

## Modelado de velocidad de tirada y tiempos de preparación de procesos de fabricación de cajas de cartón

Pedro Sánchez Martín<sup>1</sup>, Andrés Ramos Galán<sup>1</sup>, Ramón Rodríguez Pecharromán<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ICAI). Universidad Pontificia Comillas, Alberto Aguilera 23, 28015-Madrid (Madrid). pedro.sanchez@iit.icaei.upco.es, andres.ramos@iit.icaei.upco.es, ramon@dea.icaei.upco.es

### Resumen

*Esta comunicación describe el modelado de la velocidad de tirada y de los tiempos de preparación de pedidos de cajas de cartón en el proceso de impresión y troquelado de la empresa MICROLAN S.A. Un análisis de correlación permite determinar las características de los pedidos que influyen sobre ambas magnitudes. En el artículo se detallan ambos modelos matemáticos. Su validación se realiza mediante el uso de datos históricos de producción y se extraen conclusiones de los resultados obtenidos. Finalmente, se muestra la implantación realizada en la empresa para estimar de forma sencilla tanto la velocidad de tirada como los tiempos de preparación.*

**Palabras clave:** Capacidad, Métodos y tiempos de preparación, Regresión

### 1. Introducción

La fabricación de cajas de cartón comienza con la obtención de planchas de cartón corrugado a partir de bobinas de papel. El cartón puede estar formado por tres o cinco papeles. En el caso de tres papeles, el papel intermedio se ondula antes de unirse a otro papel mediante la impregnación de una mezcla de agua y almidón, posteriormente estos dos papeles se unen análogamente al tercero. Una vez unidos los tres, el cartón se compacta mediante un proceso de secado, ver Fig. 1.

A la vez que se forma el cartón, éste se corta en planchas rectangulares con las medidas necesarias para ser procesadas posteriormente. Las planchas de cartón son paletizadas y enviadas a la zona de alimentación del módulo de impresión. Dicho módulo consta de siete grupos (tantos como tintas diferentes se pueden imprimir sobre las planchas) lo cual permite alcanzar una elevada calidad en la imagen impresa. Mediante una cinta transportadora las planchas impresas alimentan al módulo de troquelado, en el cual se recortan dando lugar a cajas de cartón. Posteriormente se envían a la paletizadora paquetes de cajas y tras ser paletizados se envían al cliente, o bien previamente las cajas se doblan y pegan en otro módulo para ser posteriormente paletizadas y enviadas al cliente.

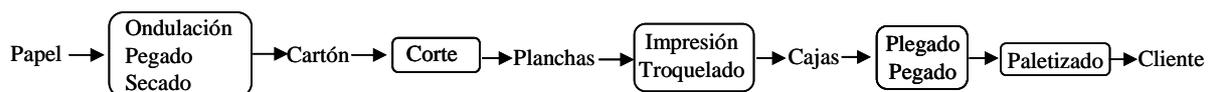


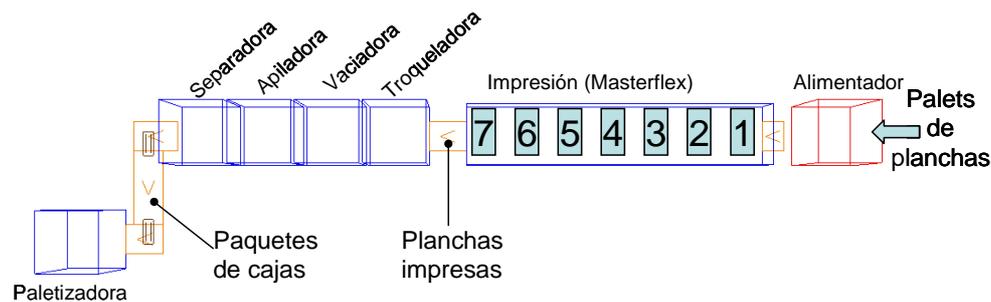
Fig. 1. Diagrama de flujo del proceso productivo

## 2. **Ámbito del estudio**

El estudio contenido en este artículo se centra en la parte del proceso que imprime y troquea las planchas de cartón. En la Fig. 2 se muestra el esquema de esta parte del proceso, representándose el flujo productivo de derecha a izquierda. Se parte de la alimentación de planchas al módulo de impresión en el cual se dispone de siete grupos que permiten aportar tintas distintas a la plancha según las características del pedido. Tras el módulo de impresión se suministran las planchas impresas directamente al módulo de troquelado.

