



OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE TORNEADO CONSIDERANDO OBJETIVOS MÚLTIPLES

Ramón Quiza Sardiñas
Marcelino Rivas Santana
Jorge E. Albelo Mengana

Optimización del proceso de torneado considerando objetivos múltiples.

Ramón Quiza Sardiñas, Marcelino Rivas Santana, Jorge E. Albelo Mengana

Copyrigh © 2005 Universidad de Matanzas "Camilo Ciefuegos"

Autopista a Varadero, km 3 1/2, Matanzas 44740, Cuba.

<http://www.umcc.cu>

CONTENIDO

Introducción.....	1
Capítulo 1 - Estado del Arte y Características Generales	3
1.1 – Principios básicos de optimización del torneado	3
1.2 – Criterios de optimización.....	4
1.3 – Restricciones	6
1.4 – Métodos de optimización.....	8
Capítulo 2 - Descripción del Método de Optimización Propuesto	10
2.1 – Definición del modelo de optimización.....	10
2.2 – Descripción del algoritmo genético	12
2.3 – Resultados de la optimización y toma de decisiones	15
Capítulo 3 - Ejemplo de Aplicación.....	18
3.1 – Descripción del caso de estudio.....	18
3.2 – Tecnología de fabricación.....	19
3.3 – Resultado del proceso de optimización.....	20
3.4 – Cálculo de los regímenes de corte para cada transición.....	24
3.5 – Comparación de las variantes	28
3.6 – Análisis económico.....	30
3.7 – Toma de decisión.....	31
Conclusiones.....	33
Bibliografías	34

INTRODUCCIÓN

Como una condición indispensable de cualquier proceso productivo que tenga la pretensión de insertarse, con un mínimo de competitividad, en la economía contemporánea actual, debe tener en cuenta la utilización racional de los recursos. Los procesos de corte de metales, dentro de la manufactura moderna, son la regla y no la excepción en este sentido.

Desde el origen del maquinado, se ha estado estudiando científicamente el método para lograr procesos de arranque de virutas que sean cada vez más eficientes, que requieran menores tiempos de elaboración y cuyos costos puedan llegar a límites realmente tan bajos como se pueda.

En análisis minucioso de la literatura especializada, se hace evidente que en la práctica productiva existe una problemática: la selección de regímenes de corte se basa en el uso de tablas o manuales especializados, en los cuales no ofrecen realmente parámetros óptimos sino sólo valores de tanteo [Dereli, Filiz y Baykasoglu, 2001], que no se adecuan siempre a las variadas condiciones de trabajo.

Los métodos y técnicas tradicionales de optimización de procesos de corte toman como función objetivo bien el tiempo de maquinado [Sönmez *et al.*, 1999], asumiendo que éste es proporcional al costo de producción; o bien el propio costo [Saravanan, Asokan y Vijayakumar, 2003; Zuperl y Cus, 2003], pero considerando sólo producciones en serie o masivas, en las cuales las máquinas herramientas están ocupadas todo el tiempo laboral.

Como se conoce, este no siempre es el caso de los talleres de maquinado en la industria cubana (y, generalmente, en los países en vías de desarrollo), en la cual la fabricación se limita, muchas veces, a piezas de

repuesto en pequeñas series o en producciones individuales. Esto provoca que el tiempo de maquinado deje de jugar el papel determinante que le asignan en la mayor parte de la literatura especializada.

Otro factor que perjudica la selección de regímenes de corte adecuados, en la industria nacional, es que los fabricantes de herramientas de corte plantean que el gasto de herramientas es sólo una pequeña fracción del costo total fabricación [Sandvik, 1994], lo cual es razonablemente cierto sólo si el trabajo de la máquina herramienta ocupa toda la jornada laboral, y si los salarios y el precio de la electricidad son altos, comparados con el precio de las herramientas de corte. En caso contrario el costo de la herramienta crece considerablemente en importancia.

En los últimos tiempos, han sido propuestos algunos métodos de que permiten la optimización de varios objetivos simultáneamente, para realizar la toma de decisiones, a posteriori, de los regímenes de corte a utilizar. Entre estos cabe destacar el recientemente propuesto por Quiza [2004].

En esta monografía, se persigue como objetivo plantear un método de optimización multiobjetivo del proceso de torneado, que permita seleccionar, con facilidad, precisión y flexibilidad, los regímenes de corte adecuados a las diferentes condiciones industriales.

