

Criterios para la asignación de estrategias de cumplimentación de pedidos en el sector de bienes de equipo.

Aplicación a un fabricante de máquina-herramienta



Eduardo Saiz-González
Eduardo Castellano-Fernández
Jone Uribetxebarria-Barrena
Juan Manuel Besga-González

Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial
Maitrise de Informática
Ingeniero Industrial

IKERLAN-IK4. Centro de Investigaciones Tecnológicas. Pº J.Mº Arizmendiarieta, 2 - 20500 Arrasate. Tfno: +34 943 712400. esaiz@ikerlan.es

Recibido: 02/11/2011 • Aceptado: 06/02/2012

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4441>

CRITERIA FOR THE ALLOCATION OF ORDER FULFILMENT STRATEGIES IN THE CAPITAL GOODS SECTOR. Application to a machine-tool manufacturer

ABSTRACT

- The Capital Goods sector provides products of high added value and technical complexity, which often are customized to the needs of each customer. The continued reduction in costs and delivery times, usually high in that sector, is a key objective to remain competitive. This work seeks to identify criteria that help companies to adopt the most efficient order fulfilment strategy (OFS). Make-To-Order (MTO), Switch-To-Order (STO) and Assembly-To-Order (ATO) strategies are analyzed by using experimental design and simulation techniques applied to a real case of a machine tool manufacturer. Analyzing the influence of different demand levels and critical product variability on the cost and delivery time of machines, the strategy to use in each case is set.
- **Keywords:** Order fulfilment strategies, Capital goods, Simulation, Design of experiments, Product variability.

RESUMEN

El sector de Bienes de Equipo ofrece al mercado productos de alto valor añadido y gran complejidad técnica que, con frecuencia, se personalizan a las necesidades de cada cliente. La continuada reducción de costes y plazos de entrega, habitualmente elevados en este sector, constituye un objetivo clave para seguir siendo competitivo.

Con este trabajo se trata de identificar criterios que ayuden a las empresas del sector a adoptar la estrategia de cumplimentación de pedidos (ECP) más eficiente. Las estrategias *Make-To-Order* (MTO), *Switch-To-Order* (STO) y *Assembly-To-Order* (ATO) son analizadas mediante el empleo de técnicas de diseño de experimentos y simulación aplicadas a un caso real de un fabricante de máquina herramienta.

Analizando la influencia de diferentes niveles de demanda y variabilidad crítica del producto sobre el coste y plazo de entrega

de las máquinas, se establece la estrategia a emplear en cada caso.

Palabras Clave: estrategias de cumplimentación de pedidos, bienes de equipo, simulación, diseño de experimentos, variabilidad de producto.

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas pertenecientes al sector de bienes de equipo como, por ejemplo, fabricantes de máquinas-herramienta, maquinaria para obra civil y construcción, maquinaria de inyección de plástico, depósitos presurizados o mainframes, se están enfrentando a entornos competitivos que demandan productos más personalizados y tiempos de respuesta cada vez más cortos.

Los productos de estas empresas se caracterizan por tener un alto valor añadido, grandes dimensiones y costes elevados. Estos productos incorporan un elevado componente

de ingeniería que proporciona un amplio abanico de características que el cliente puede seleccionar para configurar el producto que necesita. Además, tienen una demanda difícil de predecir por el gran número de productos distintos y por tener volúmenes de producción muy reducidos. Si a ello se une el hecho de que el tiempo requerido para el aprovisionamiento de componentes y la fabricación de los productos es mucho mayor que el plazo de entrega que los clientes demandan, la adaptación de las empresas al nuevo escenario competitivo se convierte en un reto difícil de conseguir.

Alternativas como la de mantener ciertos componentes críticos o productos terminados en stock están muy condicionadas por la extrema variabilidad del producto, las limitaciones de recursos financieros y hasta por el espacio físico disponible por las empresas (Raturi et al, 1990; McCutcheon et al, 1994; Meredith y Akinc, 2007). En este contexto, las estrategias de cumplimentación de pedidos más habituales (Olhager, 2003; Rudberg y Wikner, 2004): *Ingeniería bajo pedido* (ETO), *Fabricación bajo pedido* (MTO), *Montaje bajo pedido* (ATO) o *Fabricación contra stock* (MTS), no son viables en muchos casos.

La primera solución de planificación sugerida en la literatura para afrontar este problema fue la de lanzar órdenes de fabricación de productos a las plantas de producción antes de recibir los pedidos de los clientes. Posteriormente, según fuesen llegando a la empresa, los pedidos serían asignados a productos que estuvieran fabricándose. Estos productos, una vez tuvieran un pedido asociado, se reconfigurarían para ajustarse a las características exactas del pedido. El plazo de entrega resultante de aplicar dicha estrategia es lógicamente menor que el correspondiente a una *Fabricación bajo Pedido* (MTO), aunque variable dependiendo del estado en que se encuentren las órdenes de fabricación a las que se asignen los pedidos. Esta estrategia para el sector de bienes de equipo fue descrita en primer lugar por Raturi et al. (1990) denominándola *Build-to-Forecast* (BTF). En trabajos posteriores se ha continuado su análisis siendo rebautizada con diferentes nombres como *Virtual-Build-to-Order* (VBTO) por Brabazon y MacCarthy (2004), *Make-To-Forecast* (MTF) por Akinc y Meredith (2006) o *Switch-To-Order* (STO) por Saiz y Castellano (2008) en su análisis de la situación del sector de bienes de equipo y de una extensa revisión de la literatura existente.

