3**  
Pruebas de bondad de ajuste y parámetros de variables aleatorias

Variable	Tamaño de Muestra	Distribución	Valor-P KolmogorovSmirnov	Parámetros	Valor Esperado
Tiempo de montaje y alistamiento	116	Normal	0,85	$\mu = 284,6$ $\sigma = 136,8$	284,6 minutos
Tamaño de lotes en minutos	605	Gamma	0,14	$\alpha = 1,54$ $\beta = 514,7$	792,2 minutos
Tiempo de entrada entre lotes	543	Exponencial	0,12	$\lambda = 72,2$	72,2 minutos

Debido a que los valores-p de las funciones de probabilidad de las tres variables aleatorias presentadas en la Tabla 3 son mayores que 0,05, puede decirse con un nivel de confianza del 95% que los tiempos de montaje se ajustan a una función de probabilidad normal, el tamaño de lote en minutos se ajusta

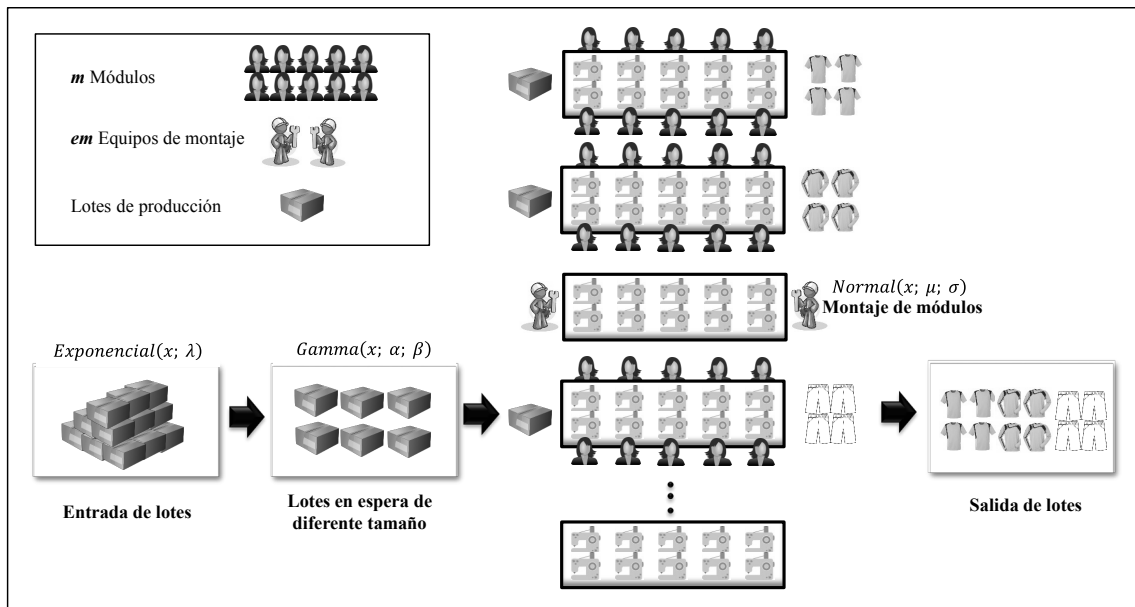
a una función de probabilidad gamma, y el tiempo de entrada entre lotes se ajusta a una función de probabilidad exponencial. La Figura 1 muestra los histogramas y ajustes de las funciones de probabilidad a cada una de las variables aleatorias del modelo de simulación.



**Figura 1.** Ajuste de funciones de probabilidad para, (a) tiempos de montaje, (b) tamaño de lote, (c) tiempo de entrada entre lotes.

Es así entonces como puede establecerse un esquema del modelo de simulación, el cual se presenta en la Figura 2, y diagramas de flujo con avance por eventos del

modelo de simulación del sistema de confección modular, donde se evidencian las relaciones de los elementos y el funcionamiento como tal del modelo de simulación.