Este módulo de troquelado consta de varios submódulos. El primero es el denominado troqueladora en el cual mediante un troquel específico de cada pedido se realizan los cortes y perforaciones necesarios, para obtener posteriormente una o varias cajas de una misma plancha. Una vez que la plancha es troquelada, el cartón sobrante ha de ser eliminado mediante el uso de la vaciadora la cual utiliza dos paneles, macho y hembra, específicos para cada pedido.

Las planchas, una vez troqueladas y vaciadas, son apiladas en paquetes de un tamaño prefijado. Dichos paquetes son enviados hacia la paletizadora mediante un transportador de rodillos. En el caso de que hubiera más de una caja por plancha los paquetes son separados en paquetes de cajas en la separadora antes de ser enviados a la paletizadora.



**Fig. 2. Esquema del proceso de impresión, troquelado y paletizado**

El objetivo del estudio es la estimación de velocidades de tirada y tiempos de preparación de pedidos para el proceso de impresión y troquelado de cajas en la empresa MICROLAN S.A.. Con este estudio se pretende mejorar la eficiencia de la programación diaria y semanal de pedidos al ser capaz de precisar mejor la capacidad productiva de una parte del proceso de fabricación. Así mismo, este estudio basado en la metodología de métodos y tiempos [1] puede utilizarse en el diseño de un sistema de incentivos que valore adecuadamente el tiempo de tirada y de preparación de cada pedido.

Los pedidos nuevos han sido excluidos de este estudio, ya que tienen una gran variabilidad en el tiempo invertido en las pruebas de tintas y útiles de troquelado; además, su velocidad de tirada suele ser menor que la habitual. En la puesta en marcha de pedidos nuevos se producen situaciones en las cuales no es posible iniciar la tirada del pedido. Así por ejemplo pueden ocurrir anomalías graves en los útiles que no permitan fabricar, o bien que la calidad obtenida esté por debajo de las especificaciones del cliente.

### **3. Características que influyen en la dificultad de un pedido**

Los pedidos tienen multitud de características que hacen que su elaboración tenga distinta dificultad. En este apartado se detallan aquellas características que han resultado más influyentes en el establecimiento de la velocidad de tirada y del tiempo de preparación del pedido. Para ello se han utilizado métodos de correlación y regresión múltiple [2].

Dos de las características que afectan en mayor medida a la velocidad de tirada son el tipo de cartón y el número de cajas por plancha. El tipo de cartón que sale del proceso de ondulación-pegado-secado tiene distinto grosor y resistencia en función del tipo de papel ondulado que se utiliza entre dos papeles lisos y de si contiene 3 ó 5 papeles. Técnicamente se denomina a los distintos tipos de cartón con el número de canal utilizado en la onduladora. Se dispone de 8 canales. En cuanto al número de cajas por plancha, dicho número determina los paquetes de cajas que se obtienen por cada paquete de planchas. Por tanto este número condiciona el funcionamiento de los submódulos de separadora y de la manutención entre separadora y paletizadora (Fig. 2). El número de cajas por plancha puede variar desde 1 a 16.

Otras características que afectan más al proceso de preparación de pedido son el número de tintas requeridas por el pedido actual y por el pedido precedente, así como el número de tintas coincidentes. Conforme aumenta el número de tintas no coincidentes entre pedidos consecutivos, el tiempo de preparación del módulo de impresión aumenta también.