Un exhaustivo y reciente estudio de la literatura centrado en el análisis de las estrategias de cumplimentación de pedidos empleadas en el sector de bienes de equipo (Castellano y Dolado, 2010) muestra que los trabajos de investigación en esta línea tienen, en el mejor de los casos, aproximaciones parciales, i.e. parten de modelos teóricos sobre los que se aplican técnicas de simulación para la realización de análisis cuantitativos, echándose en falta la presencia de casos de estudio reales y el reflejo de los mismos en los propios modelos y simulaciones.

El trabajo presentado en este artículo trata de cubrir dicho gap. Para ello, se ha desarrollado un simulador basado en técnicas de simulación por eventos discretos y simulación

basada en agentes (Swaminathan et al., 1998; Terzi y Cavalieri, 2004; Cimino et al., 2010), con datos reales correspondiente a un fabricante de máquina-herramienta. Como paso previo y necesario para la realización de la experimentación, el simulador ha sido calibrado y validado empleando datos de demanda y resultados históricos del caso de estudio.

Mediante la experimentación posterior se ha analizado el efecto de tres estrategias de cumplimentación de pedidos (MTO, STO y ATO), empleadas habitualmente en el sector de bienes de equipo, sobre el plazo de entrega y coste de máquina, ante distintos escenarios de demanda definidos por el volumen de pedidos y la variabilidad crítica asociada al producto.

A partir de los datos obtenidos de las simulaciones y la realización de un diseño de experimentos se han identificado un conjunto de criterios que pueden servir de guía para orientar a las empresas en la introducción de la ECP que más conviene a cada situación concreta del mercado.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 CASO DE ESTUDIO

Para la realización del trabajo se ha empleado como ejemplo representativo del sector de bienes de equipo a un fabricante nacional de máquinas herramienta. La empresa dispone de un amplio catálogo de productos ofreciendo diferentes modelos, tamaños y opciones de personalización.

Para el caso de estudio se ha seleccionado una familia de producto compuesta por máquinas estándares de pequeño tamaño. Las máquinas seleccionadas tienen una estructura de producto compleja con más de dos mil referencias distintas y disponen de un elevado nivel de estandarización que permite a los clientes personalizar su máquina seleccionando la opción más adecuada de cada uno de los atributos que la definen ofreciendo más de 637 millones de combinaciones posibles (ver Tabla 1).

Algunos atributos son críticos, ya que determinan las características principales que definen cada máquina permaneciendo invariables una vez iniciado el proceso de fabricación, mientras que el resto de atributos pueden ser modificados.

En el caso concreto de la familia de producto seleccionada, las máquinas se pueden montar completamente en una sola localización o distribuir las operaciones de montaje entre las diferentes plantas que la empresa tiene tanto en territorio nacional como en el este de Europa. El proceso de fabricación completo de una máquina dura 26 semanas (ver Figura 1).

Para responder adecuadamente a los requisitos del mercado la empresa dispone de tres estrategias diferentes para cumplimentar los pedidos de los clientes:

1. *Estrategia MTO – Make-To-Order*: el proceso de fabricación de una máquina se inicia después de recibir el pedido del cliente. Cada 2

	Atributo	Crítico	Opción 1		Opción 2		Opción 3		Opción 4		Opción 5	
			Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%	Valor	%
Cursos	1 Curso Longitudinal (X)	Sí	2.000	10%	2.500	37%	3.500	53%				
	2 Curso vertical (Y)	Sí	1.000	10%	1.250	90%	1.400	0%				
	3 Curso transversal (Z)	Sí	1.000	83%	1.200	17%						
Cabezal	4 Tipo de cabezal	Sí	Automático	87%	Milesimal	10%	Manual	3%				
Control Numérico	6 Modelo	Sí	Heidenhain (1P)	97%	Heidenhain (2P)	3%	Siemens	0%	Selca	0%	Fagor	0%
	8 CNC flywheel (servo)		Portátil (N)	97%	Portátil (P)	3%	Inalámbrico	0%				
Equipamiento de refrigeración	9 Tipo de refrigeración		Inst. Previa (E)	3%	Inst. Previa (I/E)	33%	Sólo E	7%	I y E	57%		
	10 Oxigenador		No	90%	Sí	10%						
	11 Separador de aceite		No	90%	Sí	10%						
	12 Controlador de frecuencia		No	90%	Potenciómetro	10%						
	13 Refrigeración adicional		No	93%	Aire	3%	Aire/Aceite	3%				
Almacén de herramientas	14 Número y tipo		Inst. Previa (E)	30%	20T	53%	30L	7%	40L	10%		
	15 Cambio Rápido		No	90%	Servomotor	10%						
Sonda	16 Tipo de sonda		No	83%	1S /2S	17%						
Extractor de viruta	17 Extractor de viruta		Inst. Previa (1E)	30%	1E	23%	2E	0%	3E	47%		
Mesa giratoria	18 Plato giratorio		No	67%	Inst. Previa	10%	Mesa	3%	Mesa giratoria	20%		
Estructura	19 Carenado		Completo	80%	s/c	20%						
	20 Botonera		Colgante	93%	Desplazable	7%						
	21 Color		Estándar	100%	s/c	0%						
Cliente	22 Volaje/Frecuencia		400 V / 50 Hz	97%	s/c	3%						
Teleservicio	23 Teleservicio		No	80%	Sí	20%						

