

## Aplicación del Modelo de Destilación Fraccionada a Procesos de Mejora Multiobjetivo

Javier Conde Collado<sup>1</sup> Manuel Rodríguez Méndez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctor Ingeniero Industrial, ETSICCP de la UCLM, Campus Universitario s/n, Ciudad Real, Javier.Conde@uclm.es

<sup>2</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Schwarzkopf & Henkel, Aptdo. 1070, 15080 La Coruña, Manuel.Rodríguez@henkel.es

### RESUMEN

*En esta comunicación, se recogen los resultados provisionales de un proyecto de investigación entre el Grupo GIO-UCLM, ASM-Soft y la fundación KSF, en el que se aplica el método de destilación fraccionada (PDF) a la reducción de tiempos y costes en actividades y operaciones de producción como el cambio de formato. Venimos trabajando en esta línea en Schwarzkopf & Henkel desde hace nueve años y se han conseguido reducciones relevantes (por encima del 30%) en ambas variables. A diferencia del método SMED, el PDF contempla decisiones multiobjetivo.*

### 1. Introducción

Las experiencias de SHIGEO SHINGO con el método SMED (cambios de útiles de un sólo dígito) y OTED (cambios de útiles de un golpe) datan, según él mismo relata [1], de 1950, cuando se le pide en la planta de Mazda en Toyo Kogyo que elimine los cuellos de botella que producían tres prensas que trabajaban el 33% del tiempo. Sus observaciones sugieren dividir las operaciones de preparación en internas (máquina parada), como montar o retirar troqueles, y externas (máquina operando), como el transporte de útiles. La preparación interna se redujo en el 50%.

Posteriormente, en 1957, en el astillero Hiroshima de Mitsubishi, consiguió incrementar la capacidad de una gran cepilladora, utilizada para mecanizar bastidores de motores diesel, realizando las operaciones de preparación sobre una mesa adjunta, e incrementó la productividad en un 40%. Un tercer encuentro con el SMED se produjo en 1970, cuando visitó el taller de carrocerías de la planta principal de la Toyota Motors. En Volkswagen, se cambiaban los troqueles en dos horas. La distinción y posterior transformación de operaciones internas a externas y la mejora consiguiendo permitir pasar a una hora y media. Algunos meses más tarde, consigue finalmente pasar a seis minutos. A partir de entonces, el método lo da a conocer como SMED y propone ocho técnicas básicas: separar las operaciones de preparación internas de las externas, convertir preparación interna en externa, estandarizar la función, no la forma, utilizar mordazas funcionales o eliminar cierres completamente, utilizar plantillas intermedias, adoptar modos de operación paralela y eliminar ajustes y, por último, mecanización.

Alan Robinson de la Universidad de Massachusetts [2], después de recoger algunas de las múltiples técnicas desarrolladas, a partir de las básicas; por ejemplo, en el capítulo de ajustes funcionales: método del orificio con forma de pera, método de las arandelas con forma de “U”, método de las roscas acanaladas, método de la ranura en forma de “U”, método de la brida, etc., señala también algunos de los beneficios del SMED: reducciones de tiempo,

desaparición de stocks, incremento de tasas de rotación de capital, incremento de la productividad, eliminación de stocks inútiles, eliminación de deterioros de las mercancías, incremento de la tasa de trabajo de máquinas y de la capacidad productiva, eliminación de los errores de preparación, mejora de la calidad, incremento de la seguridad, simplificación del área de trabajo, menor nivel de entrenamiento, etc.

Sin embargo, en el capítulo de costes señala el aumento de la eficiencia de las inversiones, ya que es posible conseguir dramáticos aumentos de la productividad con relativamente poco coste. Este es el factor que mueve a los técnicos de Henkel a plantearse la búsqueda de métodos complementarios al SMED, ya que entienden que admitiendo las ventajas indiscutibles del mismo, no se producen, paralelamente a las reducciones de tiempos, las de costes que ellos desearían. A partir de ahí y durante nueve años, comienzan nuestros trabajos con la aplicación del PDF enfocado a la reducción combinada de tiempos y costes de preparación.

