

## ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA EN MÁQUINAS TREFILADORAS MEDIANTE SIMULACIÓN MONTECARLO

### ESTIMATION OF THE EFFICIENCY IN DRAWING MACHINES USING MONTECARLO SIMULATION

Dagoberto Obreque Sanhueza<sup>1</sup>, Eduardo Salazar Hornig<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Concepción, Concepción, Chile

#### RESUMEN

En el presente trabajo se muestra un modelo para estimar la eficiencia en máquinas trefiladoras en la industria del alambre. Considerando las situaciones que ocasionan que un operario permanezca ocupado y las que hacen que una máquina esté detenida, se desarrolló un modelo de *Simulación Montecarlo* para predecir la eficiencia de las máquinas y el grado de ocupación que tendrán los operarios en función de la carga de trabajo asignada. En el trabajo se consideraron 4 centros laborales con un total de 16 máquinas, simulando programas diarios de producción. Se obtienen estimaciones promedio para las diferencias absolutas entre la *eficiencia real* vs. la *eficiencia simulada*. Las diferencias promedio observadas por centro de trabajo fluctuaron entre 3% y 4%. El modelo también permite estimar la ocupación de los operarios, en función de la carga laboral asignada a los centros de trabajo, estimar si los operarios tendrán la suficiente disponibilidad para atender las máquinas trefiladoras en un centro de trabajo en forma simultánea.

**Palabras Claves:** Simulación Montecarlo, eficiencia de máquinas, sistema de arrastre, trefilación.

#### ABSTRACT

The present research shows the *efficiency* and *workforce* estimation at drawing machines in a steel wire drawing industry. Taking into account all predictable actions that causes that an operator remains busy and those that makes a drawing machine stop, a *Monte Carlo Simulation model* was developed to predict the efficiency of the drawing machines and the workforce utilization. Four workstations with a total of 16 machines were considered, simulating daily productions programs. The results shows that workstations average absolute difference between *real efficiency* against the *simulated efficiency* fluctuate between 3% and 4%. The model also estimates if the operators of a workstation had enough readiness to assist the jobs of all of the workstation machines simultaneously.

**Keywords:** Montecarlo Simulation, machine efficiency, pull system, drawing machines.

---

Autor para correspondencia: [esalazar@udec.cl](mailto:esalazar@udec.cl)

Recibido: 06.01.2009 Aceptado: 15.05.2009

## INTRODUCCIÓN

En un sistema de producción se plantean, junto al problema de programación de trabajos en máquinas, problemas de asignación de recursos. Los recursos de un sistema productivo siempre son escasos, y por esto es importante optimizar su utilización. La asignación de operarios a centros de trabajo obedece a un programa de producción, sin embargo, muchas veces se desconoce si los operarios serán capaces de cumplir con la carga de trabajo asignada, en particular si ésta no es constante en el tiempo. Esto da origen al problema de programación de la fuerza de trabajo (*workforce scheduling*) en cada período del horizonte de programación.

Bajo el enfoque de sistema de arrastre (*pull system*) propio de un enfoque JIT, donde se fabrica sólo la demanda confirmada en el momento oportuno, minimizando los inventarios, la carga de trabajo puede variar significativamente de un período a otro, por lo que la asignación de operarios a los diferentes centros de trabajo también debería ser así. La programación de producción y de operarios requiere de la estimación de parámetros para generar programas realistas, que permita apoyar la toma de decisiones en cuanto a la fuerza de trabajo necesaria para dar cumplimiento a la demanda en las fechas comprometidas. Diversas investigaciones se han realizado para resolver el problema de planificación de la asignación de fuerza laboral, abarcando estudios en plantas industriales como de servicios. Stockton *et al.* (2005) diseñan una línea de producción con asignación flexible de tareas a una dotación fija de operarios.

Utilizando programación lineal, Houghton & Portugal (2005) plantean un modelo de minimización del costo laboral total en una empresa de la industria alimenticia, tomando en cuenta *costo regular*, *costo por sobretiempo* y *costo por inventario*, bajo el supuesto de que los operarios pueden desempeñarse en cualquier centro de trabajo. Esto último requiere del desarrollo de la capacidad de flexibilidad de la fuerza de trabajo. Djassemi (2005) muestra la importancia de aplicar estrategias de entrenamiento multifuncional (*cross training*) para obtener operarios multifuncionales en un sistema de manufactura.

Norman *et al.* (2002) resolvieron el problema de asignación de operarios en manufactura celular para maximizar el beneficio global del sistema en función de la productividad, calidad y costos de entrenamiento de operarios a una tarea específica. También, con este objetivo, Kolarik *et al.* (2004) desarrollaron un sistema de monitoreo *on-line* del rendimiento de trabajadores. A diferencia de los modelos tradicionales, este estudio se enfocó a las variables que cambian constantemente las condiciones de rendimiento del trabajador en el tiempo.