CAPÍTULO 1

Estado del Arte y Características Generales de los Procesos de Torneado

El objetivo de este capítulo es ofrecer una panorámica del estado del arte actual en la optimización de regímenes de corte, en el proceso de torneado, destacando sus características generales.

1.1 – Principios básicos de optimización del torneado.

La optimización de los procesos productivos, en general, se puede llevar a cabo en tres niveles básicos [Shaw, 1984]:

1. Establecimiento de mejoras relativas a los actuales métodos de producción.
2. Selección de nuevos métodos de producción con el equipamiento existente.
3. Desarrollo de equipamiento nuevo.

Evidentemente, los niveles 2 y 3 requieren de un esfuerzo y una inversión normalmente grande, por lo que el trabajo del tecnólogo comúnmente se limita al nivel 1, o sea, a la determinación de los parámetros óptimos dentro de un proceso establecido.

En el torneado, como en el resto del mecanizado, los parámetros principales que controlan el proceso, son las variables del régimen de corte: profundidad, avance y revoluciones del husillo. Por tanto, la optimización del mismo se basa en la selección de un régimen de corte que maximice o minimice (según corresponda) uno o varios criterios determinados.

Dada la que la complejidad del proceso de corte, las tareas de optimización se hacen bien difíciles [Kumar y Kumar, 2000]. Además, existen otras causas que afectan el éxito de la optimización del torneado [Sönmez *et al.*, 1999], entre las que se encuentran: la

necesidad de contar con modelos para las variables del proceso (la vida útil de la herramienta, la fuerza de corte, etc.), que permitan establecer relaciones y restricciones cercanas a la realidad; la complejidad de las características de la máquina y de la herramienta de corte, que muchas veces incluyen variables cualitativas o discontinuas; la dificultad en la selección de un criterio efectivo de optimización; y las limitaciones de las técnicas de optimización matemáticas y numéricas.

Todo lo anterior ha provocado que el desarrollo de los métodos de optimización del torneado (y del maquinado, en general), a pesar de la cantidad de investigaciones que le han sido dedicadas, haya sido sorprendentemente lento [Wang *et al.*, 2002].

1.2 – Criterios de optimización.

La selección del criterio de optimización (o sea, de la función objetivo a optimizar), es, quizás, el punto más importante en cualquier estudio sobre el tema. Tradicionalmente, el criterio utilizado, se ha basado en el costo de la producción. En este sentido se enfocan desde el primer trabajo conocido sobre optimización [Taylor, 1907], hasta investigaciones muy recientes [Liang, Mgwatu y Zuo, 2001; Wang *et al.*, 2002; Saravanam, Asokan y Vijayakumar, 2003; Cus y Balic, 2003].

La expresión de costo utilizada varía ligeramente de un autor a otro. Shaw [1984] considera el costo por pieza (Z) como la suma de tres costos básicos: costo directo de la máquina y el trabajo (z_0), el costo por cambio de la herramienta (z_cH) y el costo de herramienta (z_T) para cada pieza. Este mismo criterio utilizan Kayakan *et al.* [1996]; Meng, Arsecularatne y Mathew [2000]; Amiolemhen y Ibhádode [2004] y Saravanan, Asokan y Vijayakumar [2003], aunque estos últimos introducen una pequeña modificación sin trascendencia.

Bhaskara Reddy, Shunmugam y Narendran [1998] minimizan el costo total de elaboración, en operaciones de pasadas múltiples, mediante la minimización del costo de

cada pasada. La principal limitante de esta expresión es que considera que el tiempo de trabajo de la máquina es igual al tiempo de maquinado, lo cual es cierto sólo para operaciones de una pasada. Para solucionar esta dificultad, Wang *et al.* [2002] diferencian entre el tiempo de maquinado y tiempo de trabajo de la máquina.

Si bien la efectividad de este criterio, desde el punto de vista económico es indiscutible, el enfoque que se le da en la literatura consultada, no es completamente satisfactorio, según criterio del autor de esta tesis. Esto se debe a que las expresiones para el cálculo del costo de cada pieza elaborada, están deducidas considerando un flujo continuo en la producción, lo cual no siempre corresponde a la práctica industrial real.

Otro criterio de optimización que comúnmente se utiliza, es el tiempo de elaboración [Chua *et al.*, 1991; Ahmad y Anwarul, 2001; Quiza y Rivas, 2003], que se basa en el presupuesto de que el costo de herramienta es despreciable frente al monto total [Sandvik, 1994]. El tiempo de elaboración se asume igual o proporcional al tiempo de maquinado. Como se puede apreciar, el enfoque anterior desprecia el tiempo de cambio de la herramienta, y el de trabajo en vacío.