### **4. Modelado de la velocidad de tirada**

La velocidad de tirada máxima del conjunto impresora-troqueladora se establece como la menor de las velocidades máximas de cada módulo debido a que ambos módulos funcionan directamente acoplados en serie. En el caso particular de la empresa MICROLAN la velocidad máxima de tirada de la impresora es 10.000 planchas/hora frente a la velocidad máxima de la troqueladora que es de 6.500 planchas/hora. Por lo tanto la velocidad máxima del conjunto viene limitada por la troqueladora. Adicionalmente existe la velocidad límite de manutención de los paquetes de cajas entre troqueladora y paletizadora, Fig. 2. Este último límite se alcanza cuando el número de cajas por plancha es elevado (superior a 12 cajas por plancha). No obstante se ha comprobado empíricamente que este límite de los transportadores resulta activo en muy pocos pedidos, ya que para la gran mayoría la velocidad real de tirada queda bastante por debajo de dichos límites.

La razón por la cual la velocidad real de tirada resulta bastante menor que la velocidad máxima del proceso es que, conforme la velocidad de tirada aumenta por encima de un umbral, la frecuencia de paradas del conjunto impresora-troqueladora aumenta en mayor medida. Estas paradas pueden ser debidas entre otras causas a:

- Atasco en la evacuación de cartón sobrante
- Atasco en la entrada de planchas a la impresora y la troqueladora
- Troquelado defectuoso en el corte de las cajas
- Impresión defectuosa de la plancha
- Vaciado insuficiente de la plancha troquelada

Tal y como se muestra en la Fig. 3, el tipo de cartón o canal está correlado con el valor medio de la velocidad de tirada en la troqueladora. Este gráfico ha sido obtenido con más de 600 datos históricos de pedidos diferentes. El tipo de cartón modifica la dificultad de realizar

correctamente el troquelado ya que conforme el cartón tiene mayor grosor, el volumen de desperdicio aumenta. Por lo tanto resulta más difícil separar dicho desperdicio de la plancha y extraerlo del proceso de fabricación mediante un sistema neumático de aspiración.