Tabla 1: Mapa de atributos y opciones de la familia de producto seleccionada

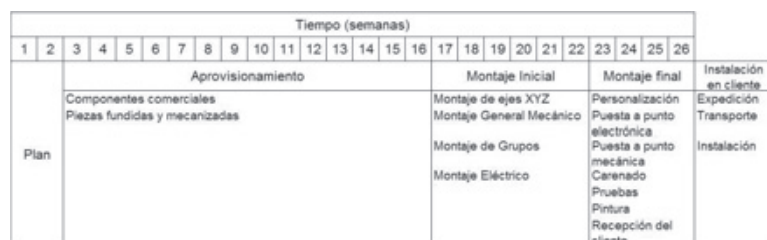


Figura 1: Fases del proceso de fabricación de la familia seleccionada



Figura 2: Estrategia MTO

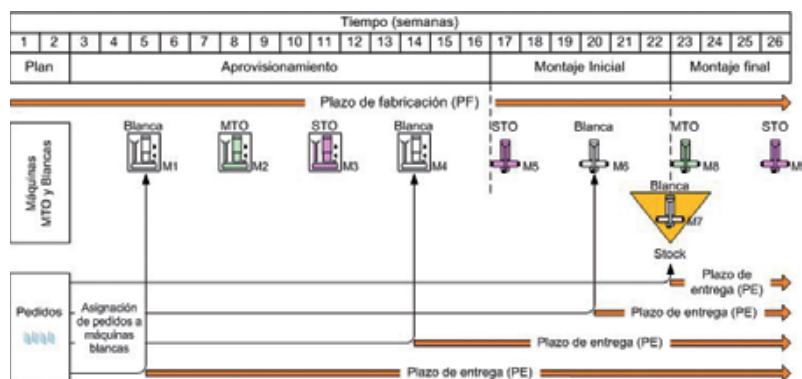


Figura 3: Estrategia STO

semanas se planifican los pedidos iniciándose el aprovisionamiento de componentes de las máquinas que dura un total de 14 semanas (Figura 2: máquinas M1-M2-M3-M4). El proceso continúa otras 10 semanas en las que se realizan las operaciones de montaje hasta la finalización y entrega de cada máquina (máquinas M5-M6-M7-M8).

2. *Estrategia STO – Switch-To-Order*: con esta estrategia, la fabricación de máquinas se inicia antes de la recepción de los pedidos del cliente. En función de datos históricos de consumo y de previsiones de comercial, se planifica la fabricación de máquinas denominadas “blancas” o “huérfanas” (Akinc y Meredith, 2006), definiendo sus opciones críticas. Cuando un pedido llega a la empresa, se procede a asignarlo a una máquina que no haya sido asignada todavía (Figura 3: máquinas blancas M1-M4-M6-M7, máquinas ya asignadas M3-M5-M9). La asignación se realiza aplicando reglas relacionadas con las características técnicas de la máquina, el plazo de entrega solicitado, el margen de beneficio generado o la importancia del cliente. El plazo de entrega es variable dependiendo de la fase del proceso de fabricación en la que se encuentre la máquina elegida. Una vez asignada la máquina blanca se procede a adecuarla a las características del pedido introduciendo las modificaciones y componentes que sean necesarios.

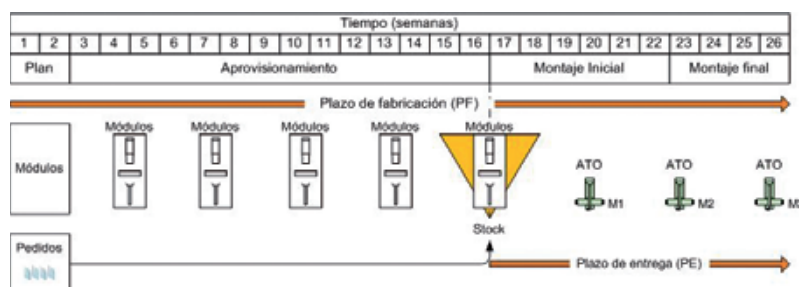


Figura 4: Estrategia ATO

Cuando no es posible asignar un pedido a ninguna máquina blanca, la máquina solicitada se fabrica desde el principio (máquinas M2-M8), coincidiendo su plazo de fabricación con el de entrega. En el caso de que el montaje inicial de una máquina blanca termine sin ser asignada a ningún pedido, se detiene su montaje, permaneciendo en stock a la espera de su asignación posterior (máquina blanca M7). Este criterio se introduce debido a que la mayor parte de la variabilidad no crítica de la máquina tiene lugar en las operaciones de montaje final. De esta forma se facilita su asignación posterior reduciendo los costes de reconfiguración.

3. *Estrategia ATO – Assembly-To-Order*: el montaje de las máquinas se inicia después de la recepción del pedido partiendo de módulos disponibles en stock sobre los que se realizan las operaciones de montaje necesarias para ajustarse a los requisitos concretos del cliente. Con esta estrategia se consigue que el plazo de entrega sea inferior al de fabricación diferenciándose de la estrategia STO en que el plazo de entrega resultante es fijo (10 semanas). La composición y cantidad de módulos que se han de mantener en stock es una decisión que ha de tomar la empresa en función de la variabilidad del producto, de las limitaciones financieras y del plazo de entrega que se desea ofrecer el mercado. Los módulos se planifican en función de previsiones estableciéndose qué módulos han de lanzarse a fabricación.