Algunas veces, se emplea como función objetivo la cantidad de metal cortado por unidad de tiempo (*material removal rate*), que no es más que otra forma de considerar el tiempo de elaboración. Entre los trabajos que utilizan este criterio están el de Chien y Tsai [2003] y el de Ko y Kim [1998].

Además, si bien la consideración de que el costo de herramienta es despreciable, está justificado en las condiciones de la industria de los países industrializados, para los países en vías de desarrollo deja de tener validez absoluta [Quiza y Rivas, 2004].

Algunos autores ofrecen modelos que permiten considerar varios objetivos, aunque no de forma simultánea. En este grupo se encuentran el de Cakir y Gurarda [1998] y el de Lee y Tarng [2000] que posibilitan la optimización bien del costo de producción o bien de la cantidad de metal cortado producción.

Una solución a la sobrevaloración de uno de los criterios de optimización es emplear múltiples objetivos. Esta es una tendencia que gana terreno en la actualidad [Zuperl y Cus, 2003; Cus y Balic, 2003; Quiza y Rivas, 2004].

No obstante, el enfoque de optimización que a predominado a sido *a priori*, que se basa en la integración de los diversos objetivos en una única función, generalmente mediante una adecuada ponderación ofrecida por expertos. En este sentido están orientados los trabajos de Cus y Balic [2003] y de Zuperl y Cus [2003], que utilizan una denominada “función implícita del fabricante”, que integra tres objetivos independientes: tiempo de elaboración, costo de producción y calidad. Este enfoque tiene una limitación, dada por el requerimiento de una valoración previa, casi siempre subjetiva, de la importancia relativa de cada objetivo de optimización.

Croitoru, Severincu y Belous [2001] han desarrollado un método de optimización multiobjetivo, pero éste no se adapta a variables discontinuas y, además, el método de solución es gráfico, lo que hace muy lento y engorroso el proceso de cálculo.

Quiza [2004], propone la optimización multiobjetivo, considerando dos criterios que deben ser simultáneamente minimizados: el tiempo de elaboración y el gasto de herramienta, lo cual parece ser más adecuado a las condiciones de la industria cubana. Este método, además, se basa en el enfoque a posteriori de la toma de decisiones, el cual permite obtener un conjunto de soluciones óptimas para luego, a partir de ellas, seleccionar la que más se ajusta a las condiciones concretas. Una mejora de este enfoque se ofrece en [Quiza *et al.*, 2005].

1.3 – Restricciones.

Un aspecto muy importante dentro de toda optimización es establecer las restricciones adecuadas, las cuales dependen de las características del proceso. En el torneado, se

reporta el uso de varias restricciones que garantizan la factibilidad del régimen seleccionado, en dependencia de las condiciones específicas: máquina, herramienta, material elaborado, etc.

Entre las restricciones utilizadas por casi todos los autores [Chua *et al.*, 1991; Kayakan *et al.*, 1996; Cakir y Gurarda, 1998; Lee y Tarnng, 2000; Ahmad y Anwarul, 2001; Wang *et al.*, 2002; Saravanan, Asokan y Vijayakumar, 2003; Quiza y Rivas, 2003; Quiza y Rivas, 2004] están mantener los parámetros del régimen de corte (profundidad, avance y velocidad de corte) dentro de los rangos admitidos por la herramienta.

Otra restricción que hay que tener en cuenta, en pasadas de desbaste, es que la fuerza y la potencia de corte no superen los valores máximos admisible por la máquina - herramienta [Chua *et al.*, 1991; Cakir y Gurarda, 1998; Ko y Kim, 1998; Saravanan, Asokan y Vijayakumar, 2003; Kayakan *et al.*, 1996; Meng, Arsecularatne y Mathew, 2000; Lee y Tarnng, 2000; Ahmad y Anwarul, 2001; Wang *et al.*, 2002; Quiza y Rivas, 2003; Quiza y Rivas, 2004].