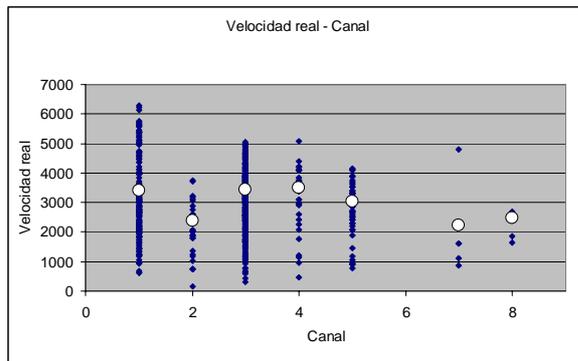


Fig. 3. Velocidades de tirada por canal

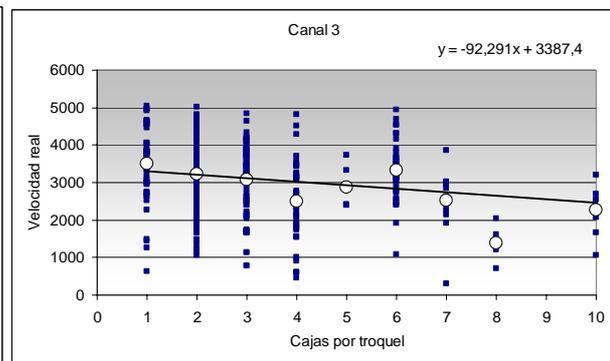


Fig. 4. Velocidad de tirada y nº de cajas en canal 3

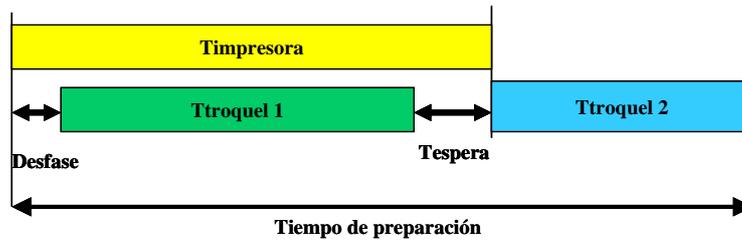
Existe mucha variabilidad en la velocidad de tirada para un mismo canal. No obstante, se ha comprobado que dado un tipo de canal, el número de cajas por planchas influye en la velocidad de tirada haciéndose menor conforme el número de cajas aumenta. Ello es debido a que el desperdicio, conforme hay más cajas por plancha, es más difícil de eliminar debido a que tiene menor tamaño y se distribuye sobre la superficie de la plancha. Por otro lado, al aumentar el número de cajas por plancha el número de hendidos y cuchillas en los troqueles aumenta y por consiguiente aumenta la probabilidad de tener problemas en los troqueles durante la tirada. En la Fig. 4 se muestra la relación entre velocidad y nº de cajas para canal 3.

Del conjunto de análisis históricos de velocidades de tirada correladas con el tipo de canal y el número de cajas por plancha se extraen unos valores estándar de velocidad de tirada cuya estructura se detalla en el apartado 8.1.

## 5. Preparación de pedidos

La preparación de pedidos requiere realizar operaciones tanto en la impresora como en la troqueladora. En la impresora se colocan tintas nuevas y clichés que imprimen la imagen en la caja. En la troqueladora se requiere cambiar el troquel, los útiles de la vaciadora y parametrizar el funcionamiento de la separadora y la paletizadora.

La preparación de los pedidos comienza antes en la impresora que en la troqueladora ya que cuando la impresora termina con un pedido, todavía quedan planchas en el proceso que han de ser troqueladas y paletizadas. En la Fig. 5 el tiempo que transcurre entre el inicio de la preparación en la impresora y en la troqueladora se denomina “Desfase”. El conjunto de tareas necesarias para la preparación de la impresora se ha denominado “Timpresora” y su valor se estima tal y como se indica en el apartado 5.1.



**Fig. 5. Tiempo de preparación con tiempo de espera entre impresora y troqueladora**

El tiempo de preparación en la troqueladora se ha dividido en dos partes, denominando “Ttroquel 1” al tiempo de cambio de útiles y ajuste de parámetros y “Ttroquel 2” al tiempo de reajuste una vez que se dispone de planchas impresas. En la Fig. 5 se establece un tiempo de espera “Tespera” entre las dos partes. Este tiempo de espera se produce cuando la primera parte de preparación de la troqueladora se completa antes de que la preparación de la impresora haya finalizado con lo que la troqueladora no dispondría de planchas de prueba para realizar los reajustes necesarios para iniciar la tirada del pedido. En el caso de que el tiempo de preparación de la impresora resultase ser inferior al de preparación de la troqueladora este tiempo de espera sería nulo.

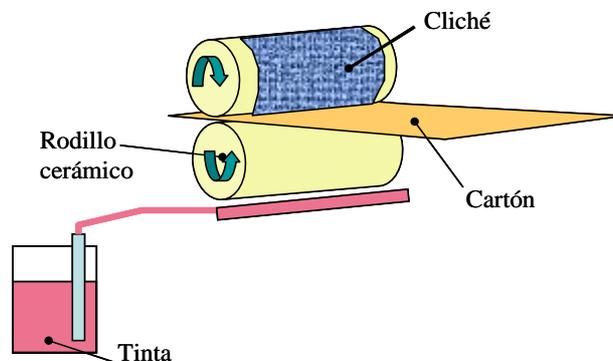
El tiempo de preparación del conjunto impresora-troqueladora se calcula sumando al máximo entre “Timpresora” y la suma de “Tdesfase” y “Ttroquel 1”, el valor de “Ttroquel 2”, tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo de preparación} = \max \{ T_{\text{impresora}}, T_{\text{desfase}} + T_{\text{troquel 1}} \} + T_{\text{troquel 2}}$$

En los dos apartados siguientes se muestra cómo se estiman los valores de preparación de la impresora y ambas partes de la troqueladora.