2.2 MÉTODO DE TRABAJO

Para la elaboración del estudio se ha seguido un método de trabajo compuesto por las siguientes fases: (1) Desarrollo del simulador; (2) Introducción de datos, calibración y validación del simulador; (3) Diseño de la experimentación; (4) Simulación; (5) Análisis de resultados e identificación de criterios de asignación. Seguidamente, se describen las cuatro primeras fases mientras que la quinta se detalla en los apartados 3 - Resultados y 4 - Discusión de este artículo.

2.2.1 Desarrollo del simulador

El simulador correspondiente al caso de estudio se ha construido personalizando un simulador genérico desarrollado previamente (Saiz et al, 2006). Este simulador permite analizar el rendimiento de una Cadena de Suministros (CdS) como resultado de la introducción de variaciones en la demanda, la topología de la red, la estructura del producto y de operaciones o la asignación de inventarios, entre otros.

La construcción del simulador se ha iniciado con la creación de la topología de la red que se compone de “nodos” y “arcos”. Los nodos corresponden a puntos de la CdS donde se producen actividades: centros de producción, almacenes, distribuidores y puntos de venta. Cada nodo es un “agente” que se comportan según una serie de reglas definidas interactuando entre ellos y generando el comportamiento del sistema mientras que las distintas actividades se han modelado en base a eventos discretos empleando diagramas de estado. Los nodos están conectados por ‘arcos’, a través de los cuales tiene lugar la transmisión de la información y materiales. Cada nodo envía pedidos a sus nodos proveedores y recibe materiales de estos e, igualmente, recibe pedidos de sus nodos clientes y envía materiales a estos.

A continuación, se han definido los procesos con los que se van a simular los pedidos de cliente para cada una de las tres estrategias de cumplimentación de pedidos:

MTO

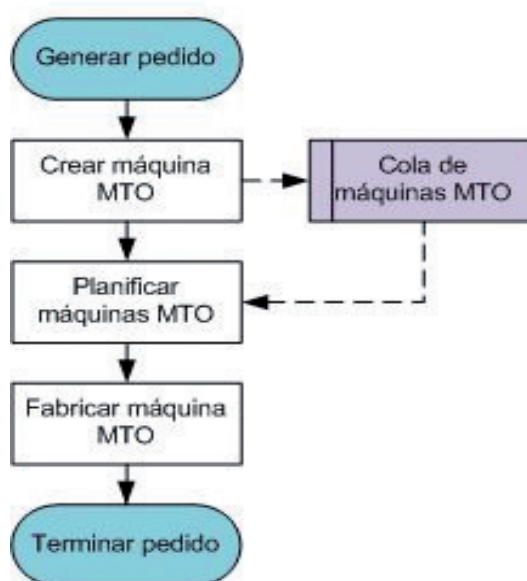


Figura 5: Proceso de simulación MTO

- *Proceso de simulación para la estrategia MTO*

El proceso se inicia con la creación del pedido del cliente empleando una función de generación de pedidos. Seguidamente, se crea la máquina MTO con los atributos indicados en el pedido y se introduce en una cola a la espera de ser planificada. Periódicamente, se planifican las máquinas MTO en cola estableciéndose el momento en el que se han de lanzar a fabricación. Cuando se alcanza el instante de lanzamiento de una máquina MTO, se inicia el proceso de aprovisionamiento y las operaciones de montaje. Finalizado el montaje, puesta a punto y recepción por el cliente, se da por cerrado el pedido de la máquina MTO.

- *Proceso de simulación para la estrategia STO*

El proceso se compone de dos flujos principales: el primero se inicia con la generación de una máquina blanca. Esta máquina se introduce en una cola de máquinas STO a la espera de ser planificada. En esta cola puede haber otras máquinas blancas o máquinas especiales de pedidos de cliente que se han de fabricar MTO. Al igual que con el modelo anterior, la planificación se realiza a intervalos de tiempo regulares determinando el instante en el que se ha de lanzar cada máquina. Cuando se alcanza el instante de lanzamiento de una máquina STO, se inicia su proceso de fabricación hasta finalizar las operaciones de montaje inicial (esqueleto de la máquina). Si en ese momento la máquina

STO está asignada a un pedido de cliente, el proceso de fabricación continúa con las actividades de montaje final. En caso contrario, el proceso se detiene y la máquina STO permanece en stock a la espera de que llegue un pedido al que pueda ser asignada. El segundo flujo comienza con la generación del pedido del cliente y la búsqueda a lo largo de todo el proceso de fabricación de la máquina STO que más se ajusta a los requisitos del pedido. En el caso de que no tenga lugar la asignación, se crea una máquina que se ha de fabricar MTO y se incluye en la cola de máquinas STO pendientes de planificar.

- *Proceso de simulación para la estrategia ATO*

En este proceso, también, se contemplan dos flujos principales: el primero se inicia con la generación de módulos. La principal diferencia con la estrategia STO radica en que con STO se genera una máquina que incorpora desde el inicio todos los módulos que la forman mientras que con la estrategia ATO, los módulos se generan independientemente para ser asignados posteriormente a las máquinas pedidas por los clientes. Una vez finalizado el módulo, este permanece en stock a la espera de ser incorporado a una máquina. El segundo flujo comienza con la generación del pedido del cliente. En ese momento se comprueba la existencia de todos los módulos necesarios para fabricar la máquina solicitada por el cliente. Si hay disponibilidad, se asignan los módulos