Para pasadas de acabado, es importante considerar que la rugosidad superficial (R) no supere a la establecida en los requisitos técnicos de la superficie elaborada [Cakir y Gurarda, 1998; Ko y Kim, 1998; Lee y Tarnng, 2000; Saravanan, Asokan y Vijayakumar, 2003; Wang *et al.*, 2002]:

Una restricción adicional propuesta por Saravanan, Asokan y Vijayakumar [2003], que presenta cierto interés, es que la temperatura en la zona de corte no supere cierto valor admisible. Sin embargo en el trabajo citado no se señala como seleccionar esta temperatura. Alfonso [2002], para el torneado de aceros templados, plantea que esta temperatura debe ser la de recristalización del material elaborado. Alfonso propone utilizar, en lugar de la temperatura, la termo-fem, que es linealmente proporcional a esta.

Adicionalmente, Nefiodov y Osipov [1980], plantean que la herramienta utilizada, bajo las condiciones de trabajo seleccionadas, deben cumplir las condiciones de resistencia y rigidez.

1.4 – Métodos de optimización.

Para la optimización de regímenes de corte en el torneado, se han empleado diversos métodos. El primero, muy difundido por su relativa sencillez y su claro significado matemático, es el analítico, que se basa en el uso de las derivadas de la función objetivo. Utilizado por primera vez por Taylor [1907] para determinar la velocidad de corte óptima en operaciones de una sola pasada, este método es ampliamente descrito en libros y manuales [Shaw, 1984; Sandvik, 1994] y aún se mantiene en uso [Kayakan *et al.*, 1996; Wang *et al.*, 2002].

La principal limitación del método analítico es su dificultad al aplicarlo al régimen de corte, donde la función objetivo no siempre es derivable y, frecuentemente, incluye variables discretas o discontinuas. Aunque se han hecho intentos para solucionar esta dificultad [Shaw, 1984], los resultados conducen a expresiones muy complejas y de validez muy discutible.

La programación dinámica y la programación geométrica también han sido aplicadas a la optimización de regímenes de corte [Chua *et al.*, 1991; Cakir y Gurarda, 1998; Dereli y Filiz, 1999; Lee y Tarng, 2000]. Estas técnicas ofrecen buenos resultados en sistemas no lineales, pero cuando el número de parámetros involucrados se hace grande, el esfuerzo computacional que requieren los hace impracticables.

También el método robusto de Tagushi [Nian, Yang y Tarng, 1999] y el algoritmo de hormiguero (ant colony algorithm) [Vijayakumar *et al.*, 2003] han sido empleado para la selección de regímenes de corte óptimos en el torneado, con cierto éxito.

En los últimos años, se ha incrementado el uso de algoritmos evolutivos en los problemas optimización [Kurpati, Azarm y Wu, 2002]. Dentro de estas técnicas, los algoritmos genéticos (AG's) son la estrella indiscutible [Herreros, 2000].

Varios autores han reportado el empleo de AG's para la selección de regímenes de corte óptimos en el torneado [Bhaskara Reddy, Shunmugam y Narendran, 1998; Ahmad y Anwarul, 2001; António y Davim, 2002; Cus y Balic, 2003; Quiza y Rivas, 2003; Amiolemhen y Ibhadode, 2004]. Saravanan, Asokan y Vijayakumar [2003] proponen un método basado en AG's para la optimización del torneado, y comparan los resultados con los ofrecidos por un método basado en la cristalización simulada (*simulated annealing*), propuesto en el mismo artículo. La eficacia reportada para ambos métodos es similar.

Chien y Tsai [2003] no sólo emplean un AG para optimizar el régimen de corte, sino que seleccionan los parámetros más convenientes para el GA, mediante el método de Tagushi.

Todos estos trabajos están dirigidos a la optimización de un sólo objetivo. Quiza y Rivas [2004], por el contrario, utilizan los AG's para la optimización multiobjetivo mediante la técnica min-max. Si bien los resultados ofrecidos, son satisfactorios, la técnica empleada es ineficiente, ya que necesita una corrida del programa para cada punto de la frontera de Pareto obtenida. Una versión posterior de este algoritmo [Quiza, 2004; Quiza *et al.*, 2005], utiliza un microalgoritmo genético que soluciona la limitación anterior. La principal limitación del trabajo anterior es que la optimización se realiza para una sola pasada. En cambio, el enfoque de Cus y Balic [2003], que considera la optimización para todo el volumen de material a eliminar es más eficaz, aunque no constituye la solución definitiva del problema.

CAPÍTULO 2

Descripción del Método de Optimización Propuesto

El objetivo de este capítulo es describir el método de optimización que se utilizará para seleccionar el régimen de corte en el caso de estudio que se analizará.

