

## Aplicación de técnicas de optimización al proceso de depuración en Proyectos Ligeros

Javier Conde Collado<sup>1</sup>, Javier Cárcel Carrasco<sup>2</sup>, Eduardo Conde Jiménez<sup>3</sup>, Manuel Rodríguez Méndez<sup>4</sup>,

<sup>1</sup> Doctor Ingeniero Industrial, ETSICCP de la UCLM, Campus Universitario s/n, Ciudad Real,

[Javier.Conde@uclm.es](mailto:Javier.Conde@uclm.es)

<sup>2</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Dpto. de Construcciones arquitectónicas, UPV, Valencia, [jcarcel@teleline.es](mailto:jcarcel@teleline.es)

<sup>3</sup> Dip. Ingeniero Industrial, Universidad Europea CEES, Madrid, [econde@retemail.es](mailto:econde@retemail.es)

<sup>4</sup> Doctor Ingeniero Industrial, Schwarzkopf & Henkel, Apto. 1070, 15080 La Coruña,

[Manuel.Rodríguez@henkel.es](mailto:Manuel.Rodríguez@henkel.es)

### RESUMEN

*Nuestras primeras publicaciones en el ámbito de la fabricación ligera comenzaron en el 94, con estudios sobre la configuración de la cadena de producción de Volkswagen en Landaben. Posteriormente, se comenzaron a aplicar técnicas de programación lineal a la optimización de la gestión de cambios en la configuración. Desde hace tres años, en que se acuñó la denominación de Proyectos ligeros, se vienen aplicando técnicas de programación de proyectos, programación lineal y programación dinámica a la depuración de actividades, con reducciones combinadas tiempo-coste. Esta comunicación presenta un método algorítmico, elaborado en base a las citadas técnicas, cuya aplicación permite el aligeramiento de las actividades de un proyecto, con consideraciones de riesgo de incumplimiento de plazos. El algoritmo se ha aplicado a actividades de mantenimiento en planta industrial.*

**Palabras clave:** Programación de Proyectos ligeros, técnicas de optimización.

## 1. Introducción

En CIO-2002 se presentó la comunicación “Aplicación del modelo de destilación fraccionada a procesos de mejora multiobjetivo” [2], en la que se planteaba un método de reducción tiempo-coste (PDF) en operaciones de cambio rápido de formato en llenadoras. En esta comunicación se presenta un método [4] que permite obtener el proyecto o programa óptimo con reducción simultánea de tiempo y coste. En él, se pretende la depuración, “poda” o “desbroce” de las actividades innecesarias, aligerándolas en lo posible y orientándolas con exclusividad a los objetivos propuestos. Mejoras de método como: menores desperdicios, mayor atención en el desempeño a los requerimientos, mejor uso de los recursos, uso de tecnologías de aligeramiento, etc., conducen a una duración reducida (tiempo tope reducido) con el menor coste posible de la operación.

## 2. Modelo de reducción.

### 2.1. Principios inspiradores.

En las figuras siguientes se esquematizan los fundamentos básicos y los principios inspiradores del modelo propuesto. En la figura 1, se presenta el esquema base de la relación tiempo-coste de las actividades de un proyecto de ingeniería o de una actuación, intervención

(de mantenimiento, logística, de producción, etc.). En ella se presenta la relación convencional (decreciente desde la duración tope hasta el coste normal) y las familias de curvas que representan las reducciones combinadas tiempo-coste via mejora de método o de calidad. La mejora del método o procedimiento de realización de la actividad conduce a nuevas relaciones duración-coste, como las  $M_2$  y  $M_3$ , bajo la hipótesis de reducción del tiempo normal, pero no del coste normal. Por contra, si se pretende aumentar los niveles de calidad de la actividad, las relaciones duración-coste se desplazan hacia la derecha ( $Q_2$  y  $Q_3$ ).

