

## **Aproximación a la medición del impacto del Backorder en sistemas de manufactura flexible**

### **Approximation to the measurement of Backorder impact in flexible manufacturing systems**

*Juan-José Bravo\**, *Juan Pablo Orejuela*, *Zuzet Menduiña*

Grupo de Investigación en Logística y Producción. Universidad del Valle.  
Calle 13 N.º 100 - 00. A.A. 25360 . Cali, Colombia

(Recibido el 17 de marzo de 2011. Aceptado el 7 de octubre de 2012)

#### **Resumen**

Este documento estudia las implicaciones que se tienen al considerar o no las órdenes pendientes (que se llamarán de aquí en adelante “backorders”) en los modelos de planeación, control y configuración de la producción en sistemas de manufactura flexible (SMF). En muchos de los modelos que intentan estudiar los SMF no se considera el backorder, y en aquellos en que es considerado, se incluye como una variable pasiva donde no se ha advertido de manera explícita el impacto que pueda tener en dichos sistemas y en especial su relación con el patrón de demanda. En la presente investigación se identificaron beneficios directos de la inclusión de backorders en la utilización de capacidad, en el balanceo de carga de trabajo entre grupos de Máquinas (células) y en los niveles de inventario. Finalmente se propone usar el concepto económico de elasticidad para la medición de los impactos reales entre el backorder y otros factores de producción, estrategia novedosa en este tipo de aplicaciones y que puede ser objeto de investigaciones futuras.

----- *Palabras clave:* Planeación y control de la producción, manufactura flexible, tecnología de grupos, FMS, backorders

#### **Abstract**

This paper studies the implications of considering or not backorders in models of planning, controlling and configuration of production in flexible manufacturing systems (FMS). Many of the models that attempt to study FMS do not consider backorders; and those that do consider it, include it as a passive variable where it is not explicitly noted the potential impact on those

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 333 49 03 ext. 105 ó 101, correo electrónico: [juan.bravo@correounivalle.edu.co](mailto:juan.bravo@correounivalle.edu.co) (J. Bravo)

systems and especially on their relationship with the demand pattern. In this study, it has been identified direct benefits of including backorders in capacity utilization, in balancing workload among machine groups (cells), and in inventory levels. Finally, it is proposed the use of the economic concept of elasticity to measure the real impact between backorders and other production factors; which is an innovative strategy in this kind of applications and can be subject of future investigations.

----- *Keywords:* Production planning and control, flexible manufacturing, group technology, backorders

## Introducción

En el enfoque de manufactura flexible llamada Manufactura Celular (MC), la técnica de Tecnología de Grupos ó TG [1] ha sido ampliamente aceptada ya que permite lograr una producción económica de una amplia variedad de artículos. La TG por si sola se limita a la agrupación de productos con características similares en familias, y de máquinas en células de trabajo, y también a la asignación eficiente de las familias a las células; es por esto que para obtener mayores beneficios en manufactura flexible, es preciso lograr una integración de la técnica de TG con la planeación de la capacidad y planeación de la producción [1]. Implementaciones exitosas de MC han resultado en reducciones de tiempos de alistamiento, mejor flujo de materiales e inventario en proceso, mejor administración de la calidad del producto y de la eficiencia en producción [2], [3]. No obstante, en los desarrollos y aplicaciones realizadas en el área de la MC se han encontrado pocos estudios que incluyan al backorder como una variable de importancia, y ninguno que explícitamente hable sobre las implicaciones del backorder en el desempeño de estos sistemas.

La inclusión de los backorders dentro de los análisis tradicionales de formación de células de manufactura no ha sido muy común. Song [4] afirmaba que mientras los backorders se comportan como una importante medida de satisfacción del cliente, aún no han sido suficientemente estudiados en la literatura, al parecer debido a la dificultad computacional asociada con su inclusión en distintos modelos.

El nivel de servicio a través del backorder también había sido identificado por Viswanathan y Goyal [5]. Sin embargo, a la fecha existen gran cantidad de artículos que abordan la manufactura celular y no consideran los backorders como un elemento relevante en sus modelos. Un ejemplo son los trabajos de Wu y otros [6] quienes consideran gran cantidad de variables en sus modelos de manufactura celular, pero no incluye los backorders dentro de la modelación propuesta. Según la revisión de literatura de Tsai y Lee [7] ningún autor había considerado los backorders como elemento dentro de modelos de manufactura celular. De la misma manera, trabajos relacionados con manufactura celular como los presentados en [3, 8 - 13], no consideran en sus modelos las implicaciones del backorder.

Más recientemente, Liu y otros [1] desarrollan un modelo que dice considerar la mayor cantidad de factores relacionados con sistemas de manufactura celular, pero no incluye en el análisis los backorders ni advierte sobre su importancia. A pesar de que en la lista de factores de producción que influyen el diseño de las células de manufactura, se encuentra la fluctuación de la demanda como un factor relevante, no se incluye en dicho listado los backorders que podrían estar relacionados con ciertos comportamientos de demanda.