Hemos de señalar que durante nuestra investigación se ha podido comprobar la escasez de investigaciones, a escala internacional, en este terreno y la despreocupación con que muchas grandes empresas enfocan en la actualidad estos problemas, algo que nos resulta tanto más inexplicable, cuanto el éxito de nuestros trabajos ha despertado un verdadero interés en la Dirección de Schwarzkopf & Henkel-España, que ha exportado a otras de sus plantas en Europa la metodología desarrollada.

## **2. El modelo de destilación fraccionada.**

Aquí se presenta el modelo de destilación fraccionada (PDF), para la reducción combinada y secuenciada del tiempo y del coste del cambio rápido de formato. Frente a otros métodos como el SMED, que buscan la reducción dramática del tiempo olvidando el coste no inducido (ya que el inducido, a partir de la reducción del tiempo, es señalado, entre otros, por Gessner [3]), el PDF (Conde [4]) busca la reducción de ambas variables (tiempo y coste) siguiendo un camino que combina fases de reducción básica del tiempo, con otras en que se busca la reducción del coste, aun a cambio de algunos aumentos circunstanciales de las duraciones de las correspondientes actividades (ver también [5], [6] y [7]).

### **2.1. Modelo de destilación fraccionada: Versión 1 (PDF-V1).**

Puede observarse en la figura 1, cómo el objetivo básico del SMED es la reducción de tiempo drástica y en una sola etapa (desde el punto S al F), sin que el coste no inducido (por la reducción del tiempo) se reduzca de forma sensible. El PDF, que se instrumenta en fases sucesivas, trata de conseguir una reducción en tiempo similar, pero acompañada por una reducción en coste no inducido. Cada fase del PDF comprende dos etapas: una de reducción básica de tiempo (S-I<sub>1</sub>; I<sub>2</sub>-I<sub>3</sub>; I<sub>4</sub>-I<sub>5</sub>; I<sub>6</sub>-F), generalmente, conseguida a través del empleo del análisis de métodos y tiempos, reingeniería de procesos e implementación de dispositivos especiales, y de otra, en que, a través de la gestión de recursos implicados en el proceso, se realiza un intercambio tiempo-coste (I<sub>1</sub>-I<sub>2</sub>; I<sub>3</sub>-I<sub>4</sub>; I<sub>5</sub>-I<sub>6</sub>).

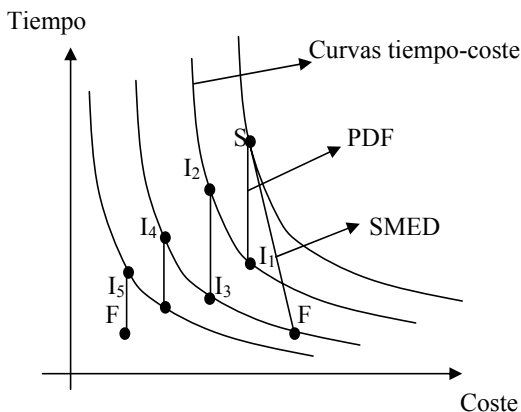


Fig. 1. Proceso de destilación fraccionada-PDF (Versión 1).

## 2.2. Método de destilación fraccionada: Versión 2 (PDF-V2).

Como puede observarse en la figura 2, existe una trayectoria de reducción (TR), convexa en relación con el eje de abscisas, a diferencia de la versión 1, en torno a la cual se sitúan las fases y las etapas de reducción. Puede comprobarse que, las distintas pendientes de la TR, señalan que se comienza por una orientación de la reducción claramente al tiempo, en las etapas iniciales, para pasar a una relación favorable al coste, en las etapas finales, donde ya la fuerte reducción de tiempo conseguida, obliga a mayores esfuerzos en nuevas reducciones.

A diferencia de la versión 1, donde los “avances tiempo-coste” son homogéneos a lo largo de la trayectoria (relación marginal de reducción constante), en la versión 2, se observa un mayor esfuerzo de reducción de tiempo en las primeras fases y de coste en las últimas.