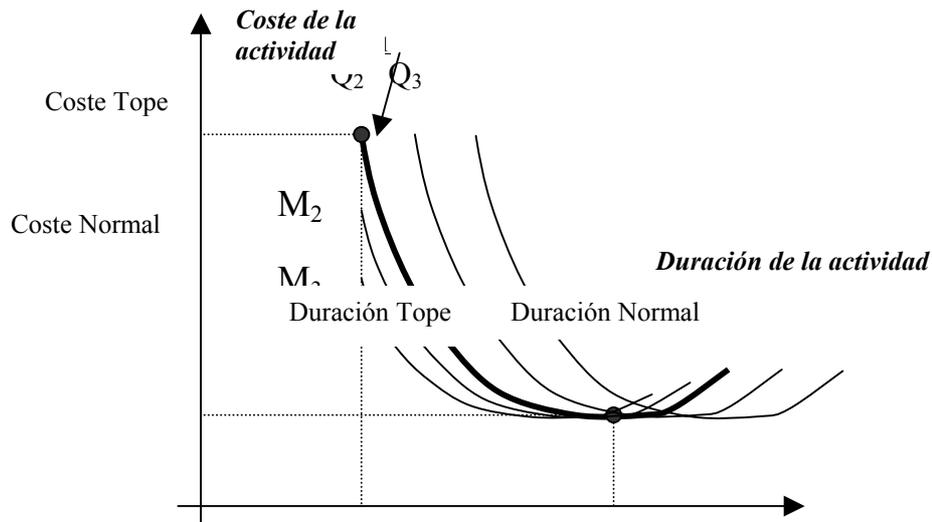


Figura 1.- Relaciones duración-coste para niveles de calidad ( $Q$ ) y de procedimiento ( $M$ ) diferentes.

En la figura 2, se representa, de forma esquemática, el proceso iterativo de reducción tiempo-coste de una actividad a partir de dos fases combinadas en secuencia: una primera, dentro del modelo convencional de relación tiempo-coste, en la que se reduce la duración de la actividad modificando los recursos asignados a la actividad, y una segunda en que, via mejora de método, puede reducirse simultáneamente el coste y la duración.

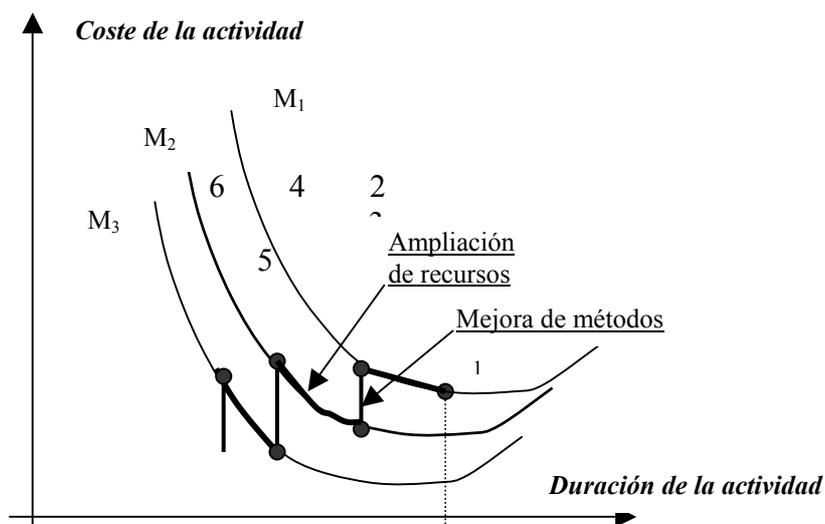


Figura 2: Sendero de reducción de la duración y el coste de una actividad.

La reducción de la duración de una intervención o proyecto determinados, se consigue a través de la reducción de la duración de una serie de actividades seleccionadas, depurando aquellas prescindibles, incrementando los recursos o mejorando los métodos aplicados. La cuestión es seleccionar esas actividades de forma que el coste, que lógicamente puede verse incrementado, lo haga de forma mínima. En la figura 3, se representa el proceso de disminución de la duración del proyecto. En cada iteración, existen diversas trayectorias posibles y se trata de determinar la de mínimo coste. Existe una envolvente de todas las trayectorias de mínimo coste correspondiente a cada iteración. El modelo desarrollado permite encontrar dicha envolvente y determinar qué punto de ella cumple con los niveles de duración y coste objetivo.