2.1 – Definición del modelo de optimización.

2.1.1 - Variables de decisión.

Dentro del problema considerado, las variables de decisión son los parámetros del régimen de corte: la profundidad, a ; el avance, f y la velocidad de corte, v . El problema consistirá, entonces, en determinar aquellos valores de estas variables de decisión, para que las funciones objetivos alcancen sus valores mínimos.

2.1.2 – Funciones objetivos.

Las funciones objetivos a utilizar en el método propuesto son, tal como se deduce de las conclusiones del capítulo anterior, el tiempo de maquinado y el consumo de herramientas. El primero se determina por la expresión:

$$t = t_0 + \left(1 + \frac{t_{CH}}{T}\right) \cdot t_M ; \quad (2.1)$$

donde t es el tiempo total de elaboración; t_0 , la suma de todos los tiempos auxiliares; t_{CH} , el tiempo de cambio de la herramienta; t_M , el tiempo de maquinado; y T la vida útil de un filo de la herramienta. Para relacionar la vida útil de la herramienta con los parámetros del régimen de corte, se emplea la conocida expresión de Taylor [Shaw, 1984]:

$$T = C_T \cdot v^a \cdot f^b \cdot a^g ; \quad (2.2)$$

donde C_T , es la constante de la expresión y a , b y g , los exponentes; todos ellos determinados estadísticamente a partir de datos experimentales.

El tiempo de maquinado, por su parte, se determina como:

$$t_M = \frac{V}{M}; \quad (2.3)$$

donde V es el volumen de material a cortar y M , la velocidad de remoción, que depende de los parámetros del régimen de corte: profundidad, a ; avance, f y velocidad, v :

$$M = 1000 \cdot a \cdot f \cdot v. \quad (2.4)$$

Por otro lado, el consumo de herramienta, x , se determina como:

$$x = \frac{t_M}{T}; \quad (2.5)$$

y, para comodidad del análisis, se ofrece en porciento.

2.1.3 – Restricciones.

En el método de optimización utilizado se tienen en cuenta las siguientes restricciones:

1. Que los parámetros del régimen de corte, no supere los rangos admisibles establecidos por el fabricante para la herramienta:

$$a_{MIN} \leq a \leq a_{MAX}; \quad (2.6)$$

$$f_{MIN} \leq f \leq f_{MAX}; \quad (2.7)$$

$$v_{MIN} \leq v \leq v_{MAX}. \quad (2.8)$$

2. Que la fuerza de corte, F_C , no supere el máximo valor admisible por la máquina y la herramienta, F_{C-MAX} :

$$F_C \leq F_{C-MAX}. \quad (2.9)$$

La fuerza de corte se calcula mediante la expresión:

$$F_C = h_F \cdot a \cdot f; \quad (2.10)$$

donde h_F , es un coeficiente que depende de las condiciones concretas del maquinado [Sandvik, 1994].

3. Que la potencia de corte P_C , no supere la que puede ofrecer el motor de la máquina herramienta, P_{MOT} , teniendo en cuenta la eficiencia de la transmisión, h .

$$P_C \leq P_{MOT} \cdot h. \quad (2.11)$$

La potencia de corte se determina a partir de:

$$P_C = \frac{F_C \cdot v}{6 \cdot 10^4}. \quad (2.12)$$

2.2 – Descripción del algoritmo genético.

El algoritmo genético utilizado para solucionar el problema es el propuesto por Quiza [2004], que, a su vez, es una modificación del micro-algoritmo genético propuesto por Toscano [2001].

Éste es un algoritmo elitista que cuenta con una técnica para mantener la diversidad de la población. Su principal desventaja es que carece de un mecanismo claro para el tratamiento de restricciones.

Para incluir el tratamiento de restricciones en el algoritmo implementado, se utilizan las mejoras propuestas por Kurpati, Azarn y Wu [2002], que se basan en los siguientes principios:

- En la población dada, las soluciones factibles tienen mejor rango que las no factibles, por lo tanto, tienen más probabilidades de ser seleccionadas para la reproducción.
- La magnitud de la infactibilidad (o sea, cuanto se distancia un individuo de los valores límites establecidos en las restricciones), es un factor importante a tener en cuenta.

- La cantidad de restricciones violadas debe tenerse también en cuenta al manipular las restricciones.