### 5.1. Modelado del tiempo de preparación de la impresora

El tiempo de preparación de la impresora se modela a partir de tres tipos de datos de entrada: número de tintas del pedido previo (ntp), el número de tintas del pedido actual (nta) y el número de tintas coincidentes (ntc) entre el pedido previo y el actual. La impresora contiene siete grupos de impresión. Cada uno dispone de un sistema de impresión basado en un cliché que deposita sobre la plancha la tinta que toma de un rodillo cerámico poroso, y éste a su vez toma la tinta de una bandeja contenida en un cubo externo, tal y como se muestra en la Fig. 6 .



**Fig. 6. Esquema de un grupo de impresión**

Las operaciones que se realizan en la preparación de la impresora y las precedencias entre ellas se muestran en el gráfico PERT de la Fig. 7. En la Tabla 1 se describen dichas operaciones y se indica la duración de las mismas en función de los datos de entrada. Estas duraciones han sido obtenidas tras un estudio de métodos y tiempos. El análisis de correlación de los tiempos medidos con respecto a los datos de entrada del modelo ha permitido establecer los coeficientes de ponderación de estos datos indicados en la Tabla 1. Así por ejemplo en la Fig. 8 se muestra la correlación del tiempo de la operación IRC (retirada y limpieza de cubos de tinta) con respecto a las tintas retiradas en la preparación (es decir, tintas del pedido previo menos tintas coincidentes).

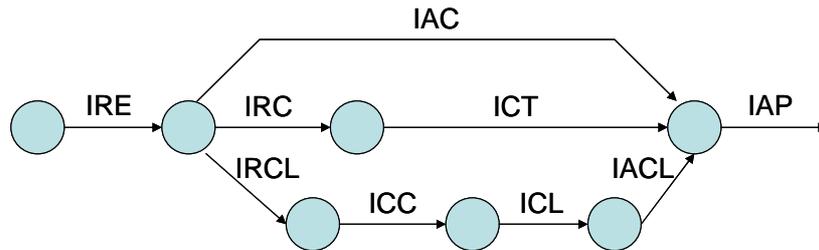


Fig. 7. Diagrama PERT de operaciones de preparación de impresora

Tabla 1. Descripción y duración de las operaciones de preparación de la impresora

Símbolo	Descripción de la operación	Valor/Expresión [minutos]
IRE	Ajustes automatizados en la impresora	0.4
IAC	Alimentación de planchas de cartón	2.9
IRC	Retirada y limpieza de cubos de tinta	1.85 (ntp-ntc)
IRCL	Retirada de clichés previos	2.05 ntp
ICT	Colocación de tintas nuevas	2.26 (nta-ntc)
ICC	Cambio de cerámicos	2.88 nta
ICL	Cambio de clichés actuales	1.65 nta
IACL	Reajuste de clichés	1.2
IAP	Reajustes de la calidad de impresión	16

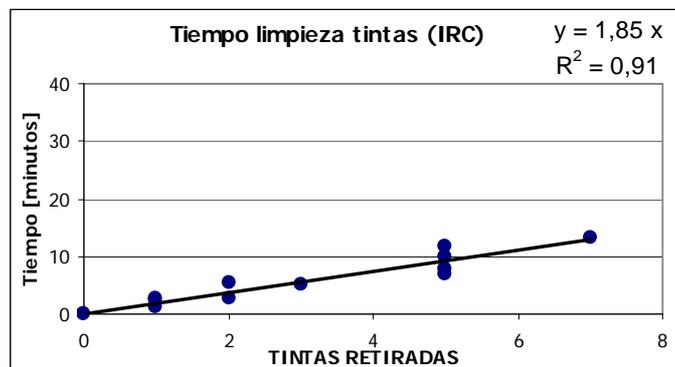


Fig. 8. Estudio de correlación del tiempo IRC en función de las tintas retiradas

## 5.2. Modelado del tiempo de preparación de la troqueladora

El tiempo de preparación de la troqueladora incluye un conjunto de operaciones que se dividen en dos grupos. Un primer grupo engloba las operaciones que pueden ser realizadas sin que la impresora proporcione planchas impresas a la troqueladora. El segundo grupo contiene las operaciones que han de ser realizadas tras la preparación de la impresora para el pedido. Las operaciones de ambos grupos se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Operaciones de la preparación de la troqueladora**