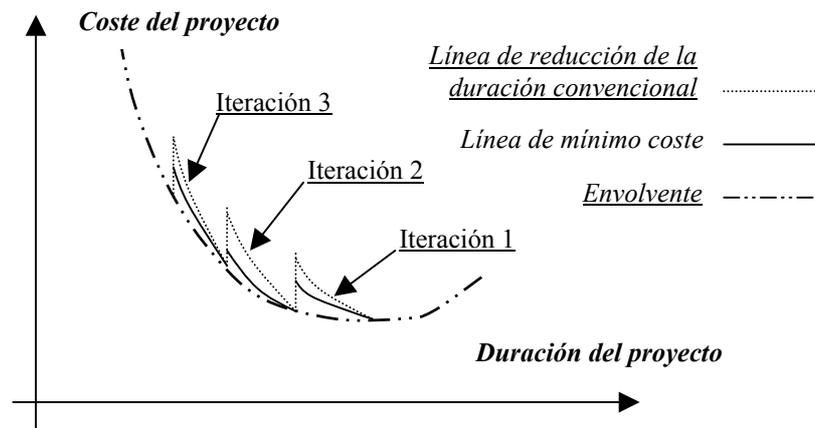


Figura 3: Proceso de optimización tiempo-coste del proyecto

## 2.2. Fases del proceso general.

Las fases de que consta el procedimiento de cálculo son las siguientes:

1. Determinación de todos los caminos existentes en la red, tanto con las duraciones normales (CC-dn), como con las duraciones tope reducidas (CC-dtr). A partir de ellos, se puede de forma inmediata calcular los caminos críticos. En el cálculo de los caminos, el modelo utiliza diferentes algoritmos entre los que se encuentran
  - ✓ Un algoritmo geométrico de preoptimización. En una matriz se recogen todas las relaciones de precedencia que se dan en la red objeto de estudio, situando en cada fila la actividad precedente y la posterior. Se comienza por la actividad que figura en la primera fila y columna de la matriz y la correspondiente a la primera relación encontrada, trazando una línea horizontal que une ambas actividades. A continuación, se traza una nueva recta vertical desde la actividad posterior hasta encontrar una nueva casilla con la misma actividad. En esa misma fila, se unen las dos actividades correspondientes relacionadas y se vuelve a iterar hasta encontrar la actividad final n. De igual forma, probando con la siguiente fila, se van obteniendo todos los caminos existentes en la red.
  - ✓ Un algoritmo algebraico, cuando el número de actividades es numeroso o presenta forma lineal.
2. Cálculo de las pendientes de la relación tiempo-coste de cada actividad, que constituyen los coeficientes de coste por unidad de tiempo del programa de optimización, en caso de que la aproximación de la relación tiempo-coste sea lineal, y

las relaciones marginales de sustitución coste-tiempo, en caso de aproximación cuadrática. En este último caso, se determina un tope a la relación marginal de sustitución y se linealiza la relación.

Adoptar la aproximación cuadrática aumentaría notablemente el coste de computación, mientras que la lineal implicaría la omisión de “esfuerzos de reducción tiempo-coste” elevados, imprecisiones en la estimación de costes para el caso de duraciones mayores que las topes y mayor riesgo de quiebra de la actuación. En base a esto, se adopta la aproximación cuadrática exclusivamente para formular una restricción de duraciones mínimas de actividad por encima de las topes, para actividades cuya relación marginal de sustitución coste-tiempo, en algún punto de la curva, fuera mayor que una cantidad “ $\pi$ ”. La duración de esa actividad no podría ser menor que:

$$D_i \geq D_{Ni} + [\pi_i (D_{Ti} - D_{Ni})^2 / 2(C_{Ti} - C_{Ni})] \quad (1)$$

Siendo:

$D_i$ : duración de la actividad  $i$ .

$D_{Ti}$ : duración Tope de la actividad  $i$ .

$D_{Ni}$ : Duración Normal de la actividad  $i$ .

$C_{Ti}$ : Coste Tope de la actividad  $i$ .

$C_{Ni}$ : Coste Normal de la actividad  $i$ .