En el presente artículo se muestra que los backorders, de hecho, juegan un importante papel para ciertos comportamientos de demanda de productos, y alerta sobre las posibles implicaciones de tenerlo o no en consideración en

los modelos que integran la manufactura celular, la planeación de capacidad y de producción.

En las siguientes secciones se muestra en primera instancia una revisión de literatura relevante, luego una exposición de la relación entre los backorders y el comportamiento de demanda, y posteriormente la propuesta metodológica. Por último, se muestra la planeación de los experimentos, una sección de resultados y discusión y finalmente ciertas conclusiones.

### **Antecedentes de la integración de manufactura celular con planeación de producción y capacidad**

Askin y Standrige [14] presentan un modelo de optimización en el cual realizan la agrupación de máquinas en células de trabajo, asigna familias de productos a células, establece requerimientos de capacidad para cumplir con la demanda, y considera el uso de los grupos por parte de las familias y del movimiento de material que pueda existir de una misma familia entre dos grupos. Sin embargo, este modelo no establece planes de producción, manejo de la capacidad, ni considera el uso del espacio físico.

Schaller y otros [15] presentan un modelo integrador que incluye al backorder como una variable del modelo. No obstante, no rastrean en ningún momento el impacto del backorder en la configuración final ni en los planes de producción obtenidos.

Chen y Cao [2] desarrollan un modelo de programación entera mixta no lineal de planeación de producción, integrado con manufactura celular. Dada la agrupación de máquinas en células, se considera el movimiento inter-celular, los niveles de inventario y los momentos para iniciar la producción de una parte. El objetivo de este modelo fue minimizar el costo de manipulación de productos inter-células, los costos fijos de alistamiento, y los costos de operación e inventarios. No obstante, no consideran el uso

del espacio físico, ni la posibilidad de backorders dentro del horizonte de planeación.

Defersha y Chen [16] desarrollan un modelo de optimización basado en los requerimientos y disponibilidad de herramientas en las distintas máquinas. El modelo incluye reconfiguración de células, rutas alternativas, quiebre de lotes, secuencias de operación, múltiples unidades de máquinas idénticas, capacidad de máquinas, balance de cargas de trabajo entre células (inventarios), costos de operación, costos de subcontratación, costos de alistamiento, límite en el tamaño de las células, restricciones de adyacencia de máquinas. De igual manera no consideran el uso del espacio físico, ni la posibilidad de backorders dentro del horizonte de planeación.

Balakrishnan y Cheng [3] presentan una revisión de literatura acerca de la integración de manufactura celular con planeación multi-periodo, con variaciones de demanda por periodo, considerando determinado horizonte de planeación y posibilidades de reconfiguración de células. En dicho artículo llama la atención el hecho de que en los modelos estudiados de reconfiguración de células no se menciona el mantenimiento de inventarios, lo cual sí es un elemento fundamental en el resto de los artículos analizados que incluyen o no reconfiguración.

Kioon y otros [17], desarrollan un modelo de programación entera mixta no-lineal donde incluyen rutas alternativas para los procesos, secuencias de operación, máquinas duplicadas, capacidad de máquinas, mantenimiento de inventario y quiebre de lotes. El modelo considera la posibilidad de subcontratación y la determinación de la distribución óptima de las células con posibilidad de reconfiguración, dadas diferentes demandas conocidas de una mezcla de productos dentro de un horizonte de planeación. Igualmente no consideran backorders, ni las limitaciones del espacio físico. Estos autores referencian a [16] como el último artículo científico que muestra propuestas de la

integración de MC con los planes de producción y capacidad.

De la revisión realizada se pudo determinar que a la fecha ningún artículo estudia de manera específica el efecto de los backorders dentro del proceso de planeación de la producción y capacidad en sistemas de manufactura celular, a pesar de que unos pocos de ellos si tienen al backorder pero como una variable que podría categorizarse como “pasiva” dentro de sus modelos. El modelo de integración propuesto en el presente artículo, y que forma parte de la metodología propuesta, agrupa las máquinas en células de trabajo, asigna familias de productos a células, establece los requerimientos de capacidad, adapta la capacidad mediante el manejo de los niveles de inventarios, las ordenes pendientes (backorders) y el nivel de horas máquinas, establece los tamaños de lote, y por último, establece los niveles de producción, de inventario y de backorder para cada período del horizonte de planeación. Con base en este modelo se mostrarán algunos impactos que

sobre la solución óptima tienen los backorders considerando ciertos patrones de demanda.

### Backorders y el comportamiento de la demanda

Una pregunta fundamental a responder es: ¿cuándo puede existir el backorder? Puede decirse que los backorders pueden ocurrir cuando se presentan las tres condiciones siguientes: a) El cliente debe estar dispuesto a esperar a que la orden le sea enviada, b) El cliente no puede ser atendido en el momento en que él realiza el pedido, c) La demanda pendiente debe poderse atender en un momento posterior.