Musliu *et al.* (2001) desarrollaron un algoritmo para obtener un plan de rotación de operarios, pudiendo aplicarse tanto a entornos industriales como de servicios.

Mosier & Mahmoodi (2002) desarrollan un modelo de simulación para analizar una heurística de programación de máquinas, donde la fuerza de trabajo se limita a tareas de *setup* y fallas de máquinas. El estudio se enfocó a evaluar el rendimiento de las máquinas, la entrega a tiempo, el tiempo de flujo de los trabajos y el número de trabajos en cola esperando la llegada de un operario para iniciar su proceso. A diferencia del trabajo de Mosier y Mahmoodi, Baines & Kay (2002), modelaron, además, a través de un modelo de simulación de eventos discretos, relaciones interpersonales en el ambiente de trabajo que inflúan en la productividad.

## Sistema de Producción

### Asignación de Operarios y Eficiencia de Máquinas

El rendimiento de un operario en un centro de trabajo (CT) está condicionado por las actividades que debe realizar para cumplir con una carga de trabajo en un horizonte de tiempo. Estas actividades definen el *tiempo de ocupación del operario* ( $t_{oh}$ ). Si las actividades que necesita ejecutar el operario sobrepasan el horizonte de programación, se debería asignar un operario adicional que colabore en paralelo. El problema descrito se hace más complejo cuando la carga de trabajo no es constante. Existen diferentes CT, que además cuentan con máquinas de diferente tecnología y características. Esto hace que las actividades a realizar no sean las mismas, ni tengan la misma duración, en todos los casos.

Además, estimar cuánto tiempo estará detenida una máquina en el horizonte de programación, permite predecir la eficiencia de ésta en función de la carga de trabajo asignada. A esta eficiencia se le llamará *eficiencia proyectada* ( $Ef_p$ ). El problema a resolver consiste en estimar  $t_{oh}$  y la *eficiencia proyectada* en los diferentes CT, y si los operarios asignados serán suficientes para cumplir con la carga de trabajo de cada CT.

### Operación del Sistema de Producción

El sistema productivo tipo *jobshop* está formado por 4 centros de trabajo compuestos, respectivamente, por 3, 3, 5 y 5 máquinas paralelas no relacionadas, a las cuales se les asignan órdenes de producción (OP) en un horizonte de programación, bajo un enfoque *pull* de producción (ver Tabla 1 para identificación de las máquinas en cada CT). La carga de trabajo asignada a las máquinas en los diferentes CT varía en el tiempo. Además, para cada OP existe una fecha de entrega comprometida.

**Tabla 1.** Sistema de Producción

CT	Máquinas	Operarios / Turno
A	A1 – A2 – A3	1
B	B1 – B2 – B3	1
C	C1 – C2 – C3 – C4 – C5	2
D	D1 – D2 – D3 – D4 – D5	1

La Tabla 1, especifica el número estándar de operarios por turno en cada CT. Los operarios de un CT atienden en paralelo las máquinas del CT; en oportunidades, para un operario, coinciden diferentes eventos que no puede atender a la vez.

Se conocen los tiempos de proceso de cada OP en cada máquina, además de los tiempos de preparación de máquinas (*setup*). Otras consideraciones importantes en el planteamiento del problema son:

- Existe un número conocido y limitado de eventos que producen interrupciones en el funcionamiento de las máquinas, y que originan actividades para el operario.
- Existe un número mínimo y máximo de operadores posible de asignar a los CT. Los operarios son polivalentes, por lo que se pueden desempeñar en cualquier CT.
- El problema es estudiado de forma aislada del resto del sistema productivo, lo que implica que no se tomarán en consideración eventos fuera de los CT.

## Programa de Producción

La asignación de OP a los CT se realiza dos veces por semana, según los requerimientos de la demanda, mientras que el *programa de producción* se actualiza diariamente, dando las prioridades de fabricación según fecha de entrega. La carga de trabajo de las máquinas no es pareja, ya que en algunas ocasiones la demanda puede solicitar mayor cantidad de productos de diámetros finos, medios o gruesos, los que se realizan en diferentes CT.

El *programa de producción* detalla la lista de órdenes de producción asignadas a cada máquina, priorizadas por fecha de entrega, especificando los siguientes datos:

- **V** : velocidad de la máquina trefiladora (m/min).
- **E** : eficiencia de la máquina trefiladora.
- **Máquina** : identificación de la máquina trefiladora.
- **Entrega** : fecha de entrega pactada con el cliente.
- **D** : diámetro final del producto trefilado (mm).
- **P** : prioridad de producción de los productos (fecha de entrega).
- **Resistencia** : resistencia mínima del alambre (N/mm<sup>2</sup>).
- **OP** : orden de producción asociada al producto requerido.
- **kg** : kilogramos totales de alambre especificados en la OP.
- **Saldo** : kilogramos de alambre pendientes por fabricar.
- **T** : turnos necesarios para fabricar el saldo de la OP.
- **MP** : identificación de la materia prima para fabricar el producto final.