3. Determinar la intervención o actuación de mínimo coste para el CC-dn, y a partir de ahí, ir reduciendo la duración del camino crítico, aunque el mínimo coste de la incidencia correspondiente vaya aumentando. En cada iteración, la rutina correspondiente determina las reducciones a practicar en las duraciones de determinadas actividades, para que el coste global del proyecto o intervención sea mínimo.
4. Se continua el proceso de reducción de la duración del proyecto hasta la duración tope reducida. En ese momento se dispone de una serie de puntos en el plano tiempo-coste que permite ajustar una curva de la relación tiempo-coste que permitirá:
  - ✓ Elegir el punto de duración tope a coste mínimo para los casos en que se pretende reducir la duración del proyecto o intervención al mínimo.
  - ✓ Obtener el punto correspondiente a la duración objetivo.
  - ✓ Calcular el punto óptimo, conociendo el coste de penalización por retraso y el valor para la empresa que tiene la duración en relación con el coste, etc.

Así, puede plantearse el problema de la siguiente manera:

$$MinCD = \sum_{\forall i} [k_i - c_i \times t_i] \quad (2)$$

$$t_i \leq D_{NR_i} \quad ; \quad -t_i \leq -D_{TR_i} \quad (3)$$

$$t_i \geq t_{Ni} + [\pi_i (t_{Ti} - t_{Ni})^2 / 2(C_{Ti} - C_{Ni})] \quad (4)$$

$$\sum_{\forall i \in W_h} t_i \leq D, \quad \forall h, \quad (5)$$

Siendo:

$CD$ : Coste directo del proyecto o intervención.

$k_i$ : Coste para duración cero de la actividad  $i$ .

$c_i$ : Coste directo de la actividad  $i$  por unidad de tiempo.

- $t_i$ : Duración de la actividad  $i$ .
- $D_{NR}$ : Duración Normal reducida de la actividad  $i$ .
- $D_{TR}$ : Duración Tope reducida de la actividad  $i$ .
- $D_{Ti}$ : duración Tope de la actividad  $i$ .
- $D_{Ni}$ : Duración Normal de la actividad  $i$ .
- $C_{Ti}$ : Coste Tope de la actividad  $i$ .
- $C_{Ni}$ : Coste Normal de la actividad  $i$ .
- $D$ : Duración del proyecto.
- $W_h$ : Camino  $h$  de la red.

Siendo  $W_h$  los diferentes caminos considerados (aquellos cuya duración normal es mayor que la duración tope reducida máxima).  $D$  es la duración total de la actuación, intervención o proyecto bajo consideración. El problema así planteado consiste en obtener las diferentes duraciones reales  $t_i$  de cada actividad, que, para una duración de la actuación tal como  $D$ , dan un coste directo de la misma mínimo. La duración menor a conseguir, si no se considerara como objetivo también la reducción de coste, es la mayor duración tope reducida de los diferentes caminos considerados que conectan la actividad inicial con la final. En otro caso, debe determinarse la combinación duración-coste de todas las contenidas en la envolvente, a la que con anterioridad se ha aludido, que cumpla con los objetivos del agente decisor (figura 4).

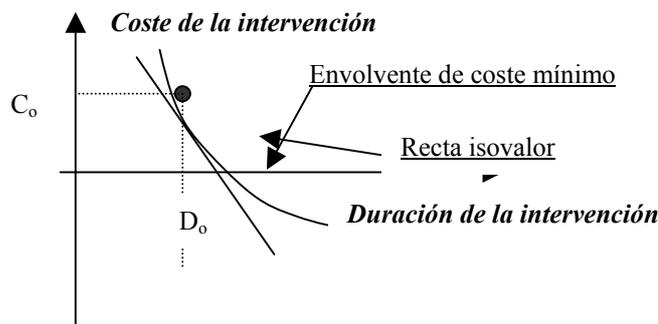


Figura 4: Obtención del punto objetivo.

### 2.3. Rutina de aligeramiento.

A fin de aligerar la poda de los caminos se ha confeccionado también un heurístico que facilita el proceso. En el se siguen las siguientes etapas:

- 1º. Se calcula la duración normal total,  $DNT$ , de la actuación o , resolviendo el simplex con duraciones normales, y también la duración tope reducida total,  $DTRT$ , calculando el simplex con duraciones tope reducidas de cada actividad.