Basándose en los principios anteriores, se establece un coeficiente de infactibilidad para cada individuo, G_i , que se define como:

$$G_i = \frac{\sum_{j=1}^G \max[g_j(\mathbf{x}_i), 0]}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^G \max[g_j(\mathbf{x}_k), 0]}, \quad (2.13)$$

y que permite comparar dos individuos no factibles entre sí. En la expresión (2.33), G es la cantidad de restricciones; N , la cantidad de individuos dentro de la población; $g_i(\mathbf{x}_j)$ la i -ésima restricción evaluada para el j -ésimo individuo.

La utilización de pocos individuos en la población (principio básico de los micro AG's), si bien reduce el costo computacional, no es un enfoque eficaz cuando el problema tiene numerosas restricciones fuertes, que provocan que una parte importante (muchas veces mayoritaria) de la población inicial, esté integrada por individuos no factibles. En este caso tenemos al problema estudiado es este trabajo, la optimización de regímenes de corte en el torneado.

Un aspecto destacado del micro-AG de Toscano es la utilización de una población estática que no varía durante todo el proceso. Esta población estática permite, para cada nueva iteración, agregar a la población un conjunto de individuos “frescos”, a un costo computacional reducido. Naturalmente, esto ayuda a mantener una adecuada diversidad dentro de las soluciones potenciales del problema.

El diagrama de bloques del algoritmo genético propuesto para utilizar en la optimización multiobjetivo se muestra en la Fig. 2.1. El mismo se basa, al igual que el propuesto por Toscano, en el uso simultáneo de dos poblaciones de individuos: una dinámica que va variando según transcurren las iteraciones, Q_i , y otra estática, Q_{EST} , cuyos componentes se

mantienen inalterables durante todo el proceso. Ambas poblaciones se crean, aleatoriamente, a inicio del proceso.

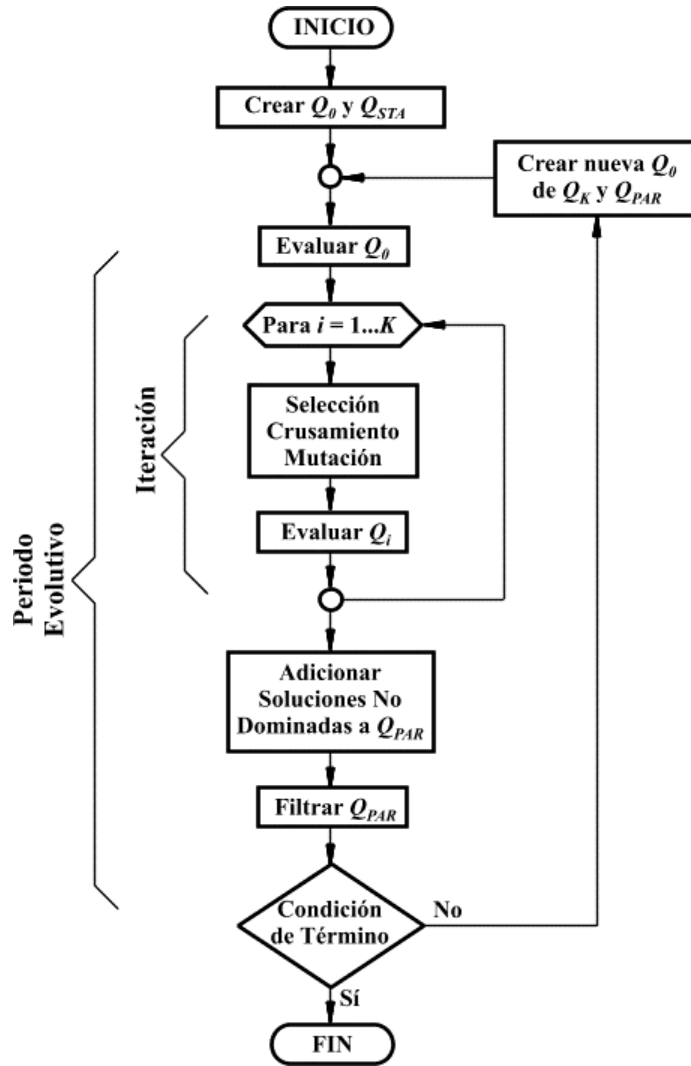


Fig. 2.1 – AG utilizado para la optimización

El tamaño de ambas poblaciones depende de la complejidad del problema, pero en todo caso, la población estática debe ser varias veces mayor que la dinámica, para garantizar una adecuada diversidad en cada generación. Una vez creada la población dinámica inicial, Q_0 , se evalúan las funciones objetivo y las restricciones para cada una de las soluciones que la integran. Para las soluciones no factibles se determina, además, el coeficiente de infactibilidad según (2.13).