**Figura 2.** Esquema del modelo de simulación de eventos discretos.

Actualmente la planta de producción funciona con 15 módulos de confección, 30 canaletas y 5 equipos de montaje, procesando tamaños de lote de 800 minutos en promedio, con tiempos de montaje de 280 minutos, tiempos entre llegadas de 56 minutos, y una producción entre 90 a 100 lotes semanales. Adicional a esto, la planta tiene espacio para ubicar como máximo 40 canaletas, y se

desea encontrar configuraciones que permitan producir más de 130 lotes por semana, con tamaños de lote equivalentes a 600 minutos de trabajo y con unos tiempos de llegada entre lotes de 35 minutos en promedio. Debido a esto, en la Tabla 4 se plantean 27 escenarios que combinan cantidades diferentes de módulos de confección, canaletas y equipos de montaje.

**Tabla 4**  
Escenarios planteados para realizar simulaciones del sistema modular de confección

	Canaletas	30			32			34		
		Módulos	15	17	19	15	17	19	15	17
Equipos de Montaje	5	5-15-30	5-17-30	5-19-30	5-15-32	5-17-32	5-19-32	5-15-34	5-17-34	5-19-34
	7	7-15-30	7-17-30	7-19-30	7-15-32	7-17-32	7-19-32	7-15-34	7-17-34	7-19-34
	9	9-15-30	9-17-30	9-19-30	9-15-32	9-17-32	9-19-32	9-15-34	9-17-34	9-19-34

Para los escenarios a simular se ha determinado que el balance de línea de los módulos de confección requiere de 10 operarios por módulo, y que un equipo de montaje y alistamiento se conformará por 5 personas dedicadas a diferentes tareas. A cada escenario se le aplican 100 corridas en un horizonte de tiempo de 1 semana que se compone de 5.760 minutos laborales. El modelo del sistema de confección modular se programa y ejecuta en el software *MSExcels* con *VBApplications*, generando una interface para el registro de información de entrada del modelo, y creando un código que permite generar las salidas y resultados de interés del usuario, tales como el número de lotes terminados, tiempo perdido por módulo de confección y tiempo perdido por equipo de montajes.

Se justifica el uso de este software para simular debido a la facilidad de acceso y bajo costo de la licencia de este software, además de la fácil adaptación, programación, personalización, y conexión con otros sistemas de información empresarial.

### 3. Resultados y discusión

Los resultados de las simulaciones para los diferentes escenarios planeados se presentan en la Tabla 5, detallando para cada escenario el número promedio de lotes procesados, tiempo promedio perdido por módulo, y tiempo promedio perdido del equipo de alistamiento y montajes.

**Tabla 5**  
Resultados de simulación para los escenarios planteados

	Canaletas	30			32			34			
		Módulos	15	17	19	15	17	19	15	17	
Equipos de Montaje	5	112	112	110	114	113	112	116	116	114	Número de lotes fabricados
	7	121	134	140	124	134	144	126	137	145	
	9	121	136	146	124	137	148	126	139	151	
	5	8,5%	15,9%	22,6%	9,3%	16,1%	23,3%	8,4%	16,0%	21,8%	% minutos perdidos por módulo
	7	0,6%	1,6%	4,4%	0,6%	0,8%	3,7%	0,6%	1,3%	3,7%	
	9	0,3%	0,4%	1,1%	0,2%	0,3%	0,5%	0,2%	0,3%	0,6%	
	5	0,4%	0,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	% minutos perdidos por equipo de montajes
	7	17,3%	9,3%	5,5%	15,6%	9,3%	4,0%	14,0%	7,4%	3,2%	
	9	35,5%	27,3%	22,3%	34,1%	26,8%	21,7%	32,4%	25,5%	19,9%	

En los resultados se observa que en los escenarios en los cuales se encuentran los mayores números de lotes fabricados, se genera una menor proporción de tiempo perdido por módulo de confección y una mayor proporción de tiempo perdido de los equipos de montaje. De forma contraria, a medida en que se realiza menor producción de lotes, se obtiene una mayor proporción de tiempo perdido por módulo de confección y una menor proporción de tiempo perdido de los equipos de montaje. Para encontrar la solución óptima del problema de planificación de la producción, se aplicó el modelo de programación mixta planeado anteriormente, el cual se ejecutó igualmente

en *MSExcels* y *VBApplications*, y utiliza como entrada los resultados obtenidos del modelo de simulación. Para el modelo de programación mixta se utilizó un costo de 300 USD/canaleta-semana (*Ccanaleta*), 1.139 USD/módulo-semana (*Cmódulo*), y 801 USD/equipo de montaje-semana (*Cmontaje*). En la Tabla 6 se muestra la solución al modelo de programación mixta para cada escenario planteado, y se verifica cuales escenarios permiten obtener un número de lotes terminados mayores o iguales a 130 (variable NLS). Entre las soluciones factibles, el modelo de programación mixta selecciona aquella que genere el menor costo total por lote.