Algunas máquinas son de velocidad variable y otras de velocidad fija, la velocidad es asignada en el programa de producción según el producto que se debe fabricar. La eficiencia de las máquinas trefiladoras se considera como la eficiencia promedio registrada por el sistema de gestión de producción.

El saldo se utiliza para calcular la cantidad de turnos que restan para terminar la OP (Ec. 1).

$$T = \frac{\text{Saldo(kg)}}{2.77425 \times D(\text{mm})^2 \times V(\text{m/min}) \times E(\%)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Una buena estimación de la eficiencia de las máquinas permite verificar si las OP asignadas a cada máquina se podrán fabricar a tiempo. La identificación de la materia prima permite deducir el diámetro, composición química del acero y recubrimiento que posee.

El *programa de producción* es una herramienta de gestión que otorga una detallada descripción de lo que cada máquina y operador a cargo debe realizar.

## Modelo de Simulación Montecarlo

### Eventos de utilización de operario y Detención de Máquina

En la Tabla 2, se describen los eventos que tienen lugar durante el proceso de fabricación de alambres que dan lugar a interrupciones en el proceso. Las actividades triviales se refieren a limpieza, comunicación, documentación, etc.

**Tabla 2.** Eventos que originan Detención del Proceso de Producción

<b>Eventos</b>
Reacondicionamiento de máquina por fabricación fuera de norma (FN)
Control de calidad del alambre
Setup de máquina
Máquina sin materia prima
Cortes de Alambre
Cambio de baño lubricante (en trefilación húmeda)
Cambio de carrete de alambre
Actividades triviales

Todos los eventos descritos implican un determinado tiempo, ya sea de ocupación de operario o de máquina detenida. Estos eventos dan origen a las variables del modelo de simulación, que se clasifican como *variables determinísticas* (sus valores son o pueden ser considerados como constantes) o *variables estocásticas* (sus valores son aleatorios). (Tabla 3)

**Tabla 3.** Variables Determinísticas y Estocásticas

<b>Determinísticas</b>	<b>Estocásticas</b>
Tiempo por cambio de proceso (setup)	Tiempo por corte de alambre
Tiempo por actividades triviales	Tiempo de máquina sin materia prima
Tiempo de fabricación de un producto	Tiempo en control de calidad
Tiempo por lubricación de alambre en máquina	Tiempo por producto fuera de norma
Tiempo por cambio de carrete	Tiempo por cambio de baño lubricante en máquinas en CT D

Para el modelo de simulación se consideran los siguientes supuestos:

- Las OP se procesan en el mismo orden que aparece en el programa de producción.
- El horizonte de programación corresponde a 3 turnos de 7.5 horas c/u (22.5 horas/día).
- Se dispone de matrices que cumplen con los requerimientos de tolerancia.
- En trefilación húmeda, la probabilidad de corte en cualquier medio lubricante es la misma.
- Las máquinas trabajan a la velocidad que está indicada en el programa de producción.
- Se dispone de materia prima para re-fabricar un producto fuera de norma FN.
- La materia prima siempre cumple con las características físicas, químicas y mecánicas.
- Todos los operarios poseen el mismo rendimiento y preparación.
- Las máquinas no presentan detención por fallas.
- El sistema de gestión de producción provee de la información sin errores.

## Análisis de Tiempos de Detención de máquina y Ocupación de operario

Si  $t_{HP}$  representa el horizonte de programación, éste se puede descomponer para cada máquina como la suma de tiempos de proceso y de los tiempos definidos por la ocurrencia de los eventos que originan detenciones de máquina (Tabla 2):

$$t_{HP} = \sum_{i=1}^n OP_i + \sum_{i=1}^n FN_i + \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n ST_i + \sum_{i=1}^n SA_i + \sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n B_i \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

- $t_{HP}$  : horizonte de programación.
- $OP_i$  : tiempo de proceso en turno  $i$  (total de tiempo productivo).
- $FN_i$  : tiempo de detención para corregir un producto fuera de norma en turno  $i$ .
- $Q_i$  : tiempo de detención por espera de resultado del control de calidad en turno  $i$ .
- $ST_i$  : tiempo por cambio de proceso o *setup* en turno  $i$ .
- $SA_i$  : tiempo de detención por falta de materia prima en turno  $i$ .
- $C_i$  : tiempo de detención por cortes de alambre en turno  $i$ .
- $B_i$  : tiempo de detención por cambio de baño lubricante en turno  $i$ .