	<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
Primer grupo	TAC	Ajuste de la alimentación del cartón
	TCVA	Cambio de útiles de vaciador
	TCVP	Cambio de pinchos de vaciadora
	TAAH	Ajuste del hueco del apilador
	TAAG	Cambio y ajuste de la guillotadora
	TRE	Ajuste automatizado de parámetros
	TAP	Ajuste de paletizadora
	TCT	Cambio de troquel
Segundo grupo	TRT	Reajuste de troqueladora
	TRV	Reajuste del vaciador
	TRA	Reajuste del apilador

Tras la toma de datos de tiempos de preparación de la troqueladora se realizó al igual que con el tiempo de preparación de la impresora un estudio de correlación con distintas variables explicativas. Dichas variables explicativas fueron el número de cajas por plancha, el perímetro de corte del troquel, el desperdicio porcentual de la plancha respecto de las cajas. La calidad de la regresión alcanzada fue demasiado baja y se optó por asociar una duración global media a cada grupo de operaciones. Resultó que el tiempo medio para el primer grupo fue de 25.8 minutos y el tiempo medio para el segundo grupo fue de 9.4 minutos.

## 6. Sistema de información de producción

Para validar los modelos previamente explicados se ha acudido al sistema de información de producción (SID) implantado en la fábrica. La base de la validación ha sido el registro histórico proporcionado por dicho sistema. Se ha dispuesto de la información histórica correspondiente a los doce meses aproximadamente que llevaba funcionando el conjunto impresora-troqueladora.

La información que se ha utilizado es de dos tipos. Por una parte, la descripción de los artículos (estática) y, por otra, la relativa al registro temporal de la fabricación de los mismos (dinámica).

- Para cada artículo: código, número de colores, identificación y descripción de las tintas, identificador del troquel, número de cajas por plancha, cajas por paquete y cajas por palet.
- Para cada orden de fabricación (OF): código de artículo, número de planchas planificadas, número de cajas fabricadas y rechazadas, planchas buenas, tiempos de preparación, de parada, de limpieza, de mantenimiento, sin trabajo, número de paradas en la máquina, equipo de trabajo.

Tras el proceso de análisis preliminar de los datos se realizó una depuración de los mismos para corregir algunas imperfecciones de los datos originales. Aunque el objetivo del artículo es el modelado de la velocidad de tirada y tiempos de preparación, la información histórica permite realizar algunos otros análisis complementarios.

- Reparto del tiempo de fabricación entre las diferentes actividades: preparación, tirada, paro, limpieza, etc. Se han calculado los valores medios y el porcentaje dedicado a cada una de las actividades anteriores a lo largo del tiempo.
- Análisis de la variabilidad de la productividad entre los diferentes turnos en que ha trabajado la máquina (mañana, tarde, noche).
- Análisis de la variabilidad de la productividad entre equipos de trabajo.

## 7. Validación del modelado del comportamiento

### 7.1. Análisis del error del modelo de velocidad de tirada

En el apartado 4 se han establecido los modelos de variación de la velocidad de tirada en función de dos parámetros importantes: el tipo de canal del cartón y el número de cajas por plancha. El modelo se obtuvo mediante rectas de regresión en función de los dos parámetros mencionados.