Ante escenarios de capacidad de producción limitada, es razonable que los patrones de demanda con tendencia decreciente sean aquellos que favorezcan la existencia de backorders. Véase por ejemplo la figura 1a, donde la línea gruesa central representa la capacidad máxima de producción de cierto producto cuya demanda hipotética se comporta linealmente con una tendencia decreciente.

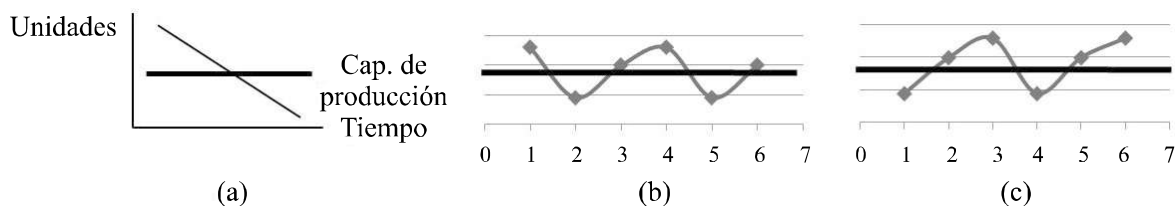


Figura 1. Patrones de demanda

No obstante, de todos los posibles patrones de demanda que pueden generar backorders, en este artículo se eligió el patrón “ondulado” el cual se puede relacionar con las condiciones (b) y (c) tal como se mostrará. Un ejemplo sencillo de dicho patrón se muestra en la figura 1b.

El patrón de demanda de la figura 1b, inicia decreciente, no tiene tendencia, y por facilidad en la explicación la identificaremos como patrón “F1” de aquí en adelante. La línea gruesa central representa la capacidad máxima de producción, observándose momentos en los cuales la demanda supera la capacidad, y otros en los cuales la

demanda es inferior a ésta. Si la demanda inicia decreciente en el momento de tiempo 1, entonces la empresa puede dejar órdenes pendientes para el periodo 2, siendo que en dicho momento la poca demanda permite el manejo de una holgura de capacidad (condición (c)) que favorece el atender no solamente la demanda del periodo 2, sino también demandas de periodos anteriores. Sin embargo, toda holgura de capacidad puede servir no solamente para atender la demanda del periodo y ciertos pedidos pendientes (backorders), sino también para dejar inventario para periodos posteriores, evitando backorders

futuros (a pesar de que el cliente esté dispuesto a esperar). En estos casos, la combinación entre backorders e inventarios sería la clave para encontrar estrategias con costos acordes a las expectativas de las empresas.

En demanda ondulada, pero iniciando creciente, sin tendencia, dentro de un horizonte de planificación, la situación puede ser diferente. A este patrón, por facilidad para explicaciones posteriores, lo denominaremos “F2” (Ver figura 1c). Dado que se inicia con una holgura de capacidad, es posible que dicha holgura se emplee para dejar inventario suficiente que evite la posibilidad de backorders futuros, posibles de ocurrir en periodos donde la demanda exceda la capacidad.

Tanto en el caso F1 como F2, ¿qué pasa si se mueve la línea central (capacidad máxima de producción)? Si la línea se mueve hacia arriba, los backorders serían cada vez menos necesarios, hasta llegar al punto de ser no necesarios. El existir la posibilidad de backorder permite pensar en adquirir una capacidad de producción razonable, no tan alta como lo requeriría el escenario de no-backorder. Se puede advertir aquí el impacto preliminar del backorder en la inversión en capacidad y en las decisiones de inventarios y de producción.

### Propuesta metodológica

Como se dijo anteriormente, para observar el impacto concreto del backorder se propone un modelo matemático de programación lineal entera mixta que realiza la integración de tres planes en el mediano plazo: plan de configuración, plan de capacidad y plan de producción. Esta propuesta se implementó para un caso estudio, basado en el trabajo desarrollado por Micán y Ocampo [18]. En la implementación se desarrolló un modelo preliminar que permitía agrupar productos en familias a través del modelo p-mediana descrito por Kusiak [19], y las agrupaciones obtenidas con dicho modelo se comportaron como un insumo para el modelo de optimización principal, que es en esencia integrador, el cual es explicado en el presente artículo.

## Modelo

### Nomenclatura

#### Conjuntos

Sea ON el conjunto de todas las operaciones, excepto la última de cada producto, F el conjunto de familias de productos (indexado por f), K el conjunto de operaciones (indexado por k), P el conjunto de productos (indexado por p), M el conjunto de máquinas (indexado por m), G el conjunto de grupos (indexado por g) y T el conjunto de periodos de tiempo en el horizonte de planeación (indexado por t).

Definase además a  $KP(p)$  como el conjunto de operaciones que pertenecen a la ruta del producto p, y a  $PF(f)$  el conjunto de productos que pertenecen a la familia f.

#### Parámetros

$D_{pt}$  = Demanda del producto  $p \in P$  en el período de tiempo  $t \in T$ .

$II_p, BI_p$  = Inventario y Backorder iniciales, del producto  $p \in P$ , respectivamente.