- 2º. Se calcula la reducción máxima posible a obtener:

$$DNT - DTRT \tag{6}$$

- 3º. Esta reducción se convierte en la “holgura de referencia”:

$$HR = DNT - DTRT \tag{7}$$

- 4º. Se emplea el método algebraico de cálculo de los caminos, para elaborar las matrices en las que se hace figurar en cada fila las holguras de cada actividad integrante del camino.

- 5º. Se rechaza, podándolo del árbol o de la matriz, el camino cuya suma de holguras sobrepase a la “holgura de referencia”. Se obtendría el vector de holguras de los

camino en consideración. Siendo  $t$  el número de la columna, se podan todas las filas  $i$ , en las que se cumple:

$$\sum_{t=1}^r H_{it} > HR \quad (8)$$

6°. Como es lógico, es posible establecer un balance entre la obtención de subóptimos valiosos y el coste de computación, manipulando la holgura de referencia haciéndola menor que  $DNT - DTRT$ .

$$HR < DNT - DTRT \quad (9)$$

#### 2.4. Análisis de sensibilidad.

Una vez determinada la envolvente de reducción y el punto objetivo, se hace preciso entrar en un análisis de sensibilidad que permita evaluar la estabilidad de la solución encontrada, en función de la variación previsible de los diferentes parámetros del modelo.

La función objetivo del modelo de programación lineal normal:

$$\text{Min}CD = \sum_{\forall i} [k_i - c_i \times t_i] \quad (10)$$

Se sustituye por:

$$\text{Máx. } CD(\theta) = \sum [(c_i + \alpha_i \theta) t_i] \quad (11)$$

En donde las  $\alpha_i$  son constantes de entrada, que representan las tasas relativas a las que se cambian los coeficientes. Estos valores asignados a las  $\alpha_i$  pueden representar cambios simultáneos de los  $c_i$ , para realizar un análisis de sensibilidad sistemático del efecto que tiene el aumento en la magnitud de estos cambios.

También pueden, estos análisis, estar basados en la forma en que cambiarán los coeficientes y la consiguiente función objetivo (figura 5), respecto a algún factor medido por  $\theta$ . Estos factores pueden ser incontrolables, como el estado de la economía, o por el contrario, encontrarse bajo el control del tomador de decisiones.

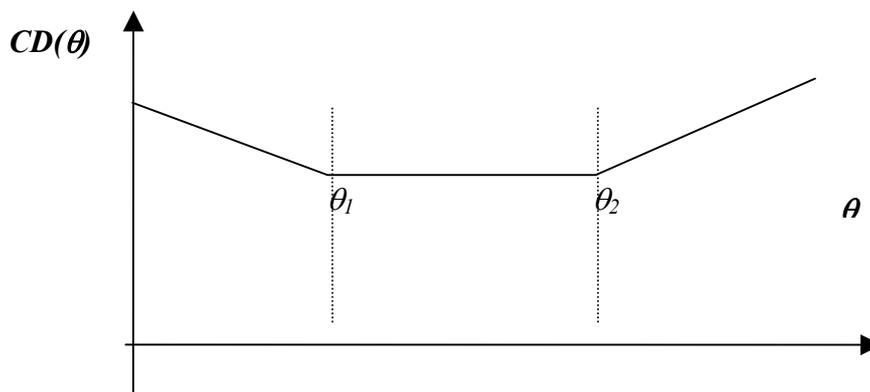


Figura 5: Valor de la formación objetivo (coste) para una solución óptima (tiempo), como una función de  $\theta$  para programación lineal paramétrica con cambios sistemáticos en los parámetros  $c_i$ . El procedimiento de programación para cambios sistemáticos en los parámetros  $c_i$  es el siguiente:

1. Se resuelve el problema de programación con  $\theta = 0$  usando el método simplex.

2. Se utiliza el procedimiento de análisis de sensibilidad para introducir los cambios  $c_i$  hasta que el coeficiente de una de las variables no básicas se convierta en negativo, o hasta que  $c_i$  se haya incrementado todo lo que se pretende.
3. Se aumenta  $c_i$  hasta que el coeficiente de una de las variables no básicas se convierta en negativo, o hasta que  $c_i$  se haya incrementado todo lo que se pretende.
4. Se utiliza esta variable como variable entrante para llevar a cabo una nueva iteración del método simplex, encontrando nueva solución óptima. Se regresa, posteriormente al paso 3.