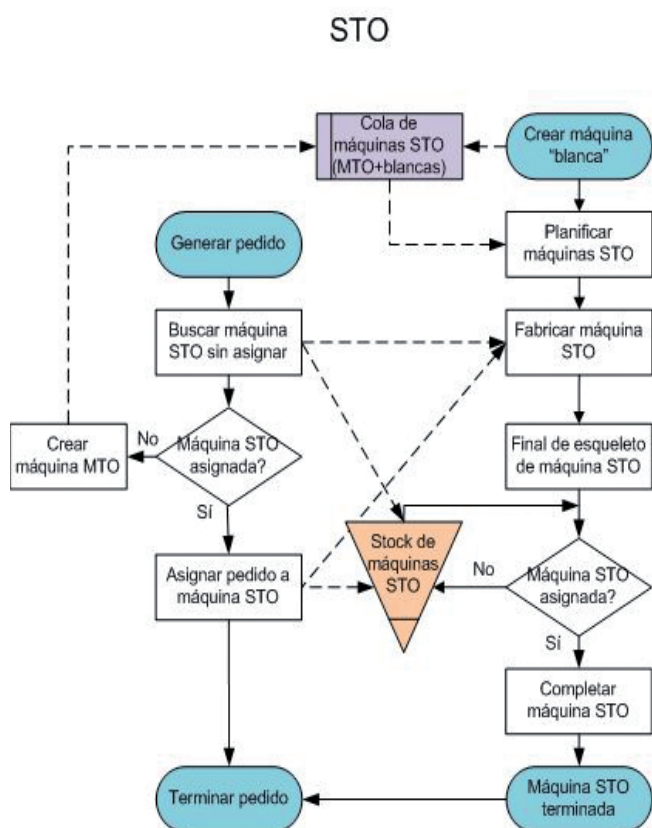


Figura 6: Proceso de simulación STO

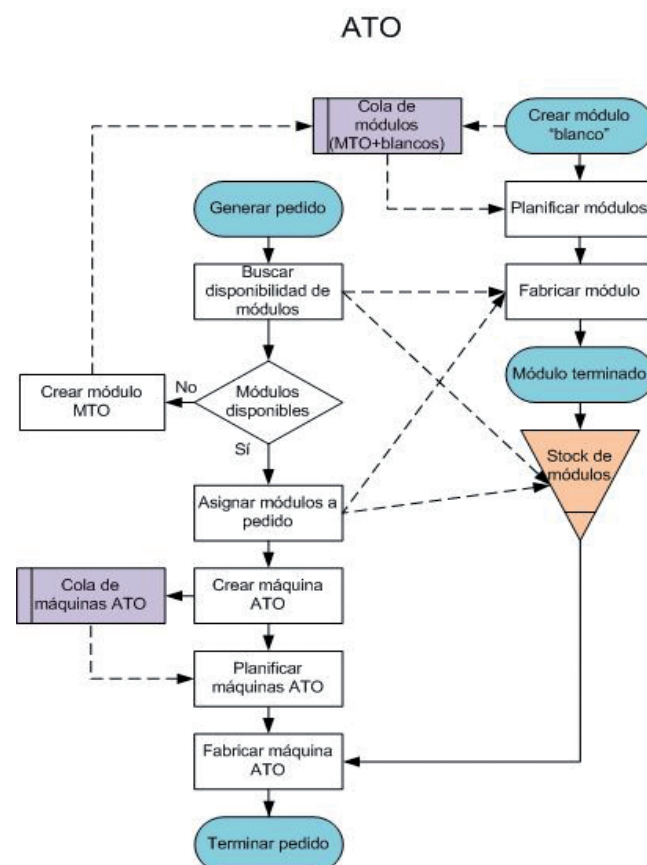


Figura 7: Proceso de simulación ATO



Finalmente, se ha tenido que definir el interfaz gráfico del modelo con el que se va a visualizar la ejecución y los resultados de las simulaciones.

Durante esta fase se ha procedido a la introducción en la base de datos del simulador de toda la información necesaria para realizar las simulaciones. La calibración y validación del simulador se ha realizado simulando demandas históricas y contrastado los resultados obtenidos con datos reales de la empresa. El elevado nivel de detalle con el que se ha

2.2.3 Diseño de la experimentación

- Factor 1: *Estrategia de Cumplimentación de Pedidos* con tres niveles: *MTO*, *STO* y *ATO*.
- Factor 2: *Volumen de pedidos* con tres niveles correspondientes a diferentes supuestos de demanda: *Demand media* (D_m) que corresponde a una situación normal de mercado establecido en un pedido semanal, *Demand alta* (D_a) superior en un 25% a la normal y *Demand baja* (D_b) inferior a la normal en un 25%.
- Factor 3: *Variabilidad crítica del producto* con tres niveles en función del número de opciones que pueden tomar cada uno de los cinco atributos

Atributos Críticos	Variabilidad crítica baja (Vb)		Variabilidad crítica media (Vm)		Variabilidad crítica alta (Va)		
	Opción 1	Opción 2	Opción 1	Opción 2	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Longitud Eje X	2.000	2.500	2.000	2.500	2.000	2.500	3.500
Longitud Eje Y	1.000		1.000		1.000	1.250	
Longitud Eje Z	1.000		1.000	1.200	1.000	1.200	
Cabecal	Automático		Automático	Manual	Automático	Manual	Milesimal
Control Numérico	Heidenhain		Heidenhain		Heidenhain	Siemens	

Tabla 2: Mapa de atributos y opciones de máquinas

críticos asociados a las máquinas según se muestra en la Tabla 2.

Para medir la respuesta de la CdS se han definido dos variables de salida:

1. *Plazo de entrega*: tiempo en días que espera el cliente a recibir su pedido.
2. *Coste de máquina*: valor del coste total de una máquina.