$CP_p, CI_p, CB_p$  = Costo de producción, costo de mantenimiento de inventario y costo de backorder por unidad del producto  $p \in P$ , respectivamente.

$CT_k$  = Costo de transporte entre grupos por lote de la operación  $k \in K$ .

$TP_{km}$  = Tiempo de producción de la operación  $k \in K$  en la máquina tipo  $m \in M$ .

$CAM_m, CM_m, EM_m$  = Capacidad, costo y espacio que ocupa la máquina tipo  $m \in M$ , respectivamente.

EG, EP = Espacio requerido entre grupos y espacio disponible en la planta, respectivamente.

CG = Costo de abrir un grupo.

$CA_f$  = Costo de asignar algún producto de la familia  $f \in F$  a un grupo.

LS, LI = Límite superior e inferior del número de máquinas por grupo, respectivamente.

nf, TO, H = Número de familias, operaciones y periodos de tiempo respectivamente.

**Variables**

$P_{pt}, I_{pt}, B_{pt}$  = Cantidad a producir, cantidad a inventariar y cantidad de backorder del producto  $p \in P$  en el tiempo  $t \in T$ , respectivamente.

$NM_{mg}$  = Número de máquinas tipo  $m \in M$  asignadas al grupo  $g \in G$ .

$Z_g = \{1, \text{si se usa el grupo } g; 0, \text{de lo contrario}\}$

$X_{kg} = \{1, \text{si se asigna la operación } k \text{ al grupo } g; 0, \text{de lo contrario}\}$

$Y_{fg} = \{1, \text{si una operación perteneciente a la familia } f \text{ se asigna al grupo } g; 0, \text{de lo contrario}\}$

$V_{kg}^+ = \{1, \text{si operaciones sucesivas } k \text{ de un producto } p \text{ se asignan a grupos diferentes. } 0, \text{de lo contrario}\}$

$W_{pt} = \{1, \text{si el producto } p \text{ se realiza en el tiempo } t, 0, \text{de lo contrario.}\}$

$Q_{kgt}$  = Cantidad (lote) a producir de la operación  $k \in K$  en el grupo  $g \in G$  y en el tiempo  $t \in T$ .

$L_{kg}$  = Número de lotes de proceso de la operación  $k \in K$  que salen del grupo  $g \in G$  en el horizonte de planeación (movimiento hacia otro grupo).

**Formulación matemática**

$\text{Min. } C = CG \times \sum_{g \in G} Z_g + \sum_{g \in G} \sum_{f \in F} Y_{fg} \times CA_f + \sum_{g \in G} \sum_{p \in P} \sum_{k \in KP(p)} CT_k \times L_{kg}$
$+ \sum_{g \in G} \sum_{m \in M} CM_m \times NM_{mg} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} CP_p \times P_{pt} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} CI_p \times I_{pt} + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} CB_p \times B_{pt}$
<p>Sujeto a</p>
<p>(1) <math display="block">\sum_{k \in K} X_{kg} \leq TO \times Z_g \quad \forall g \in G</math></p>
<p>(2) <math display="block">\sum_{g \in G} X_{kg} = 1 \quad \forall k \in K</math></p>
<p>(3) <math display="block">\sum_{f \in F} Y_{fg} \leq nf \times Z_g \quad \forall g \in G</math></p>
<p>(4) <math display="block">\sum_{p \in PF(f)} \sum_{k \in KP(p)} X_{kg} \leq TO \times Y_{fg} \quad \forall f \in F, g \in G</math></p>
<p>(5) <math display="block">X_{kg} - X_{k+1g} \leq V_{kg}^+ \quad \forall p \in P, k \in (KP(p) \cap ON), g \in G</math></p>
<p>(6) <math display="block">\sum_{g \in G} \sum_{m \in M} EM_m \times NM_{mg} + EG \times \sum_{g \in G} Z_g \leq EP</math></p>



(7)	$\sum_{g \in G} NM_{mg} \geq LI \quad \forall m \in M$
(8)	$\sum_{m \in M} NM_{mg} \leq LS \times Z_g \quad \forall g \in G$
(9a)	$\sum_{k \in K} Q_{kgt} \times TP_{km} \leq CAM \times NM_{mg}$ $\forall m \in M, g \in G, t \in T$
(9b)	$Q_{kgt} \leq X_{kg} \times \sum_{t \in T} D_{pt} \quad \forall p \in P, k \in KP(p), g \in G, t \in T$
(9c)	$Q_{kgt} \leq P_{pt} \quad \forall p \in P, k \in KP(p), g \in G, t \in T$
(9d)	$P_{pt} - Q_{kgt} \leq (1 - X_{kg}) \sum_{t \in T} D_{pt} \quad \forall p \in P, k \in KP(p), g \in G, t \in T$
10)	$\sum_{t \in T} W_{pt} \geq L_{kg} \quad \forall g \in G, p \in P, k \in (KP(p) \cap ON)$
(11)	$\left( \sum_{t \in T} W_{pt} \right) - L_{kg} \leq H \times (1 - V_{kg}^+) \quad \forall g \in G, p \in P, k \in (KP(p) \cap ON)$
(12)	$P_{pt} \leq W_{pt} \times \sum_{t \in T} D_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T$
(13)	$I_{pt-1} + P_{pt} + B_{pt} = I_{pt} + D_{pt} + B_{pt-1} \quad \forall p \in P, t \in T$
(14)	$B_{p,Horizonte} = 0 \quad \forall p \in P$
(15a)	$NM_{mg}, L_{kg} = \text{Enteros}$
(15b)	$X_{kg}, Y_{fg}, Z_g, V_{kg}^+, W_{pt} \in \{0, 1\}$
(15c)	$Q_{kgt}, P_{pt}, I_{pt}, B_{pt} \in R^+$