**Tabla 6**  
Resultados de costo mínimo por lote (USD/lote)

	Canaletas		30			32			34		
	Módulos	15	17	19	15	17	19	15	17	19	
<b>Equipos de Montaje</b>	5	N.F	N.F	N.F	N.F	N.F	N.F	N.F	N.F	N.F	
	7	N.F	\$ 254	\$ 259	N.F	\$ 258	\$ 257	N.F	\$ 256	\$ 258	
	9	N.F	\$ 262	\$ 259	N.F	\$ 265	\$ 260	N.F	\$ 264	\$ 259	

Por lo tanto, el modelo de programación mixta sugiere como solución óptima para el sistema de confección modular, disponer de 30 canaletas, emplear 17 módulos de confección y apoyarse en 7 equipos de montajes, obteniendo un costo por lote de 254 USD/lote. Se debe recordar que estos resultados son válidos para las condiciones creadas en el modelo que corresponden a las características de las referencias de la próxima colección de la empresa estudiada. Se recomienda finalmente a la gerencia de producción adoptar el balance de recursos de producción obtenidos con el modelo de simulación desarrollado para alcanzar así una producción competitiva de lotes que respondan a las necesidades del mercado a un costo eficiente. Igualmente, el modelo de simulación propuesto debe correrse cada vez que se modifiquen las condiciones y características del sistema productivo, tales como cambios en características de referencias, mejoramiento en tiempos de producción y montajes, y cambios de cantidades y frecuencias de pedidos.

## Conclusiones

Esta investigación muestra cómo se articulan diferentes metodologías y herramientas de mejoramiento empresarial y toma de decisiones como la simulación y la programación mixta, las cuales no son antagónicas, sino por lo contrario, se complementan, siendo la simulación la encargada de generar escenarios que ofrecen información para los modelos de programación matemática.

El modelo planteado de simulación de eventos discretos en sistemas modulares de confección es una herramienta de gran utilidad, permite plantear nuevos escenarios respecto al número de equipos de montajes, canaletas y módulos de confección para dar respuesta a las tendencias del mercado, el cual demanda cada día prendas más personalizadas que conllevan a la producción de una mayor cantidad de lotes con menor número de unidades. Igualmente el modelo planteado articula relaciones entre variable y componente tales como los tiempos de alistamiento, tiempos de producción, disponibilidad de recursos, entre otros, que evolucionan en el tiempo y siguen patrones estocásticos.

Por medio del desarrollo y ejecución del modelo de simulación por eventos discretos, se establece que la simulación es una herramienta de fácil acceso para empresas de diferentes tamaños del sector confección y moda, la cual no necesariamente implica la adquisición de software especializado y de alto costo. Para obtener los beneficios de la simulación de eventos discretos basta conocer el comportamiento estocástico de los procesos, entender el funcionamiento de la simulación y de las herramientas de uso común y extendido en el sector empresarial como *MSExcels* y *VBApplications*. De esta forma se logra crear una solución fácil de instalar, ejecutar, integrar, y complementar en la medida que la realidad del sistema de manufactura modular lo exija.

Se invita a las empresas del sector de confecciones y

otros sectores de manufactura a implementar y actualizar el modelo de programación mixta y simulación propuesto, y para esto se recomienda contar con un ingeniero industrial o un profesional afín que tenga conocimientos en procesos de confección, así como conocimientos de modelamiento de variables estadísticas y de modelos de simulación discreta.