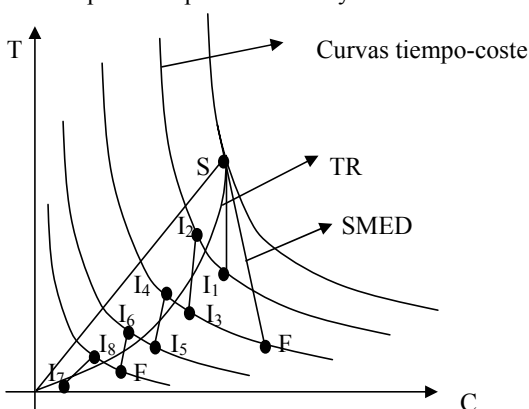


Fig. 2. Proceso de destilación fraccionada (Versión 2).

En general, la reducción de tiempos y costes se logra (ver Rodríguez [8]) por alguno de los siguientes caminos (en [9] Shingo establece una metodología sistemática de proceso de mejora y en CONDE [5] se plantea otra aplicable al PDF):

- La observación y aplicación adecuada de las técnicas acuñadas.
- El análisis de métodos y tiempos (diagrama hombre-máquina, distribución en planta, therblings, etc..). La mejora en la secuenciación.

- El diseño orientado al cambio de formato
- La mejora de las actividades logísticas (de soporte, de limpieza, de organización de tareas, etc.).
- La eliminación de esperas, manipulaciones, transferencias, transportes, etc.
- La mejora en el pre y postcambio y en la preparación de actividades.
- La reducción de tiempos de operación basada en la experiencia.
- El uso de dispositivos antierror (poka-yoke) y de confirmación (Conde [5]).

Como puede observarse en la figura 3, si se desea llegar al mismo punto objetivo EP (Tobj.), en el caso del SMED es necesaria una reducción final drástica de coste (de EP a TP), sin modificación apreciable de la duración del proceso de cambio de útiles. Algo que es más difícil de conseguir, que las sinergias y el aprendizaje en diversas etapas, que propone el PDF.

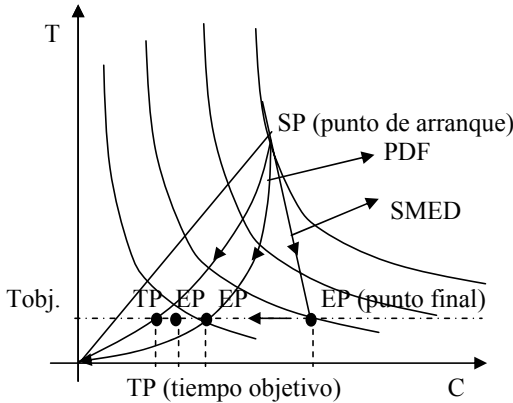


Fig. 3. Recorridos de SMED y diversos PDF hasta el punto objetivo.

### 2.3. Análisis de costes.

Según el escenario (relación coste de operación/coste total) un método es preferible al otro. A la hora de seleccionar algún método, conviene realizar alguna comparación vía costes. Así por tanto, partiendo de una función de coste total:

$$CT = f(CI(T); CO(T)) \tag{1}$$

siendo:

- CT: coste total
- CO: coste de operación
- N: número de operarios
- Ch: coste de la hora-hombre en ptas/Hh.
- K: amortización de equipos y herramientas, costes de energía, alquileres, costes de almacenaje, gastos financieros etc..
- P: unidades producidas a la hora.
- CI: coste de indisponibilidad
- T: duración del cambio
- H: horas-hombre por operario
- B: beneficio o margen obtenido por unidad producida.

Se obtiene:

$$CT = CO + CI = N T Ch + K T + T P B = T (N Ch + K + P B) \tag{2}$$

En concreto,

$$CO = N T Ch = C * T \tag{3}$$

(C es el coste de la hora trabajada por el equipo de operarios, medido en ptas/hora).

Para determinados costes de operación fijos,  $CO_0$ ,  $CO_1$  y  $CO_2$  son hipérbolas equiláteras, reflejando cada una un método diferente aplicado al proceso de reducción, tal y como se han representado ya en las figuras anteriores.