En la Fig. 9 se muestra el histograma de los errores de las observaciones históricas tomadas del sistema de información con respecto a la del modelo. Se puede observar la distribución asimétrica a la izquierda de los errores así como la baja frecuencia de errores grandes. Los errores más elevados se dan en pedidos tirados con velocidad real más baja que la estimada alcanzándose errores de  $-2000$  planchas/hora con una frecuencia mayor que errores de  $+2000$  planchas/hora. Los errores de velocidad se distribuyen de forma que existe mayor probabilidad de alcanzar errores muy negativos que muy positivos como se aprecia en la Fig. 9. Esto es debido a que el modelo expresado en la tabla ajusta velocidades medias de tirada y las velocidades anormalmente bajas debido a las características del pedido alcanzan con cierta frecuencia valores intermedios entre 1000 y 2000 planchas por hora. Sin embargo, los pedidos de velocidad de tirada elevada superan dicho valor medio en menor medida.

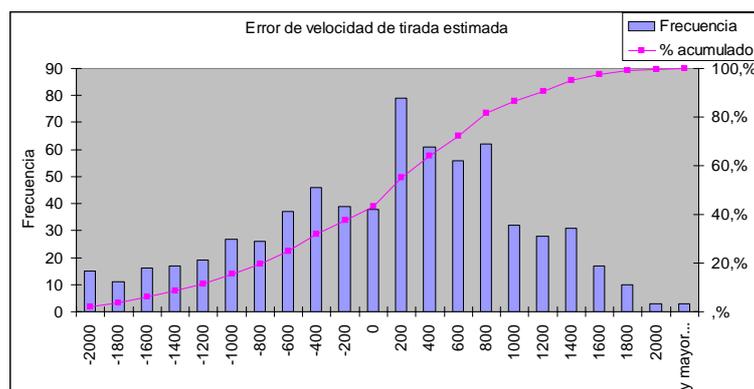


Fig. 9. Error entre velocidad de tirada real y del modelo

### 7.2. Validación del modelo de tiempo de cambio

Una vez determinada experimentalmente la parametrización del tiempo de preparación en función del número de colores de dicha OF y de la anterior y colores coincidentes, se pueden

comparar los resultados que se habrían obtenido con dicho cálculo analítico frente a los realmente registrados en el sistema de información. En la Fig. 10 se muestran los valores del modelo analítico (en trazo grueso), los valores reales medidos en la OF (en trazo fino) y su recta de regresión (en trazo intermedio). Para facilitar la presentación gráfica, las OF se han ordenado por valor creciente del tiempo estimado de preparación y dentro de un mismo tiempo por valor creciente del tiempo registrado histórico. En los datos históricos se han eliminado los valores extremos por encima de 120 minutos o por debajo de 20 que se consideran imposibles de realizar en pedidos normales. Nótese que el objetivo último de este modelo es servir de patrón para la estimación de tiempos estándar de realización de la actividad y, por consiguiente, debe recoger únicamente circunstancias normales de operación. Por ello es lógico que aparezca cierta dispersión respecto del valor estándar estimado cuando las circunstancias del pedido son favorables por algún motivo o aparece algún problema, compensándose unos casos y otros. Globalmente, se observa que la recta de regresión y el modelo se aproximan bastante.