### 3. Aplicación informática:

Se ha confeccionado una aplicación informática en Matlab 5.0, que posibilita los cálculos. Esto ha permitido aplicar el modelo a determinados casos, como el cambio de formato rápido de llenadoras, paradas anuales de mantenimiento en grandes instalaciones, operaciones puntuales de mantenimiento como revisiones anuales de grupos motobomba, etc.,

### 4. Resultados.

El modelo, como ya se ha reflejado, se ha aplicado a diferentes intervenciones de mantenimiento. Se recoge, a continuación, de forma resumida, la correspondiente a una actuación de cambio de formato en una línea de envasado de tubos. El cambio requería el empleo de mucho tiempo en operaciones de limpieza del circuito de llenado en la máquina llenadora.

Se detectó que las operaciones críticas eran las siguientes:

1. Retirada la tolva de la máquina llenadora.
2. Llevar la tolva a lavar.
3. Lavar, sanitizar y limpiar la tolva.
4. Colocar la tolva en la máquina llenadora.
5. Retirar, para lavar, el circuito que va desde la salida de la tolva a los 6 pistones de llenado.
6. Colocar el circuito de llenado en la llenadora.

El proceso llevaba un tiempo que oscilaba entre 160 y 210 minutos, y el coste de la parada oscilaba entre 385,00 € y 465,00 €, respectivamente. A partir de los cálculos se realizaron diferentes mejoras, siendo las correspondientes a las actividades críticas las reflejadas en la tabla 1.

Orden	Acción Realizada	Mejora	Coste de la acción (€)	Ahorro	
				Tiempo (min)	Coste (€)
1º	Construir una nueva tolva, para tener dos tolvas. Colocando elementos de sujeción en ambas tolvas.	Tener preparada, limpia y sanitizada la otra tolva para realizar el cambio. Realizar la limpieza y el sanitizado como operación externa	1.926,00	40	102,50
2º	Colocar un polipasto para facilitar la retirada y colocación de las tolvas.	Facilitar la retirada y colocación de las tolvas en la llenadora.	2.345,00	45	115,50

3º	Duplicado del circuito de llenado y colocación de conexiones rápidas Kamlock en el circuito	Rápido cambio del circuito. Limpieza y sanitizado se realizan como operación externa	1645,00	36	89,70
4º	Construcción de un carro para la colocación y el transporte de la tolva a la zona de lavado	Mejora de operación externa	746,00	15	38,50
5º	Formación del personal y adaptación al nuevo protocolo de trabajo				

Tabla 1: resumen de las mejoras efectuadas.

Se consiguió fijar el tiempo de parada para realizar el cambio en 20 minutos, con un coste del proceso de 51,30 €. En la figura 6 se representa, en forma de gráfico, un esquema con las mejoras efectuadas.