#### 2.4. Análisis de inversión y esfuerzos de mejora.

La inversión o esfuerzo de mejora, (CONDE [5]), viene representada por la siguiente expresión:

$$EM = \sum_{i=0}^{l+n} \left[ p_T \left( \frac{cte_1 + cte_2}{T} \right) \cdot (\nabla T)^i + p_C \left( \frac{cte_3 + cte_4}{C} \right) \cdot (\nabla C)^i \right] + \sum_{i=0}^l (N \cdot Ch)^i \cdot COR \quad (4)$$

El primer término representa el esfuerzo para mejorar el método y, el segundo, el coste de oportunidad de los recursos. La rentabilidad puede entonces calcularse:

$$R = \frac{\left( \sum \nabla CT \right)}{EM} \quad (5)$$

Interesantes son los resultados (aplicados a la sección de soldadura de una planta de fabricación de motocicletas) para la reducción del coste de cambio de preparación mediante una inversión tecnológica, presentados por De la Fuente [10], que parte de la expresión de Porteus, para representar el coste de gestión de stocks :

$$c_T = c_a \cdot D + \frac{c_e \cdot D}{Q} + \frac{c_a \cdot r \cdot Q}{2} + F(c_e) \cdot r \quad (6)$$

donde la función F que puede ser exponencial, logarítmica o lineal y es asignada a diferentes productos.

#### 2.5. Trayectoria de reducción (PDF).

La versión 2 del PDF parte de una trayectoria de reducción TR que es convexa con relación al eje de abcisas, queriendo reflejar la estrategia a seguir, consistente en abordar, en primer lugar, una fase de fuerte reducción de tiempo, para, en una segunda fase posterior, emprender la reducción sensible de coste (cuando la menor RMR-relación marginal de reducción, como luego se demostrará, permite aplicar un menor esfuerzo en la reducción del coste frente a la del tiempo). Se llega a la siguiente expresión (CONDE [5]):

$$a C^3 + (1 - a s) C^2 - (n - i)^2 = 0 \quad (7)$$

de donde se obtienen las coordenadas de los puntos de corte de las curvas tiempo-coste, con la correspondiente a la trayectoria de reducción.

Se demuestra también, suponiendo una familia de curvas tiempo-coste  $C * T = (n - i)^2$  (siendo "n" el número de etapas del PDF, e "i" una en particular), que la relación marginal de reducción va decreciendo con la disminución de coste, a lo largo de la trayectoria de reducción, con lo que, el esfuerzo aplicado en reducción del coste C, es proporcionalmente menor que el aplicado al tiempo T, en la zona media-final de la trayectoria de reducción. Por último, es importante observar en el PDF lo siguiente:

- Los trade-off en las etapas o fases finales aumentan el tiempo ligeramente, a cambio de una disminución importante de recursos, ya que la RMR es menor.
- La pendiente (RMR) de las reducciones, vía método, en esas etapas finales, refleja una reducción mayor de coste que en las etapas iniciales (por doble causa: la curva de la experiencia o a que, al ser menor el tiempo que el coste, la relación marginal de reducción favorece al coste, lo que puede explicarse porque ya se han llevado a cabo las reducciones que suponen menor esfuerzo).
- El esfuerzo de reducción en las etapas finales es mayor, ya que lógicamente se reserva a las iniciales los esfuerzos más fáciles o inmediatos.

## 2.6 Proceso de Cambio de Útiles

Se presenta, a continuación, en la figura 4, el proceso de cambio de útiles, tal y como se refleja en CONDE [6]. Puede observarse el despliegue de algunas de las principales fases y etapas del proceso que conduce al PDF.