El método de experimentación empleado es un diseño factorial completo de 27 unidades experimentales resultantes de la combinación de niveles de los tres factores. Estas unidades experimentales corresponden a situaciones representativas de la evolución experimentada por el mercado de la familia de producto seleccionada. Para cada una de ellas se han realizado varias simulaciones, cogiendo como datos para el análisis los valores medios de las variables de salida.

3. RESULTADOS

La obtención de resultados se ha realizado en dos etapas: en primer lugar, se ha hecho un análisis de la varianza (ANOVA) como método de contraste para conocer si un factor o una interacción entre factores influyen en las variables de salida. El nivel de confianza empleado ha sido del 95% ajustándose al nivel de significación estadístico del 5% que es el empleado habitualmente para este tipo de análisis. En segundo lugar, se ha procedido a analizar el efecto de los factores e interacciones relevantes en las variables de salida.

En las Tablas 3 y 4 se muestran los resultados del ANOVA para el plazo de entrega y coste de máquina.

Los factores que más influyen sobre ambas variables de salida son la ECP y la variabilidad crítica del producto siendo sus efectos estadísticamente significativos al tener un valor-p mucho menor que 0,05 (prácticamente nulo) que corresponde al nivel de significación empleado. El volumen de pedidos, también influye en el plazo de entrega pero en menor medida que los otros dos factores al tener un valor-p mayor (0,00260).

Igualmente, las dos variables de salida dependen fuertemente de la interacción existente entre la ECP y la variabilidad crítica del producto que se describe a continuación.

En el caso del plazo de entrega, el gráfico de la Figura 9 muestra que la interacción más fuerte entre los dos factores se produce con la estrategia STO. Cuando la variabilidad crítica es baja, la estrategia STO genera los plazos de entrega más cortos. Sin embargo, cuando la variabilidad aumenta, su plazo de entrega crece rápidamente hasta situarse por encima de los plazos que se consiguen con MTO y ATO. Estas dos estrategias presentan una interacción mínima ofreciendo plazos de entrega prácticamente constantes que no dependen de la variabilidad crítica y siendo el plazo de entrega de la estrategia ATO inferior al de MTO.

Similares resultados se obtienen para el coste de máquina. La interacción más fuerte se produce con la estrategia STO. Cuando la variabilidad crítica es baja, STO genera un coste de máquina similar al de ATO. Este coste se incrementa de forma significativa cuando la variabilidad aumenta. Por el contrario, las estrategias MTO y ATO mantienen un coste de máquina constante e independiente de la variabilidad crítica, siendo el coste de máquina del ATO superior al de MTO.

4. DISCUSIÓN

Observando los resultados de la experimentación, la primera conclusión que se extrae de ellos es que la estrategia MTO es la más adecuada cuando el mercado demanda plazos de entrega iguales o superiores a los plazos de fabricación por ser la que presenta menores costes de fabricación. El inicio de la fabricación de la máquina después de recibir el pedido del cliente evita tener que introducir modificaciones posteriores en la máquina por estar perfectamente definida desde el principio. Adicionalmente, esta estrategia permite financiar los aprovisionamientos y operaciones de montaje con esquemas de pagos que se pueden distribuir a lo largo de todo el proceso de fabricación.

Sin embargo, cuando el plazo de entrega requerido por el mercado es inferior al plazo de fabricación la estrategia

Fuente:	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: ECP	11654	2	5827	113,64	0,00000
B: Variabilidad crítica	5469	2	2734	53,32	0,00000
C: Volumen de pedidos	1413	2	706	13,77	0,00260
INTERACCIONES					
AB	10283	4	2571	50,13	0,00000
AC	180	4	45	0,88	0,51860
BC	204	4	51	0,99	0,46330
RESIDUOS	410	8	51		
TOTAL (CORREGIDO)	29613	26			

Tabla 3: ANOVA del plazo de entrega

Fuente:	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-p
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: ECP	1.312.230.000	2	656.116.000	304,460000	0,00000
B: Variabilidad crítica	244.321.000	2	122.161.000	56,690000	0,00000
C: Volumen de pedidos	13.469.300	2	6.734.670	3,130000	0,09930
INTERACCIONES					
AB	491.736.000	4	122.934.000	57,050000	0,00000
AC	23.892.900	4	5.973.220	2,770000	0,10260
BC	8.769.220	4	2.192.300	1,020000	0,45340
RESIDUOS	17.240.000	8	2.155.000		
TOTAL (CORREGIDO)	2.111.660.000	26			

Tabla 4: ANOVA del coste de máquina

MTO no constituye una alternativa válida por lo que se ha de emplear alguna de las dos estrategias restantes STO o ATO.

Tal como se aprecia en la Figura 9, la estrategia STO es la que ofrece los plazos de entrega más cortos siempre que la variabilidad crítica del producto sea pequeña. Cuando las máquinas tienen un número reducido de opciones para los atributos críticos, la estrategia STO permite elaborar planificaciones basadas en previsiones lanzando a fabricación máquinas blancas con muchas probabilidades de ser asignadas a futuros pedidos. Además, cuanto menor es esa variabilidad, las asignaciones tienen lugar en fases

más avanzadas del proceso de fabricación consiguiéndose plazos de entrega menores.

A medida que se incrementa el número de posibilidades de configurar el producto se complica la elaboración de previsiones disminuyendo la efectividad del STO. Esto se traduce en un incremento de las modificaciones a introducir en las máquinas blancas para adaptarlas a las características de los pedidos del cliente. Por este motivo, los costes de fabricación originados por necesidades de reconfiguración crecen rápidamente según se incrementa la variabilidad crítica del producto.