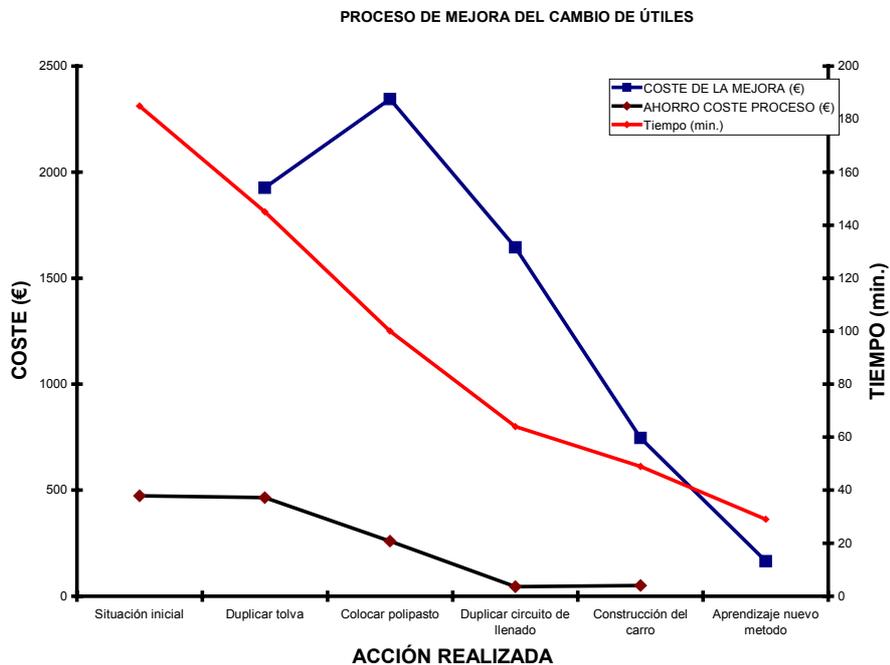


Figura 6: Representación de las mejoras realizadas.

En este caso, la trayectoria de reducción consigue reducciones tanto de tiempo como de coste a diferencia de la figura 3 y tal y como refleja la figura 7.

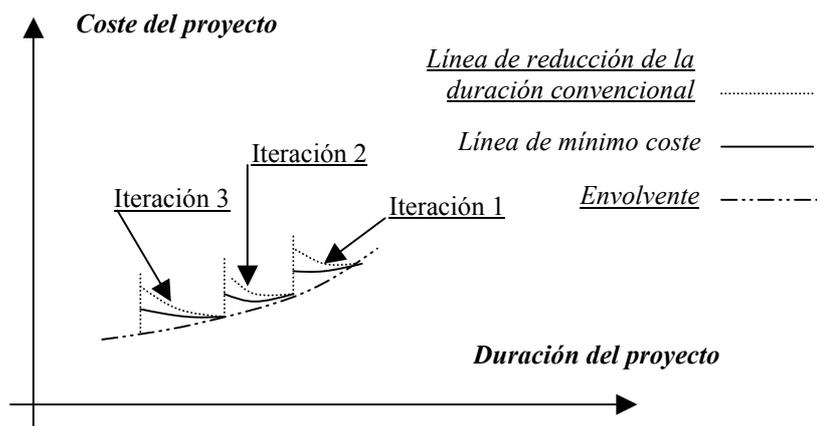


Figura 7: Proceso de optimización tiempo-coste del proyecto con reducción global de coste.

## 5 Conclusiones

El método propuesto consigue minimizar el coste total de una actuación, intervención, programa o proyecto de producción, logística, mantenimiento, etc., cuando simultáneamente se inicia un proceso de reducción de la duración total. Dichos valores de duración y costes se obtienen a partir de consideraciones derivadas de los ajustes tiempo-coste de cada actividad u operación, de las posibilidades de reducción combinada a partir de una mejora de método, y de las valoraciones que realiza la empresa en relación con el tiempo, el coste y los riesgos asociados.

## Referencias

- [1] Burke, R., "Project management: planning and control", John Wiley & Sons Inc., USA (1993).
- [2] Conde, J.; Rodríguez, M.; "Aplicación del modelo de destilación fraccionada a procesos de mejora multiobjetivo", Adingor, pp. 263-267, Vigo (2002).
- [3] Conde, J., et al., "Maintenance projects evaluation using fully Bayesian approach and logistic distribution", *Safety and Reliability*, Munich-Garching, Germany, 1, pp. 755-759, (1999).
- [4] Conde, J., "Algoritmo de reducción de la duración de proyectos", Working paper, GIO-0798-UCLM, Ciudad Real (1998).
- [5] Kerzner, H., "Project Management. A systems approach to planning, scheduling and controlling", 5ª Ed., ITP, USA (1995).
- [6] Kim, S.Y. y Leachman, R.C., "Multi-project Scheduling with Explicit Lateness Costs", *IIE Transactions*, 25, 34-44, (1993).
- [7] Morton, T.E. y Pentico, D.W., "Heuristic Scheduling Systems", John Wiley & Sons. NY (1993).
- [8] Oguz, O. Y Bala, H., "A comparative study of computational procedures for the resource constrained project scheduling problem", *European Journal of Operations Research*, 72, 406-416 (1994).