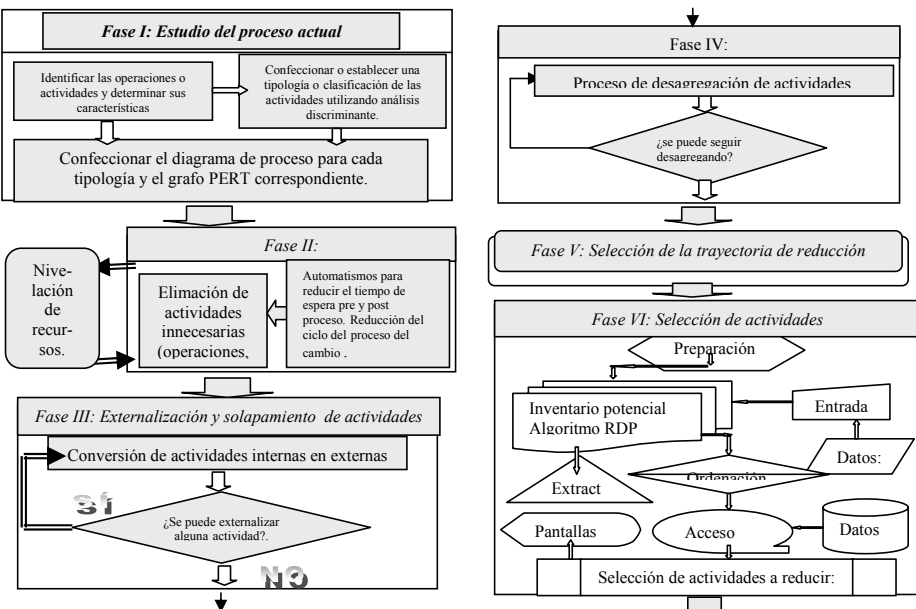


Fig. 4. Proceso de destilación fraccionada (PDF). Esquema parcial.

## 3. Modelo propuesto

En este proyecto, atendiendo al entorno en el que se produce el cambio de formato: líneas de llenado en sector químico, se sigue básicamente el método ya señalado PDF-V1, pero con reducciones del coste progresivas (ver figura 5) en las etapas de reducción básica de tiempo (PDF-V2), ya que garantiza una reducción progresiva del coste paralela a la del tiempo (impulsando un aprendizaje progresivo necesario en estos entornos) y con reducciones marginales de sustitución tiempo-coste similares en todas las fases (RODRÍGUEZ [8]). En el entorno de estudio, se dan curvas de aprendizaje con progresión proporcional, mientras la clasificación de actividades que hemos elegido dadas las particularidades del proceso, y su aplicación en las distintas fases, se realiza de forma homogénea.

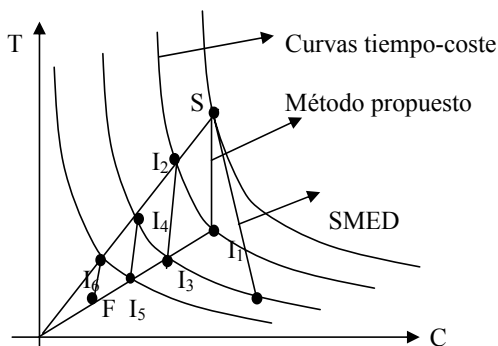


Fig. 5. Método de reducción propuesto

Además, en lugar de que los puntos intermedios \$I\_1, I\_2, I\_3, I\_4, I\_5\$ y \$I\_6\$ se vayan determinando según las posibilidades del plan de mejora (evolución natural), aquí se establece un programa previo de reducción (evolución forzada, canalizada o programada). En concreto, los puntos intermedios de subíndice par, se sitúan sobre un radiovector \$T = \alpha C\$, y los de índice impar, sobre el radiovector \$T = \beta C\$ (es decir, se presentan ligaduras). De esta forma, es posible dirigir mejor la marcha del algoritmo de reducción e implementar un mecanismo propio de mejora, encontrando los parámetros \$\alpha\$ y \$\beta\$ que optimizan el nº de fases o el punto \$F\$ final, en relación al coste y/o tiempo alcanzados tras el proceso de reducción.

Como se puede observar, este método exige que, según avanza el PDF (proceso de destilación fraccionada), las actividades de reducción pura de tiempo llevan un esfuerzo, por reducción de coste, mayor según avanza el proceso. Existe, por tanto, como ya se ha mencionado, un aprendizaje o una saturación en el proceso de mejora.