A partir de cierta variabilidad crítica del producto, la estrategia ATO se convierte en la alternativa más eficiente para conseguir plazos de entrega inferiores al de fabricación. La disponibilidad de un stock de variantes de componentes críticos de la máquina

(módulos) permite iniciar la fabricación de máquinas a partir de la recepción de los pedidos de clientes. De esta forma se consigue acortar el plazo de entrega y que, a diferencia con la estrategia STO, sea constante. No obstante, esta estrategia requiere que el producto disponga de una concepción modular adecuada para conseguir un plazo de entrega competitivo y que se planifique adecuadamente la cantidad de cada una de las variantes de módulos que se han de tener en stock. Este aspecto constituye un punto crítico para asegurar la viabilidad de la aplicación de la estrategia ATO. Los costes financieros requeridos para la creación del

Variabilidad crítica de producto	Plazo de Entrega	Coste de Fabricación	MTO	STO	ATO
Cualquiera	≥ Plazo de Fabricación	Menor	✓		
Alta	< Plazo de Fabricación	Medio			✓
Media	< Plazo de Fabricación	Medio			✓
Baja	<< Plazo de Fabricación	Mayor		✓	

Tabla 5: Criterios de asignación de ECP

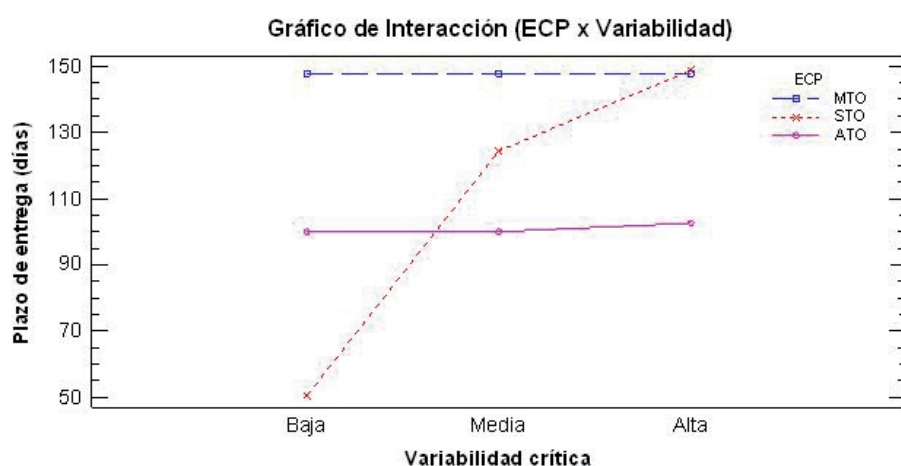


Figura 9: Interacción ECP-Variabilidad crítica del producto para el plazo de entrega

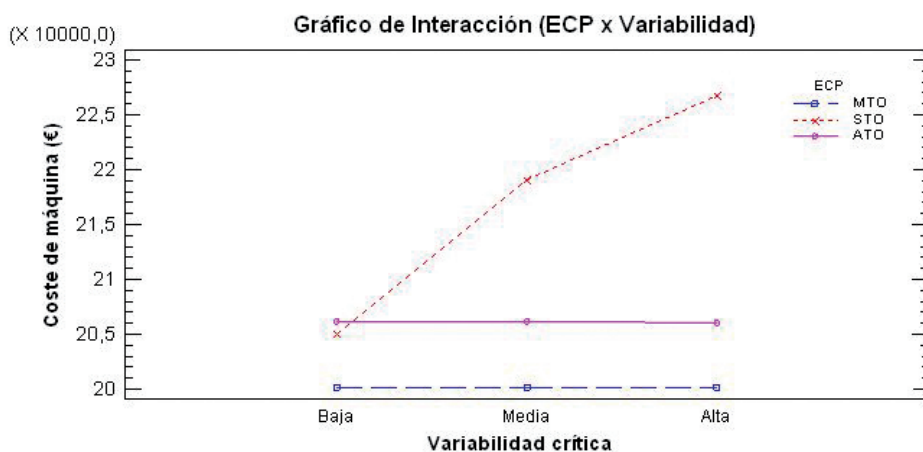


Figura 10: Interacción ECP-Variabilidad crítica del producto para el coste de máquina

stock de módulos implican costes adicionales que han de añadirse a los generados por la estrategia MTO que, como se ha indicado anteriormente, es la más eficiente en cuanto a costes de fabricación.

Otra conclusión que se obtiene del análisis es que el volumen de pedidos no es un factor especialmente significativo. Cuando el volumen de pedidos supera la capacidad disponible, el efecto sobre el plazo de entrega es similar para todas las ECP, sumándose al plazo de entrega normal de cada ECP el tiempo de permanencia en cartera de pedidos.

En la Tabla 5, se muestra a modo de resumen los criterios de asignación descritos:

La empresa fabricante de máquina herramienta escogida como caso de estudio ha empleado las tres estrategias de cumplimentación de pedidos en función de cómo han evolucionado las necesidades del mercado. Inicialmente, la

familia de producto seleccionada se fabricaba con la estrategia MTO ofreciendo los plazos de entrega habituales del mercado, iguales o superiores al plazo de fabricación. Observando la competencia, principalmente de países asiáticos, se planteó la idea de ofrecer al mercado una gama de producto estándar con un número limitado de opciones de configuración y con plazos de entrega inferiores al estándar del mercado. Para ello, se implementó de forma intuitiva la estrategia STO. El éxito de ventas obtenido por la empresa y, la posibilidad de incrementar su cuota de mercado, hizo que desde el área comercial se ampliara el número de opciones críticas de producto que podía elegir el cliente. Esto complicaba enormemente la generación de previsiones fiables optando por introducir la estrategia ATO, aun asumiendo el riesgo y coste financiero de disponer de un stock de módulos en el almacén como contrapartida a ofrecer plazos de entrega más cortos.