### **Explicación del modelo**

La función objetivo comprende los costos de uso de grupos, de asignación de las familias a los grupos de máquinas, de movimiento de material entre grupos, de asignación de máquinas a grupos, de producción, de tenencia de inventario y de backorders.

La restricción (1) se refiere al uso de los grupos, las (2, 3) se refieren a la asignación de operaciones y familias a grupos, mientras la (4) se encarga de la asignación de operaciones a grupos, partiendo de la asignación de familias a grupos. La (5) hace referencia al movimiento de operaciones entre grupos.

Luego aparecen las restricciones (6-8), las cuales se ocupan del espacio de la planta, el número mínimo de máquinas en la planta y el límite de máquinas por grupo, respectivamente. Por su parte, las restricciones (9a), (9b), (9c) y (9d) se encargan de relacionar las decisiones de capacidad, con la demanda y con las estrategias de cuanto producir. De otro lado, las restricciones (10, 11) restringen el número de viajes entre grupos de un lote de una operación y el número de viajes entre grupos en el horizonte, respectivamente. Por último, se encuentran las restricciones (12-14) que hacen referencia a la producción condicionada de los productos en el horizonte, al balance de la producción y a la no existencia de órdenes pendientes al final del horizonte de planeación, respectivamente.

#### **Datos para la experimentación**

Se tomaron los datos del caso real estudiado por [18]. Se consideraron tres productos cuya demanda mensual tienen el patrón F1. Los tres productos están agrupados en dos familias, siendo una familia formada por los productos 1 y 3, la otra familia formada por el producto 2. Esta agrupación se obtuvo usando el modelo p-mediana [20].

#### **Planeación de los experimentos**

Se estudiaron cuatro escenarios, que se diferenciaron en el manejo de cuatro parámetros

que fueron elegidos en este artículo como de estratégica importancia: Costo de Backorder, Costo de Mantenimiento de Inventario, Costo de Máquinas y Espacio disponible en planta. A continuación se describen las características básicas de estos cuatro escenarios elegidos, donde el nivel de los parámetros se estableció con el único propósito de mostrar los impactos que pueden generar los backorders en la solución óptima del modelo. Escenario 1, el costo de backorders es menor que el costo de inventario, el costo de máquina es alto y el espacio es suficiente. Escenario 2, el costo de backorders es mayor al costo de inventario, el costo de máquina es alto y el espacio, es suficiente. Escenario 3, el costo de backorders es menor que el costo de inventario, el costo de máquina es bajo y el espacio es suficiente. Escenario 4, el costo de backorders es menor que el costo de inventario, el costo de máquina es bajo y el espacio es escaso.

Se hicieron análisis extendidos de cada escenario para distintos valores del parámetro LSM (máximo número de Máquinas por grupo). Posterior a estos análisis, se analizó el desempeño del modelo, y específicamente de los backorders, asumiendo cambios en los patrones de demanda. Se hicieron pruebas con patrones F1 y F2 con tendencias crecientes y decrecientes, y con ciclos de demanda más frecuentes (picos de demanda más cercanos entre sí). Se empleó el software OPLstudio®.

## **Resultados y discusión**

### **Identificación de impactos del Backorder (B)**

En la tabla 3 se muestran los resultados del escenario 1 para un patrón F1 de demanda, para distintos valores de LS. A medida que el LS disminuye, se identifica un incremento en el número de grupos de máquinas que se conforman, favoreciendo un mayor movimiento de material entre grupos.

En la presentación de las tablas se emplean las siguientes abreviaturas: tiempo (t), con backorder



(c.b), sin backorder (s.b), tiempo ocioso (to), periódico (per), suma total (S.T), Promedio (Pro), tendencia creciente (t.c) y decreciente (t.d), desviación estándar (dvs)

**Tabla 3** Escenario 1 para distintos valores del LS

<b>Escenario 1 (patrónF1)</b>												
<b>LS ==&gt;</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
<b>B. total</b>	251	250	250	235	250	235	250	251	251	235	250	250
<b>I. total</b>	80	80	80	88	80	88	80	80	80	88	80	80
<b>S.T de <math>Z_g</math></b>	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3
<b>S.T de <math>L_{kg}</math></b>	0	0	0	0	6	6	6	12	12	12	18	18
<b>% pro de t.o x g x t (%)</b>	19	19	19	19	27	27	17	20	20	19	23	24
<b>dvs del % de t.o x g x t (%)</b>	3	3	3	2	6	6	7	3	3	2	4	5

No obstante estos cambios significativos en la configuración de la planta, existe un comportamiento relativamente estable de la mezcla optima backorders-inventarios. El balance de carga entre los grupos conformados, se observa en el indicador de tiempo ocioso por grupo y por periodo, mostrándose el promedio y la desviación estándar de dicho dato. El balance de carga entre los grupos puede advertirse en el valor de la desviación estándar, la cual es más baja en este caso particular cuando el LSM es 6 ó 12. Solo para propósito de análisis posteriores,

se consideraron los siguientes valores del LSM: 15, 6 y 4.