Las condiciones necesarias para que exista reducción de costes en las etapas de reducción básica de tiempo, a partir de la función \$K + kn = T^\gamma C^\delta\$, que relaciona tiempo y coste, resultan ser:

$$(k + 2n)/(\alpha^\gamma) - (k + n)/(\beta^\gamma) < 0 \Rightarrow \alpha > \beta ((k + 2n)/(k + n))^{1/2} \quad (8)$$

La condición de incremento de la reducción de coste, según avanza el proceso de destilación fraccionada, se calcula de la siguiente manera:

$$CI_4 - CI_3 > CI_2 - CI_1 \quad (9)$$

de donde,

$$|(k + n)/\alpha^\gamma - k/\beta^\gamma| > |(k + 2n)/\alpha^\gamma - (k + n)/\beta^\gamma| \Rightarrow \alpha > \beta \quad (10)$$

que, evidentemente, se cumple.

#### 4. Conclusiones.

El modelo propuesto aplicado a diferentes líneas de llenado de Henkel ha conseguido los resultados siguientes:

	ANTES DE LAS MEJORAS tiempo (h.)	DESPUES DE LAS MEJORAS tiempo (h.)	REDUCCIÓN (%)
<b>LINEA BREITNER</b>	<b>3,42</b>	<b>2,23</b>	<b>34,8</b>
<b>M.Q. LINEAL</b>	<b>2,86</b>	<b>1,95</b>	<b>31,8</b>

*Tabla 1. Mejoras conseguidas en tiempo.*

AÑO	CAMBIOS/AÑO (n°)	TOTAL (horas-hombre)	OPERARIOS LÍNEAS (n°)	OPERARIOS MANTENIMIENTO (n°)
<b>1.99</b>	<b>)</b>	<b>8.274,5</b>	<b>8,8</b>	<b>2,9</b>
<b>5.99</b>	<b>1.383</b>	<b>6.607,5</b>	<b>3,2</b>	<b>2,0</b>
<b>6.99</b>	<b>2.641</b>	<b>6968,5</b>	<b>3,1</b>	<b>1,3</b>
<b>7.99</b>	<b>3.483</b>	<b>9.840,6</b>	<b>1,7</b>	<b>0,7</b>
<b>8.99</b>	<b>3.488</b>	<b>9.033,3</b>	<b>1,6</b>	<b>0,64</b>
<b>9.00</b>	<b>3.812</b>	<b>8.176,3</b>	<b>1,6</b>	<b>0,29</b>

*Tabla 2. Mejoras alcanzadas en coste.*

0

## Referencias.

- [1] Shigeo Shingo, (1990) “El sistema de producción de Toyota desde el punto de vista de la ingeniería”, TGP, Madrid.
- [2] Robinson, A, (1992) “Enfoques modernos para la gestión de la fabricación. El sistema Shingo”, Productivity Press, Cambridge.
- [3] Gessner, R.A. (1988) “Repetitive Manufacturing Production Planning”, John Wiley & Sons, New York.
- [4] Conde, J., “La reducción multivariante de actividades: el proceso de destilación fraccionada”, Documento técnico GIO-1099-UCLM, Ciudad Real (1999).
- [5] Conde, J., “Algoritmo de reducción de la duración de proyectos”, Documento técnico GIO-0798-UCLM, Ciudad Real (1998).
- [6] Conde, J., “Análisis del proceso de cambio de útiles”, Documento técnico GIO-0300-UCLM, Ciudad Real (2000).
- [7] Conde, J., “Trade-off analysis in the workshop logistics”, Proceedings of the Signals & Systems International Conference (Vol. 9) Jul.-1989, pp.141-150.
- [8] Shigeo Shingo., (1990) “Le système Shingo, les clés de l’amélioration de la production”, Les éditions d’organisation, Paris.
- [9] Rodríguez, M., (2001) “Aportaciones al análisis de cambios de formato en líneas de envasado”, Tesis Doctoral, Ciudad Real.
- [10] De la Fuente, D., (2000) “Limited investment budget analysis in multi-item production facilities”, CEJOR, Vol. 8, pp.337-360.