Luego, durante un número de K_C de iteraciones, se hace evolucionar la población dinámica hacia, Q_i , la frontera de Pareto, a partir de su población inicial. Esta evolución se produce a través de selección por torneo, cruzamiento y mutación. Una vez concluido este ciclo, se seleccionan los individuos no dominados de la población dinámica, y se agregan a una población élite o paretiana, Q_{PAR} , la cual es filtrada para mantener la dominancia de los individuos que la integran, y su diversidad.

Si aún no se ha alcanzado la condición de término, se crea una nueva población dinámica inicial, a partir de la actual, y de la población estática. Luego, se repite el proceso. A continuación se detallan las características de cada uno de los pasos anteriores en la implementación realizada.

Para una descripción más detallada del algoritmo propuesto, véase [Quiza 2004 y Quiza *et al.*, 2005].

2.3 – Resultados de la optimización y toma de decisiones.

Como resultado de la optimización multiobjetivos, se obtiene el gráfico de Pareto, que contiene todos los individuos no dominados (ver. Fig. 2.5). Todos estos puntos son igualmente óptimos, tal como se explicó en el capítulo 1, pero la conveniencia de utilizar uno u otro, depende de la situación concreta.

Por ejemplo, si el taller considerado está trabajando en condiciones normales, el régimen de corte más conveniente corresponderá a los puntos 3, 4 o 5, donde hay un consumo bajo de la vida útil de la herramienta de corte y, a la vez, el tiempo de elaboración es aceptablemente pequeño. Puede notarse que dichos puntos son los más cercanos al origen de coordenadas.

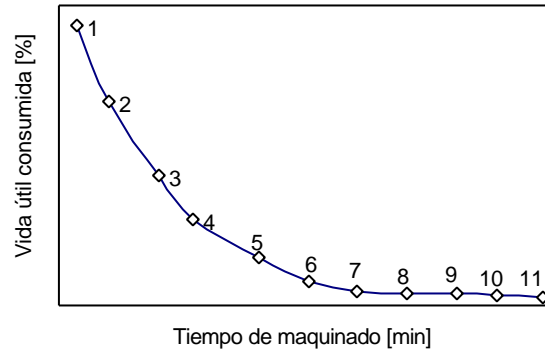


Fig. 2.5 – Gráfico de Pareto con los resultados de la optimización.

Por el contrario, si el taller tiene una producción pequeña o discontinua, que no ocupa todo el tiempo, no hay necesidad de usar bajos tiempos de operación. En estos casos, obtener una vida útil larga es mucho más importante; por tanto, se debe seleccionar el régimen de corte correspondiente a los puntos 10 u 11.

Por último, en condiciones especiales, tales como en tiempo de guerra u otra emergencia, el volumen de producción es el elemento más importante a la hora de seleccionar el régimen de corte. Por tanto, en estas circunstancias, se debe seleccionar el régimen de corte correspondiente a los puntos 1 o 2, el cual garantiza el menor tiempo de maquinado, a pesar de su elevado consumo de herramientas con la consiguiente elevación de los costos.

Finalmente, debe añadirse, que el análisis del gráfico de Pareto no excluye el estudio de los costos, sino que éste puede servir de complemento, ayudando a la toma de decisiones, y dando una mayor fiabilidad a la opción adoptada. En este sentido, es necesario analizar tres costos básicos dentro del proceso: costo de salario, Z_{SAL} ; el costo de herramientas, Z_{HER} ; y el costo de electricidad, Z_{ELE} ; los cuales se determinan como:

$$Z_{SAL} = \frac{z_{SAL} \cdot t}{60}; \quad (2.14)$$

$$Z_{HER} = \frac{z_{HER} \cdot X}{N_{HER}}; \quad (2.15)$$

$$Z_{ELE} = \frac{P_c \cdot t_M}{60} \cdot z_{ELE}; \quad (2.16)$$

donde z_{SAL} es el salario del operario de la máquina por hora; z_{HER} , el costo de la herramienta de corte; N_{HER} , la cantidad de veces que puede reafilarse la herramienta (o la cantidad de filos de una placa, si es una herramienta de cambio rápido); y z_{ELE} es el precio de la electricidad [kW·h].