La ecuación 2 contempla todos los eventos que ocasionan que una máquina se detenga durante el horizonte de programación. El modelo considera como incógnita el total de tiempo productivo, que despejado de la ecuación (2) resulta:

$$\sum_{i=1}^n OT_i = t_{HP} - \left( \sum_{i=1}^n FN_i + \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n ST_i + \sum_{i=1}^n SA_i + \sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n B_i \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

Luego, para cada máquina la *eficiencia proyectada* se estima en función de los tiempos productivos en el horizonte de programación:

$$Ef_p = \frac{\sum_{i=1}^n OT_i}{t_{HP}} \times FT \quad (4)$$

donde FT corresponde al factor de traslape, que representa una corrección a la *eficiencia proyectada*. El problema plantea que las máquinas trabajan en paralelo. Esto quiere decir que se puede presentar el caso de dos máquinas detenidas simultáneamente por alguna de las causas descritas. El modelo supone sumas lineales de los eventos de detención y no contempla estos casos especiales en donde, lógicamente, el tiempo estimado por el modelo no será el real. El *factor de traslape* contempla una corrección para cuando dos o más máquinas se detienen simultáneamente. Este se estima según la ecuación 5, considerando la información histórica que registra el sistema de gestión de producción.

$$FT = \frac{Ef_{REAL}}{Ef_p} \quad (\text{Ec. 5})$$

El factor de traslape se actualiza a través del tiempo, a medida que se obtiene nueva información.

## Análisis de Tiempos de Ocupación Hombre

Definida la información necesaria es posible determinar  $t_{OH}$  y el número de máquinas que un operador puede atender simultáneamente (NMH).

Durante el horizonte de programación, el operador realiza diferentes actividades para poder cumplir con el programa de producción asignado. El tiempo invertido en estas actividades se descompone en:

$$t_{OH} = \sum_{i=1}^n FN_i + \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^n ST_i + \sum_{i=1}^n C_i + \sum_{i=1}^n B_i + \sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=1}^n M_i + \sum_{i=1}^n TA_i \quad (\text{Ec. 6})$$

donde (adicional a lo definición para  $t_{HP}$ ):

- $t_{OH}$  : tiempo total de actividad del operario derivadas del programa de producción.
- $W_i$  : tiempo total por cambio de carrete en turno  $i$ .
- $M_i$  : tiempo total por lubricación de producto en máquina en turno  $i$ .
- $TA_i$  : tiempo total por actividades triviales en turno  $i$ .

La ecuación (6) entrega el tiempo total que el operario utiliza para las actividades derivadas del programa de producción, que representa el valor del tiempo de ocupación de operario. Luego se determina el número de máquinas que el operario puede atender adecuadamente en forma simultánea:

$$NMH = \frac{t_{HP}}{t_{OH}} \quad (\text{Ec. 7})$$

La estimación de NMH permite saber si el operario tendrá la suficiente capacidad para atender máquinas de diferente comportamiento (diferentes OP, setup, probabilidad de corte de alambre, etc.).

Si NMH es menor al número de máquinas que el operario tiene asignadas en un CT, éste no tendrá la suficiente capacidad para cumplir con las OP del programa.

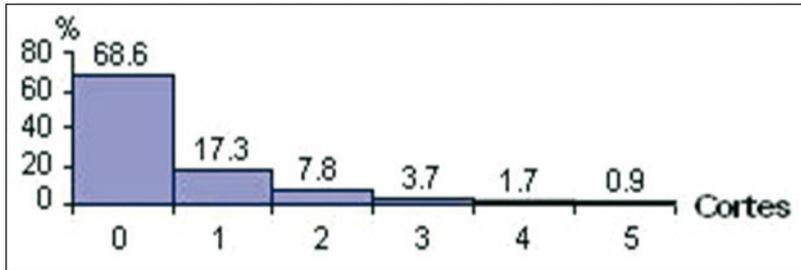
Para estimar  $Q$  y  $ST$  iniciales, se utiliza la *eficiencia proyectada* ingresada como input, la que permite estimar el número de OP, y por ende el valor de  $Q$  en el horizonte de programación. La segunda iteración trabajará con la eficiencia proyectada calculada en la primera iteración, y así sucesivamente.

## Parámetros del Modelo

La toma de datos se realizó observando en cada una de las máquinas por 6 meses (442 turnos de 7.5 horas) los eventos que sucedieron, y el tiempo de las actividades que estos eventos originaron.

La Tabla 3 lista las variables deterministas (de valor constante) y estocásticas del modelo. Las variables estocásticas fueron modeladas mediante distribuciones de probabilidades (Law & Kelton, 2000).

**Tiempo por Cortes de Alambre:** para cada máquina se determina a través de la variable discreta *número de cortes por turno*, cuyos valores son el número de cortes de hebra por turno. Por ejemplo, la Figura 1 muestra la distribución de probabilidades para el número de cortes por turno para la máquina B2.