En la tabla 4 se muestran resultados comparativos entre los resultados del modelo con la variable  $B_{pt}$  (con posibilidad de backorder) y los resultados del modelo sin dicha variable (sin posibilidad de backorder). Tanto la cantidad de grupos conformados, como el número de máquinas totales empleadas (capacidad requerida de la planta), es visiblemente mayor en el caso “sin backorder”. Pero un resultado más llamativo es la homogeneidad de la carga de trabajo entre los grupos de máquinas.

**Tabla 4** Escenario 1 con y sin Backorder

<b>Escenario 1 (patrónF1)</b>						
<b>Indicador</b>	<b>LSM =15</b>		<b>LSM=6</b>		<b>LSM= 4</b>	
	<b>c.b</b>	<b>s.b</b>	<b>c.b</b>	<b>s.b</b>	<b>c.b</b>	<b>s.b</b>
<b>B.total</b>	251	0	235	0	250	0
<b>I. total</b>	80	0	88	0	80	0
<b>S.T de <math>NM_{mg}</math></b>	12	17	12	17	12	18
<b>S.T de <math>Z_g</math></b>	1	2	2	3	3	5
<b>S.T de <math>L_{kg}</math></b>	0	0	12	18	18	24
<b>% pro de t.o x g x t (%)</b>	19	51	19	44	24	47
<b>dvs del % de t.o x g x t (%)</b>	2,9	21,5	2,0	25,2	5,4	23,8

Sin duda, el backorder permite garantizar una homogeneidad de carga mucha mayor entre grupos, medida como la desviación estándar del tiempo ocioso por grupo por periodo. Es importante anotar que además de estos experimentos, el escenario 1 se probó con un LSM=3, caso en el cual el backorder se hizo absolutamente necesario, volviéndose infactible al quitar la opción de backorder. En otros experimentos se probó el escenario 1 fijando el LSM en 6, pero con distintos patrones de demanda: F2, F2 con periodicidad, F2 con tendencia creciente y decreciente, y F1 con tendencia creciente y decreciente. Resultó que el patrón F2 es menos propenso al uso de backorders, a menos que

dicho patrón tenga una tendencia decreciente. De igual manera, una demanda tipo F1 con una tendencia decreciente refuerza marcadamente el uso de backorders como es de esperarse, para un mismo costo unitario de backorders. Con esto podría inferirse que lo que favorece en mayor medida la existencia de backorders es la tendencia decreciente de la demanda, más que lo ondulado de la misma.

Para los escenarios 2 y 3, para el patrón de demanda F1 se obtuvo comportamientos similares al de la tabla 4, aunque con datos razonablemente distintos. El escenario 4 si mostró diferencias que pueden observarse en la tabla 5.

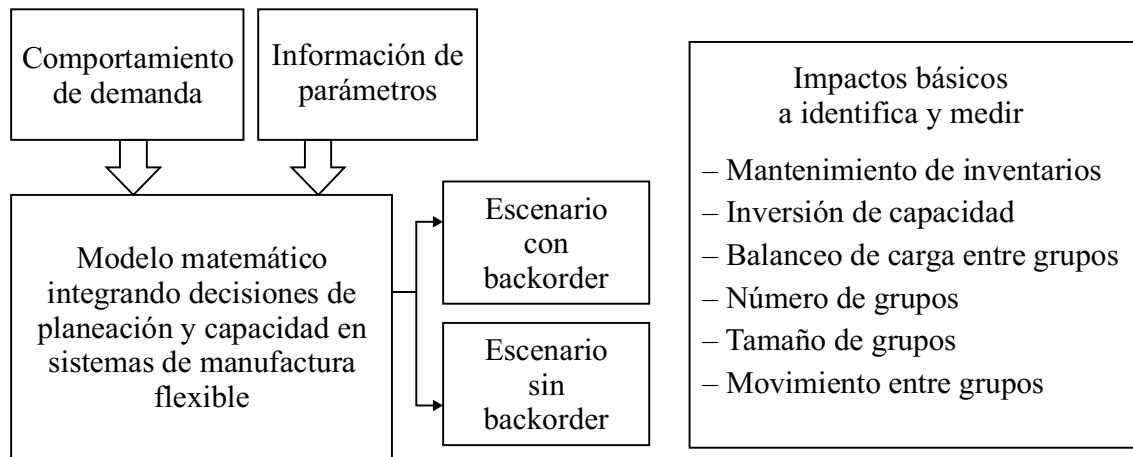
**Tabla 5** Escenario 4 con y sin Backorder