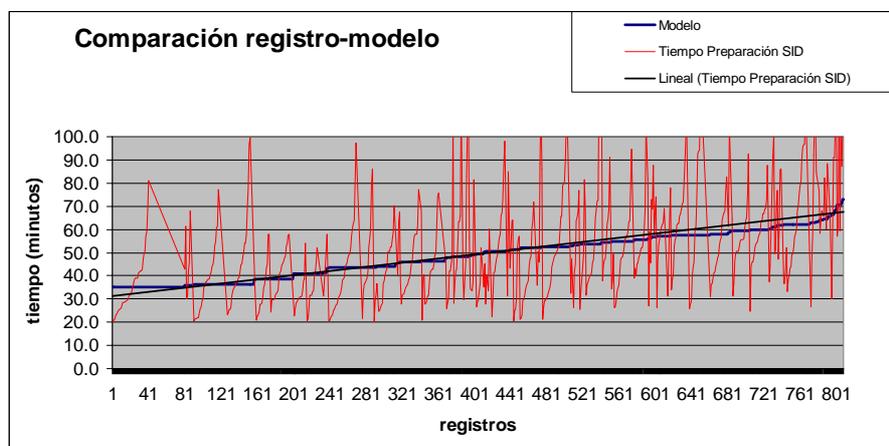


Fig. 10. Tiempo de preparación real y del modelo

## 8. Implantación en la planificación real de pedidos

Tanto el modelo de velocidad de tirada como el modelo de tiempo de preparación de un pedido (o cambio entre pedidos) se han implantado mediante una tabla. Esta forma de implantar el modelo es fácil de incorporar a los sistemas informáticos de la empresa y sencilla de utilizar, tanto por el personal de planificación de la empresa como por los propios operarios de las máquinas.

### 8.1 Velocidad de tirada

Tabla 3. Velocidad de tirada de la impresora

Cajas	Canal 1 Micro	Canal 2 B/C	Canal 3 B	Canal 4, 7 y 8 E/B, N, E/N	Canal 5 C
1			4707		
...					
16			2736		

La tabla muestra la velocidad de tirada óptima en planchas/hora para cada tipo de cartón (canal) y según el número de cajas por plancha. Lógicamente esta velocidad disminuye, para cada tipo de cartón, a medida que aumenta el número de cajas por plancha. En la tabla se

muestra un ejemplo, aunque se omite el resto por cuestiones de confidencialidad. En el registro histórico no aparecen todos los casos contemplados en la tabla. Así, por ejemplo, en el periodo analizado no se fabricó ningún artículo con canal 3 y más de 10 cajas por plancha. En esos casos se ha extrapolado a partir de la información disponible.

## 8.2. Tiempo de preparación del pedido

De modo similar al anterior la implantación del tiempo de cambio entre un pedido y el siguiente se ha realizado también utilizando una tabla como la que se muestra a continuación.

**Tabla 4. Tiempo de preparación de pedido**

Nº tintas previo	Nº tintas actual							Nº tintas coincidentes	Reducción
	1	2	3	4	5	6	7		
1	...	...	...	...	...	...	...	1	...
2	...	...	32.5	...	...	...	44.4	2	-5.4
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
7	...	...	...	...	...	...	...	7	...

La tabla indica los tiempos de cambio en minutos a los que se puede aspirar cuando no coinciden colores entre el pedido actual y el anterior. En la parte derecha de la tabla se indica la reducción de tiempos cuando coinciden de 1 a 7 tintas. Evidentemente, el máximo número posible de tintas coincidentes es el mínimo entre el número de tintas del pedido previo y del actual. Al igual que antes, se muestra sólo un ejemplo por razones de confidencialidad.

## 9. Conclusiones

Este artículo presenta, en procesos de impresión/troquelado de cajas de cartón, el modelado de la velocidad de tirada y de los tiempos de preparación de cada pedido. La velocidad de tirada de un pedido depende fundamentalmente del tipo de cartón utilizado y del número de cajas por plancha. Los factores que condicionan el tiempo de preparación de un pedido son los colores del mismo, los del pedido precedente y el número de colores coincidentes entre ambos. Ambos modelos se han validado utilizando registros históricos de la fábrica y se han incorporado a los sistemas informáticos y al uso cotidiano de planificadores y operarios mediante sencillas tablas.

## Agradecimientos

Quisiéramos agradecer el apoyo de la empresa MICROLAN S.A. y en especial a su presidente D. Alfonso Lantero Machieraldo y sus Directores de fabricación D. José Antonio de Miguel y D. Francisco J. Sahagún Casanova, así como la labor realizada por el alumno colaborador D. Jaume Puigarnau y el trato recibido por el personal de fábrica sin cuya ayuda este estudio no hubiera podido realizarse.

## Referencias

- [1] Niebel, B.W. (1996). *Ingeniería Industrial. Métodos, tiempos y movimientos*. Alfaomega, 9ª edición.
- [2] Krajewski, L.J. (2000). *Administración de operaciones. Estrategia y análisis*. Prentice Hall, 5ª edición.