**Figura 1.** Función de Probabilidad para número de cortes por turno máquina B2

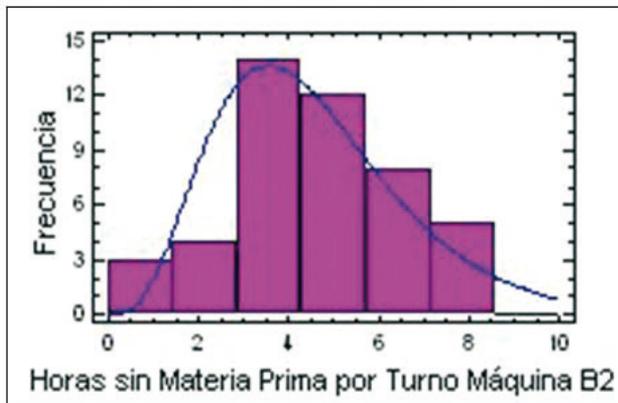
Los cortes en trefilación seca tardan 20 minutos en repararse, mientras que los cortes en trefilación húmeda el 60% tarda 15 minutos y el 40% tarda 30 minutos.

**Tiempo de Máquina sin materia prima:** variable continua; sus valores representan tiempos de máquina detenida por falta de materia prima por turno. Por ejemplo, la Tabla 4 muestra la distribución para la máquina B2, en la que la probabilidad de que la máquina disponga de materia prima durante todo el turno es de 70.8%, y en caso de existir falta de materia prima, el tiempo por materia prima faltante se distribuye Gamma(4.591, 1.008).

**Tabla 4.** Distribución de Probabilidades máquina B2 sin materia prima

	Máquina con MP	Máquina sin MP			
Máquina	Probabilidad	Distribución	Parámetros	Variación	Nivel de Confianza
B2	61.0 %	Gamma	Forma : 4.591 Escala: 1.008	0 a 7.5 horas	90 %

En la Figura 2 se muestra el ajuste logrado para el tiempo por faltante de materia prima.



**Figura 2.** Distribución de tiempo sin materia prima por turno en máquina B2

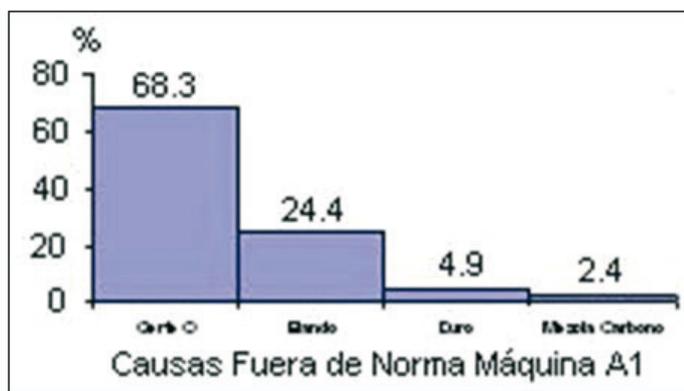
**Tiempo en Control de Calidad:** variable continua; sus valores representan el tiempo que tarda el control de calidad para una muestra de la producción en curso. La ubicación del CT incide en este tiempo, dado que el operario debe desplazarse un tiempo significativo, por lo que este

tiempo es ajustado para cada CT. Por ejemplo, la Tabla 5 muestra la distribución ajustada para el tiempo en control de calidad para el CT A.

**Tabla 5** Distribución de tiempo en control de calidad CT- A

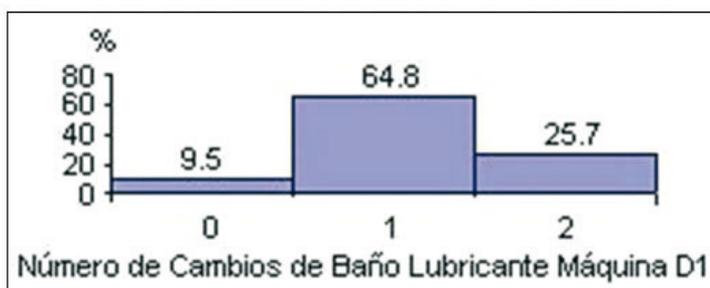
CT	Distribución	Parámetros	Mínimo	Máximo
A	Gamma	Forma : 5.48	3 min	25 min
		Escala: 0.86		

**Tiempo por Producto fuera de Norma:** para cada máquina se determina a través de una variable discreta Bernoulli con parámetro de éxito, la probabilidad de que un producto se fabrique fuera de norma. Si el producto se fabrica fuera de norma, se determina a través de una distribución discreta (propia para cada máquina), la causa del fuera de norma. Por ejemplo, para la máquina A1, la probabilidad de que se fabrique fuera de norma se estimó en 0.0793. En la Figura 3 se muestra la distribución de probabilidades de causas de fuera de norma para la máquina A1.