Indicador	Escenario 4 (patrón F1)					
	LSM =15		LSM=6		LSM= 4	
	c.b	s.b	c.b	s.b	c.b	s.b
<b>B. total</b>	235		251		235	
<b>I. total</b>	88		80		88	
<b>S.T de NM<sub>mg</sub></b>	12		12		12	
<b>S.T de Z<sub>g</sub></b>	1	INF.	2	INF.	3	INF.
<b>S.T de L<sub>kg</sub></b>	0		12		18	
<b>% pro. det.o x g x t (%)</b>	19		22		25	
<b>dvs del % de t.o x g x t (%)</b>	2,0		5,9		4,5	

Ante un espacio reducido de la planta, el no haber opción de backorder hace el problema infactible. Con restricciones de espacio, el backorder se comporta entonces como una alternativa valiosa a nivel administrativo y gerencial.

**Esquema metodológico y propuesta de análisis avanzado de impactos**

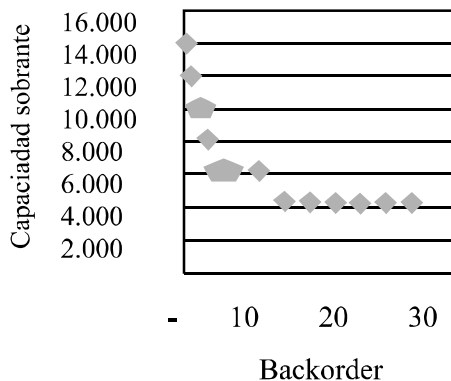
Habiendo identificado los impactos potenciales en la sección anterior, en la figura 2 se muestra la estrategia metodológica que permitirá encontrar los impactos esperados mostrados.



**Figura 2** Propuesta metodológica para identificación de impactos

A pesar de que, como se pudo observar, con los resultados anteriores se pueden cuantificar los impactos generados por el backorder, para efectos de mediciones detalladas se identificaron isocuantas eficientes, fijando el nivel de producción y variando únicamente el nivel de backorders. Partiendo de los resultados obtenidos, se construyeron dos isocuantas para efectos de este artículo.

La primera isocuanta fue entre el backorder y la capacidad sobrante, para analizar la afectación mutua de estos factores. La grafica resultó ser convexa respecto al origen según se observa en la figura 3, y por ello se asoció dicha curva a una función del tipo Cobb-Douglas [21]  $X_2 = \alpha X_1^\beta$ , donde el coeficiente  $\beta$  es la elasticidad de  $X_2$  respecto a un cambio porcentual de  $X_1$ .



**Figura 3.** Isocuanta definida por el backorder y la capacidad sobrante

Esto puede probarse partiendo de la fórmula de elasticidad [20]:

$$\epsilon_{X_1} = \frac{dX_2}{dX_1} \times \frac{X_1}{X_2} = \alpha \beta X_1^{\beta-1} \times \frac{X_1}{\alpha X_1^\beta} = \beta$$

El coeficiente  $\beta$  es en este caso la pendiente de la regresión logarítmica de la Cobb-Douglas ( $\ln X_2 = \ln \alpha + \beta \ln X_1$ ), y en este caso  $\beta$  arrojó un valor de -3.5. Este valor significa que ante un incremento del backorder del 1%, la capacidad sobrante óptima se reduce en un 3.5%, lo que significa que la utilización de la capacidad mejora en ese mismo porcentaje. Se midió también el impacto del backorder en los inventarios, teniendo ellos de igual manera una relación convexa respecto al origen. En este caso el coeficiente  $\beta$  arrojó el valor de -2.9 significando que un incremento del backorder en un 1% permite reducir en este caso los inventarios en un 2.9%. La cuantificación de estos beneficios porcentuales, y todos los demás que se realicen, deberá ser ejecutado por la empresa que decida hacer estas importantes valoraciones en su sistema productivo.

### Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que efectivamente existe un impacto importante del backorder en el desempeño de un sistema

de manufactura flexible, y que hay posibilidad de medirlo en una empresa en particular. Se observaron beneficios directos de los backorders en la utilización de capacidad disminuyendo la capacidad sobrante favoreciendo con ello el empleo de los recursos disponibles. La adecuada administración del espacio disponible en planta también es favorecida con el empleo de backorders. Otro beneficio se encontró en el balanceo de trabajo entre grupos observándose una mayor homogeneidad de carga, lo que en la práctica permitiría reducirla existencia de cuellos de botella móviles y reducir los inventarios en proceso. Los niveles de inventario también mostraron una reacción favorable a los backorders, existiendo una complementariedad entre ambos factores orientando los análisis hacia la búsqueda de la mezcla óptima inventarios-backorders. Se determinó como importante la relación entre el backorder y el patrón de la demanda, y más exactamente con la tendencia decreciente de la demanda, aspecto que se ha omitido en todos los artículos científicos que hasta el momento han abordado la manufactura flexible. Finalmente, el cálculo de la elasticidad entre el backorder y los demás factores de producción resulta ser una interesante herramienta de análisis que puede ser explotada en trabajos posteriores.