Una de las claves por la que la empresa ha podido experimentar esta evolución ha sido la forma de estructurar su producto asociando la variabilidad crítica a las fases iniciales del proceso de fabricación de la máquina dejando el resto de variabilidad

a las fases finales del montaje con lo que se puede ofrecer al cliente múltiples combinaciones de producto sin que afecte al plazo de entrega o coste de la máquina.

Las conclusiones de este trabajo de investigación validan las decisiones tomadas por la empresa. Las ideas y conclusiones presentadas pueden servir como elemento de reflexión para dichas empresas sobre la posibilidad de implementar una nueva estrategia de cumplimentación de pedidos que permita abordar el mercado de forma más competitiva.

No obstante, es necesario indicar que los resultados del estudio corresponden al caso concreto analizado, por lo que las conclusiones no se pueden considerar directamente trasladables a todo el sector de bienes de equipo. Para ello, sería necesario ampliar la investigación a una muestra más amplia de empresas del mismo sector. Esta investigación permitiría profundizar en otros temas de interés como, por

ejemplo, la relación existente entre la forma de estructurar el producto y la incorporación de la variabilidad al proceso de fabricación para ofrecer al mercado plazos de entrega y costes de máquina competitivos.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013) con el Proyecto "Resilient Multi-Plant Networks" cuyo número de acuerdo de subvención es NMP2-SL-2009-229333.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Akinc U, Meredith JR. "Choosing the appropriate capacity for a make-to-forecast production environment using a Markov analysis approach". IIE Transactions. 2006. Vol.38-10 p.847-858. <http://dx.doi.org/10.1080/07408170600750040>
- Brabazon PG, MacCarthy BL. "Virtual-Build-to-Order as a Mass Customization Order Fulfilment Model". Concurrent Engineering Research and Applications. 2004. Vol.12-2 p.155-165. <http://eprints.nottingham.ac.uk/524/>
- Castellano E, Dolado J. "Production operational strategies for high-value-added manufacturing companies. A literature review". En: Industrial Engineering as University Third Mission agent. Actas del 4th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management - XIV Congreso de Ingeniería de Organización - CIO2010, (Donostia-San Sebastián 8-10 de septiembre de 2010). 2010a. p.1309-1319. ISBN: 978-84-95809-79-7. http://www.adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2010/OPERATIONS_MANAGEMENT/1309-1319.pdf
- Cimino A, Longo F, Mirabelli G. "A General Simulation Framework for Supply Chain Modeling: State of the Art and Case Study". International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7, Issue 2, No 3. <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1004/1004.3271.pdf>
- McCutcheon DM, Raturi AS, Meredith JR. "The customization-responsiveness squeeze". Sloan Management Review. 1994. Vol.35-2 p.89-99.
- Meredith JR, Akinc U. "Characterizing and structuring a new make-to-forecast production strategy". Journal of Operations Management. 2007. Vol.25 p.623-642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2006.04.006>
- Olhager J. "Strategic positioning of the order penetration point". International Journal of Production Economics. 2003. Vol.85 p.319-329. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00119-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00119-1)
- Raturi AS, Meredith JR., McCutcheon DM et al. "Coping with the Build-to-Forecast Environment". Journal of Operations Management. 1990. Vol.9-2 p.230-249. [http://dx.doi.org/10.1016/0272-6963\(90\)90097-W](http://dx.doi.org/10.1016/0272-6963(90)90097-W)
- Rudberg M, Wikner J. "Mass customization in terms of the customer order decoupling point". Production Planning & Control. 2004. Vol.15-4 p.445-458. <http://www.academicjournals.org/AJBM/PDF/pdf2010/June/Chen%20and%20Hao.pdf>
- Saiz E, Castellano E, Besga JM, Zugasti I, et al. "Global and Flexible Supply Networks Modelling and Simulation". En: Blecker T, Kersten W (Eds.) Operations and Technology Management II: Complexity Management in Supply Chains. Concepts, Tools and Methods. Series on Operations and Technology Management Vol. 2. Erich Schmidt Verlag, Berlin. 2006. ISBN: 3 503 09737 6.
- Saiz E, Castellano E. "Driving Mass Customisation In Supply Networks. A Machine Tool Sector Case Study". En: Mass Customisation Services. Proceedings of the Joint Conference of the International Mass Customization Meeting 2008 (IMCM'08) and the International Conference on Economic, Technical and organisational Aspects of Product Configuration Systems (PETO'08). Edwards K., Blecker T, Salvador F, Hvam L, Friedrich, G. (Eds.). (Copenhagen 19-20 de junio de 2008). ISBN: 978-87-90855-12-3.
- Swaminathan JM, Smith SF, Sadeh NM. "Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach". Decision Sciences. 1998. Vol. 29-3 p.607-632. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/user/sfs/www/papers/dsj04.pdf>
- Terzi S, Cavalieri S. "Simulation in the supply chain context: a survey". Computers in Industry. 2004. Vol. 53 p.3-16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00104-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00104-0)