**Figura 3.** Función de Probabilidad de causas de fuera de norma máquina A1

**Tiempo por Cambio de baño lubricante en Máquinas del CT- D:** dependiendo del tipo de baño lubricante. De los dos tipos de baño considerados, uno no requiere de cambios, por lo que en este caso el tiempo por cambio de baño lubricante es 0, pero debe reducir la velocidad de trefilado. Para el segundo tipo de baño, este tiempo se modela a través de la variable discreta *número de cambios de tina por turno*, siendo el tiempo por cada cambio igual a 30 minutos.



**Figura 4.** Función de Probabilidad del número de cambios en la máquina D1

La Figura 4 muestra la distribución del número de cambios de baño lubricante para la máquina D1, siendo lo observado 0, 1 o 2 cambios, con mayor frecuencia 1 cambio de baño lubricante por turno. Este patrón se repite en prácticamente todas las máquinas del CT D, pero con diferentes probabilidades, salvo en una máquina que presentó además 3 cambios con probabilidad 4.3%.

Para ajustar las distribuciones de probabilidades de las variables continuas en base a los datos observados, se utilizó el software *Statgraphics Plus 5.1*, realizando los test estadísticos de *Kolmogorov-Smirnov* y *Chi-cuadrado*, ajustando una distribución de probabilidad teórica, en la que ambos test no rechazan la hipótesis nula.

Para la variable determinista *cambio de proceso (setup)* se construyeron *matrices de setup*, para todas las combinaciones de productos posibles de fabricar en cada máquina; para la variable determinista *trivialidades*, los tiempos se estimaron para actividades triviales que los operarios realizan diariamente.

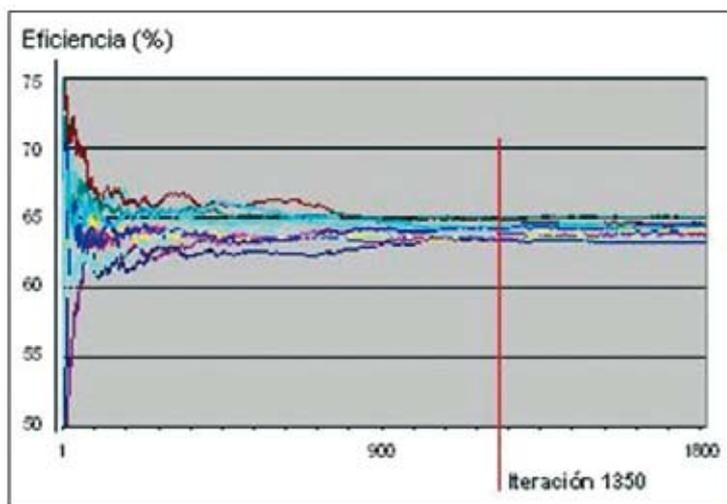
### Construcción del Modelo de Simulación

En base a la generación de observaciones de las variables aleatorias, se determina la eficiencia proyectada de acuerdo a las ecuaciones 3 y 4, para generar observaciones de eficiencia proyectada  $y_k$ ,  $k = 1, \dots, m$ . A partir de estas observaciones se construye para cada máquina el gráfico de estabilización de los promedios parciales  $Y_k$ :

$$Y_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \quad k = 1, \dots, m$$

El valor de  $m$  se determina gráficamente observando el comportamiento de estabilización para una muestra piloto de tamaño 10. La Figura 5 muestra este análisis para la máquina B3 y A3, observando que respectivamente para  $m=1300$  y  $m=1350$  la serie de promedios parciales  $Y_k$  se estabiliza.

Se determinó el número de iteraciones por réplica como el máximo número de iteraciones observados en la estabilización de todas las máquinas analizadas (se consideró una máquina de cada CT). El mayor número de iteraciones observado para la estabilización fue de 1350.



**Figura 5.** Gráfico de estabilización de la eficiencia máquina B3

De acuerdo a Ross (1997), se determinó el número de réplicas de manera que la probabilidad de que la estimación de la *eficiencia proyectada* difiera en más de 0.5% (tolerancia  $e=0.5$ ) del verdadero valor de la eficiencia de cada máquina, sea menor o igual a 0.05 ( $\alpha=0.05$ , nivel de confianza del  $100(1-\alpha)\%$ ). Esto es, se determinó el menor valor de N tal que:

$$N \geq \left( \frac{t_{n_0-1, 1-\alpha/2} \cdot s(n_0)}{e} \right)^2$$

Donde  $n_0$  es el tamaño de la muestra piloto para estimar la desviación del estimador a través de la desviación muestral de la muestra piloto  $s(n_0)$ . Para una muestra piloto con  $n_0=10$ , se obtuvo  $N=11$  réplicas.