## Referencias

1. C. Liu, Y. Yin, K. Yasuda, J. Lian. "A Heuristic Algorithm For Cell Formation Problems With Consideration Of Multiple Production Factors". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* Vol. 46. 2010. pp. 1201-1213.
2. M. Chen, D. Cao. "Coordinating Production Planning In Cellular Manufacturing Environment Using Tabu Search". *Computers & Industrial Engineering [S.I.]*. Vol. 46. 2004. pp. 571-588.
3. J. Balakrishnan, C. Cheng. "Multi-Period Planning And Uncertainty Issues In Cellular Manufacturing: A Review And Future Directions". *European Journal Of Operational Research [S.I.]*. Vol. 177. 2007. pp. 281-309.
4. J. Song. "Order-Based Backorders And Their Implications In Multi-Item Inventory Systems". *Management Science [S.I.]*. Vol. 48. 2002. pp. 499-516.
5. S. Viswanathan, S. Goyal. "Incorporating Planned Backorders In A Family Production Context With Shelf-Life Considerations". *International Journal Of Production Research*. Vol. 38. 2000. pp. 829-836.
6. X. Wu, C. Chu, Y. Wang, W. Yan. "A Genetic Algorithm For Cellular Manufacturing Design And Layout". *European Journal Of Operational Research [S.I.]*. Vol. 181. 2007. pp. 156-167.
7. C. Tsai, C. Lee. "Optimization Of Manufacturing Cell Formation With A Multi-Functional Mathematical Programming Model". *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology [S.I.]*. Vol. 30. 2006. pp. 309-318.
8. M. Murugan, V. Selladurai. "Optimization And Implementation Of Cellular Manufacturing System In A Pump Industry Using Three Cell Formation Algorithms". *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology [S.I.]*. Vol. 35. 2007. pp. 135-149.
9. B. Malakooti, N. Malakooti, Z. Yang. "Integrated Group Technology, Cell Formation, Process Planning, And Production Planning With Application To The Emergency Room". *International Journal of Production Research*. Vol. 42. 2004. pp. 1769-1786.
10. R. Rajagopalan, S. Irani. "Comments On: Integrated Group Technology, Cell Formation, Process Planning, And Production Planning With Application To The Emergency Room Malakooti Et Al". *Internation Journal Of Production Research*. Vol. 44. 2006. pp. 2265-2276.
11. B. Malakooti, N. Malakooti. "Some Insights Into Malakooti Et al. 'Integrated Group Technology, Cell Formation And Process Planning' Approach". *International Journal Of Production Research [S.I.]*. Vol. 45. 2007. pp. 1933-1936.
12. N. Wei, O. Mejabi. "A Clustering Approach For Minimizing Intercell Trips In Cell Formation". *Journal Of Intelligent Manufacturing [S.I.]*. Vol. 19. 2008. pp. 13-20.
13. L. Pattanaik, B. Sharma. "Implementing Lean Manufacturing With Cellular Layout: A Case Study". *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology [S.I.]*. Vol. 42. 2009. pp. 772-779.
14. R. Askin, C. Standridge. *Modeling and Analysis of Manufacturing systems*. Group technology. John Wiley & Sons editors. 1<sup>st</sup> ed. New York. 1993. pp. 163-198.
15. J. Schaller, S. Erengüç, A. Vakharia. "A Methodology For Integrating Cell Formation And Production

- Planning In Cellular Manufacturing”. *Annals Of Operations Research [S.I.]*. Vol. 77. 1998. pp. 1-21.
16. F. Defersha, M. Chen. “A Comprehensive Mathematical Model For The Design Of Cellular Manufacturing Systems”. *International Journal of Production Economics [S.I.]*. Vol. 103. 2006. pp. 767-783.
  17. S. Ah Kioon, A. Bulgak, T. Bektas. “Integrated Cellular Manufacturing Systems Design With Production Planning And Dynamic System Reconfiguration”. *European Journal Of Operational Research [S.I.]*. Vol. 192. 2009. pp. 414-428.
  18. C. Micán, J. Ocampo. *Propuesta Metodológica Para La Programación De La Producción En Las Pymes Pertenecientes Al Sector Artes Gráficas, Área Publi-Comercial, De La Ciudad De Cali*. Tesis De Pregrado Presentada A La Universidad Del Valle. Para optar por el grado de Ingeniero Industrial. 2008.
  19. A. Kusiak. *Intelligent Manufacturing Systems*. Group technology models and algorithms. 1<sup>st</sup> ed. Ed. Prentice Hall. New Jersey (USA). 1990. pp. 206-238.
  20. H. Varian. *Microeconomic Analysis*. Technology. 3<sup>rd</sup> ed. Ed. W.W. Norton & Company. New York (USA). 1992. pp. 1-21.