## 5. Referencias bibliográficas

- [1] Kincade D., Kim J. y Kanakadurga K.: "An empirical investigation of apparel production systems and product line groups through the use of collar designs". *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, Vol. 8, No. 1 (2013) 1-15.
- [2] Sarache W., Cespón R., Ibarra S. y Alonso P.: "Modular manufacturing: An alternative to improve the competitiveness in the clothing industry". *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol. 16, No. 3-4 (2004) 301-309.
- [3] Bonsignorio F. y Molfino R.: "An object based virtual reality simulation tool for design validation of a new paradigm manufacturing facility". *IFIP International Federation for Information Processing*, Vol. 220, No.1 (2006) 301-308.
- [4] Ramdass K. y Pretorius L.: "Implementation of modular manufacturing in the clothing industry in Kwazulu-Natal: A case study". *South African Journal of Industrial Engineering*, Vol. 22, No. 1 (2011) 167-181.
- [5] Babu V. R.: "Garment production systems - An overview". *Textile Magazine*, Vol. 47, No. 9 (2006) 22.
- [6] Cooper W.: "Textile and apparel supply chains for the 21st century". *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, Vol. 6, No. 4 (2010) 1-10.
- [7] Black J. y Schroer B.: "Simulation of an apparel assembly cell with walking workers and decouplers". *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 12, No. 2 (1993) 170-180.
- [8] Ko, E.: "Quick response adoption process in the Korean apparel industry". *Journal of the Textile Institute Part 1: Fibre Science and Textile Technology*, Vol. 92, No. 2 (2001) 56-62.
- [9] Abend, J.: "Modular manufacturing: The line between success and failure". *Bobbin*, Vol. 40, No. 5 (1999) 48-52.
- [10] Bischak D.: "Performance of a manufacturing module with moving workers". *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, Vol. 28, No. 9 (1996) 723-733.
- [11] Bartholdi J. y Eisenstein D.: "A production line that balances itself". *Operations Research*, Vol. 44, No. 1 (1996) 21-34.
- [12] Buzacott J.: "Modelling teams and workgroups in manufacturing". *Annals of Operations Research*, Vol. 126, No. 1-4 (2004) 215-230.
- [13] Dyer I., Peña G. y Arango S.: "Modelamiento para la simulacion de sistemas socio-economicos y naturales" Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2008.
- [14] Hillier F. y Lieberman G.: "Introducción a la Investigación de Operaciones", McGraw-Hill, México D.F., 2010.
- [15] Zhu X. y Wilhelm W.: "Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review". *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, Vol. 38, No. 11 (2006) 987-1007.
- [16] Allahverdi A., Ng C., Cheng T. y Kovalyov M.: "A survey of scheduling problems with setup times or costs". *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, No. 3 (2008) 985-1032.
- [17] Allahverdi A., Ng C., Cheng T. y Kovalyov M.: "A survey of scheduling problems with setup times or costs". *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, No. 3 (2008) 985-1032.
- [18] "Selección de proveedores en la minería de oro con lógica difusa". *Revista Venezolana de Gerencia*, Vol. 21, No. 75 (2016) 530-548.
- [19] Wang J., Schroer B. y Ziemke M.: "Understanding modular manufacturing in the apparel industry using simulation". *Winter Simulation Conference Proceedings, Phoenix, AZ, USA, (1991)*.
- [20] Oliver B., Kincade D. y Albrecht D.: "Comparison of apparel production systems: a simulation". *Clothing & Textiles Research Journal*, Vol. 12, No. 4 (1994) 45-50.
- [21] Kalaoğlu F. y Saricam C.: "Analysis of modular manufacturing system in clothing industry by using simulation". *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, Vol. 15, No. 3 (2007) 93-96.
- [22] Kursun S. y Kalaoglu F.: "Line balancing by simulation in a sewing line". *Tekstil ve Konfeksiyon*, Vol. 20, No. 3 (2010) 257-261.
- [23] McNally P. y Heavey C.: "Developing simulation as a desktop resource". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, No. 5 (2004) 435-450.
- [24] Hollocks B.: "Discrete-event simulation: An inquiry into user practice". *Simulation Practice and Theory*, Vol. 8, No. 6-7 (2001) 451-471.



- [25] Cano J., Campo E. y Baena, J.: "Application of DEA in international market selection for the export of goods". *DYNA (Colombia)*, Vol. 84, No. 200 (2017) 376-382.
- [26] Seddik Y. y Hanzalek Z.: "Match-up scheduling of mixed-criticality jobs: Maximizing the probability of jobs execution". *European Journal of Operational Research*, Vol. 262, No. 1 (2017) 46-59.

Recibido el 12 de Septiembre de 2016  
En forma revisada el 5 de Diciembre de 2017