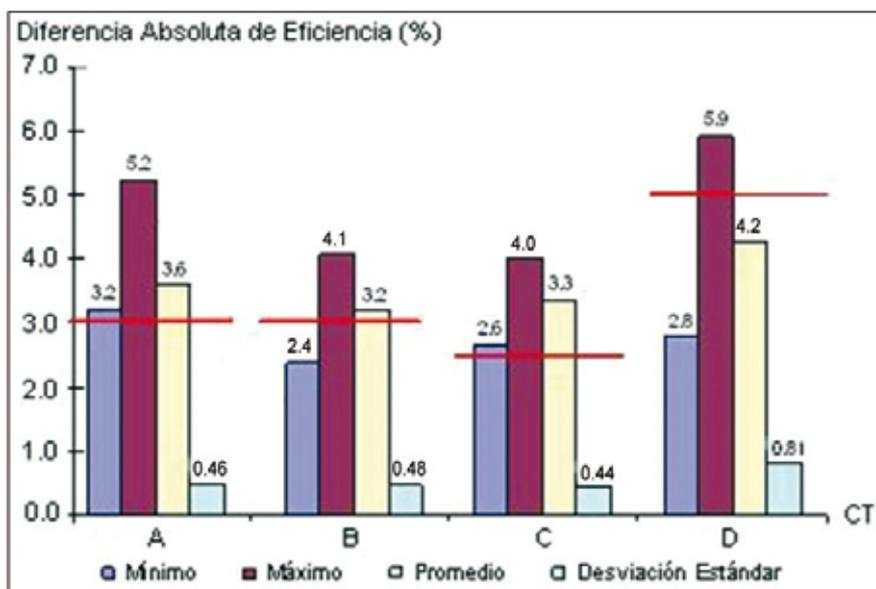
Se simularon 25 programas diarios de 3 turnos/día, realizando para cada máquina 11 réplicas de 1350 iteraciones, para luego comparar el resultado obtenido con la *eficiencia real* entregada por el sistema de gestión de producción, a través de las diferencias absolutas entre las eficiencias proyectadas y reales:

$$D_{\text{absoluta}} = |Ef_p - Ef_{\text{REAL}}|$$

La simulación fue aplicada a todas las máquinas trefiladoras, analizándose los resultados por CT.

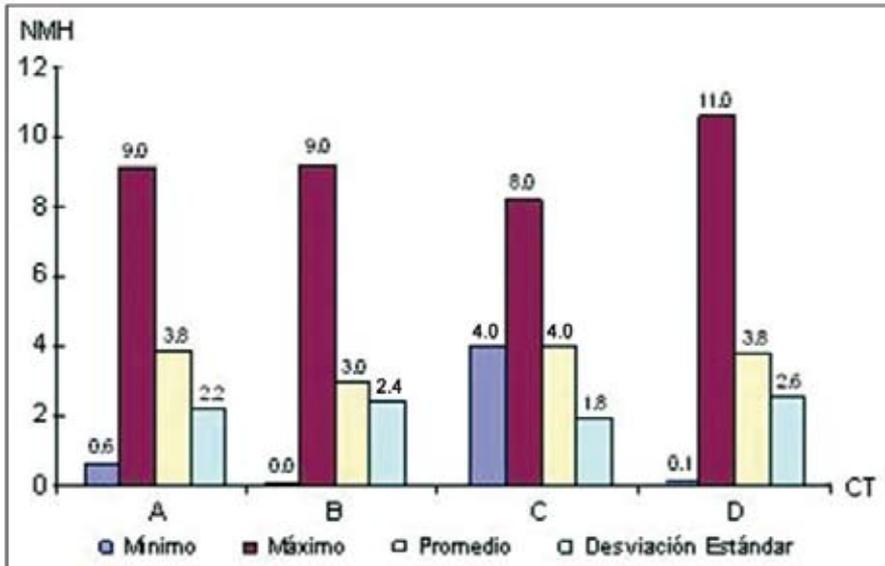
## RESULTADOS

En la Figura 6 se observan los errores absolutos de eficiencia por centro de trabajo. En el CT B se observó el menor de los mínimos errores absolutos, mientras que en el CT D se observó el mayor de los máximos errores absoluto. En promedio, el error de la desviación absoluta no sobrepasa el 4% en todos los CT, con una baja y similar variabilidad (del orden de 2%) en la estimación de la eficiencia en todos los CT.



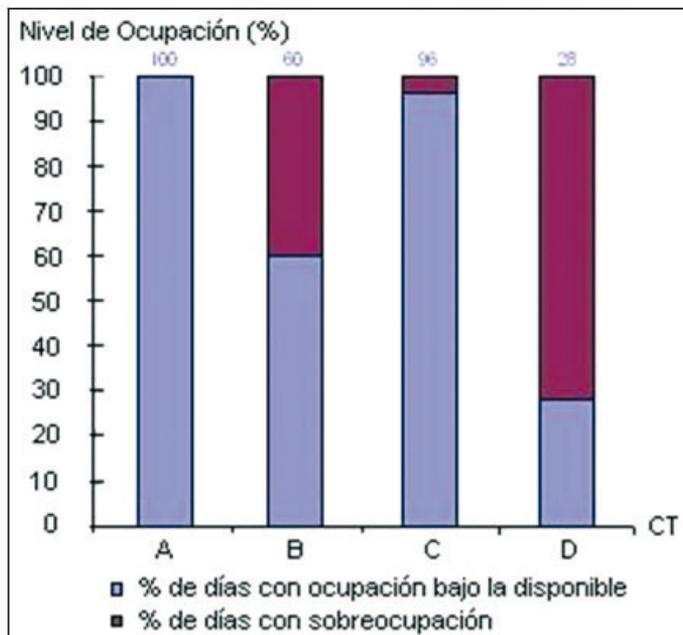
**Figura 6.** Diferencias absolutas de eficiencia por CT

En la Figura 7 se observa el valor para NMH por CT, donde la línea horizontal indica el *mínimo* para NMH para que no exista sobrecarga de trabajo; se desprende que el CT A fue el CT que presentó un menor grado de ocupación, dado que NMH nunca se observó bajo el valor 3.



**Figura 7.** Número de máquinas Hombre (NMH) por CT

La Figura 8 muestra que el CT A estuvo el 100% de los días observados con NMH mayor o igual a 3. Esto quiere decir que el trabajo asignado al operador en las distintas máquinas nunca superó la capacidad del operario. El centro de trabajo D fue el que presentó mayor grado de ocupación sobre la disponible, con un 28% de los días observados con NMH mayor o igual a 5; esto debe ser una alarma, debido a que el operario se encontró superado por el trabajo asignado la mayor parte del tiempo.



**Figura 8.** Nivel de ocupación observado por CT

## CONCLUSIONES

Se aplicó Simulación Montecarlo para estimar la eficiencia y ocupación de horas hombre en la sección de máquinas trefiladotas, en una empresa de la industria del alambre que opera con un enfoque *pull*, demostrando ser una poderosa herramienta de predicción para la estimación de indicadores de gestión operativa y ayuda en la toma de decisiones.

El modelo permite estimar un valor para el número de máquinas hombre (NMH), entregando un indicador numérico a la ocupación que un operario tendrá según las tareas asignadas. Esto permite la supervisión directa de los CT, pudiendo asignar los recursos necesarios en el momento indicado, reducir costos en mano de obra y aumentar la eficiencia real de máquinas.

Actualmente, el modelo se utiliza diariamente como herramienta de gestión, siendo posible ampliarlo a un parque de más de 60 máquinas.

Como principales beneficios se observa que la aplicación del modelo permite reducir el sobretiempo, balancear la carga de trabajo de los operarios y mejorar la entrega a tiempo de los productos.

Para un adecuado funcionamiento del modelo se recomienda actualizar periódicamente los parámetros de entrada del modelo, debido a las naturales variaciones y desviaciones que se producen en la operación de los sistemas productivos (nuevas máquinas, cambio de operarios, desgaste de máquinas, nuevos productos, etc.).

## REFERENCIAS

- Baines, T., & Kay, J. (2002).** Human performance modeling as an aid in the process of manufacturing system design a pilot study. *Int. J. Prod. Res.*, 40 (10), 2321 – 2334.
- Djassemi, M. (2005).** A simulation analysis of factors influencing the flexibility of cellular manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 43(10), 2101 – 2111.
- Houghton, E., & Portougal, V. (2005).** A model for labour pooling in batch manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 43(4), 671 – 685
- Kolarik, W., Woldstad, J., Lu, S., & Lu, H. (2004).** Human performance reliability on line assessment using fuzzy logic. *IEE Transactions*, 36, 457 – 467.
- Law, A., & Kelton, W.D. (2000).** *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 3<sup>rd</sup> Edition
- Mosier, C., & Mahmood, F. (2002).** Work sequencing in a manufacturing cell with labor constrains. *Int. J. Prod. Res.*, 40(12), 2883 – 2899.
- Musliu, N., Schaerf, A., & Slany, W. (2001).** Local search for shift design, 4<sup>th</sup> Metaheuristics International Conference.
- Norman, B., Tharmmaphornphilas, W., Needy, K., Bidanda, B., & Warner, R. (2002).** “Work assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills”. *Int. J. Prod. Res.*, 40(6), 1479 - 1492.
- Ross, Sh. (1997).** *Simulation*. Academic Press, 2<sup>nd</sup> Edition,

**Stockton, D., Ardon-Finch, J., & Khalil, R. (2005).** Design of flexible manpower line walk cycles for a fixed number of operators. *Int. J. Prod. Res.*, 43(3), 583 – 596.