CAPÍTULO 3

Ejemplo de Aplicación

En este capítulo se muestra la aplicación del método de optimización multiobjetivos al diseño de la tecnología del maquinado, para la operación de torneado, en un caso concreto real, tomado de la práctica industrial.

3.1 – Descripción del Caso de Estudio.

El caso a estudiar es la selección de los regímenes de corte óptimos para las transiciones de cilindrado de la tecnología de fabricación del eje del centro rotacional de la centrífuga continua Silver – ASEA, la cual se repara en la Empresa de Reparaciones de Centrífugas TANACEN, del Ministerio de la Industria Azucarera y dicho eje se fabrica por supuesto en dicha Empresa.

El cilindrado se llevará a cabo en el torno Universal 16K20 ubicado en el Taller de Maquinado de la Empresa anteriormente mencionada y utilizando para el desbaste la cuchilla calzada de aleación dura T5K10, que cuenta con un ángulo de filo $\phi = 45^\circ$, un ángulo de posición del contrafilo $\phi_1 = 4^\circ$, un ángulo de ataque de $\gamma = 0^\circ$, un ángulo de inclinación del filo $\lambda = 0^\circ$, un ángulo de incidencia $\alpha = 4^\circ$, el radio de la punta de la herramienta de corte es de 0,8 mm y las dimensiones del vástago son (25 x 25) mm.

Para las transiciones de semiacabado y acabado se utilizará una cuchilla de placa calzada de aleación dura T15K6 que cuenta con un ángulo de filo $\phi = 90^\circ$, un ángulo de posición del contrafilo $\phi_1 = 6^\circ$, un ángulo de ataque de $\gamma = 10^\circ$, un ángulo de inclinación del filo $\lambda = 5^\circ$, un ángulo libre o de incidencia de $\alpha = 6^\circ$, la geometría de la punta de la herramienta de corte es de 1,2 mm y las dimensiones del vástago son (25 x 25) mm.

3.2 – Tecnología de Fabricación.

Para la elaboración del eje, se estableció la tecnología de fabricación que se muestra en la Tabla 3.1. Por razones de espacio, sólo se muestran las operaciones de torneado, que son las comprendidas dentro de la optimización. Las sobremedidas para las operaciones de semiacabado y acabado se establecieron en 1 y 0,4 mm, respectivamente.

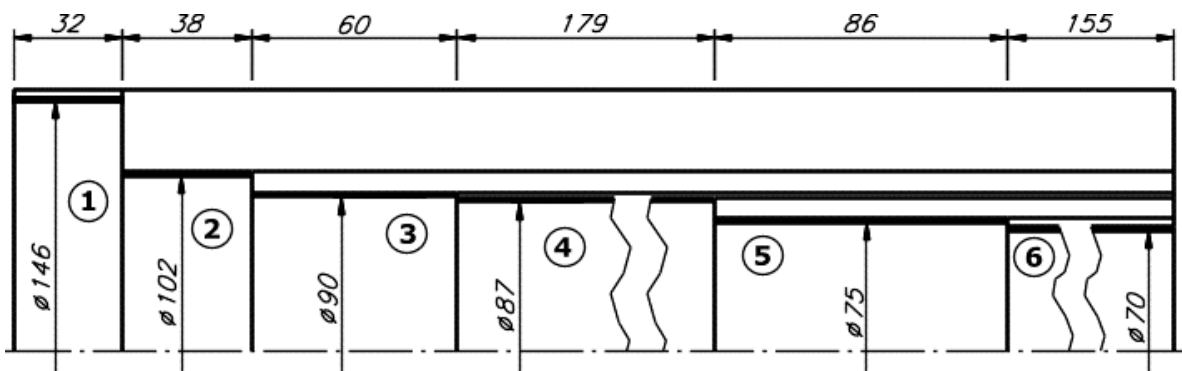


Fig. 3.1 – Dimensiones de los escalones del árbol a elaborar.

Tabla 3.1 Tecnología de fabricación.

005	Torneado.
A ₁	Instalar pieza bruta en plato autocentrante de tres mordazas. Desinstalar.
01	Refrentar cara libre hasta limpiar.
02	Elaborar centro tecnológico.
010	Torneado desbaste.
B ₁	Instalar pieza bruta entre plato y punto. Desinstalar.
01	Cilindrar desbastando desde ø150 hasta ø104,8 por longitud 518 mm.
02	Cilindrar desbastando desde ø 148 hasta el plato.
03	Cilindrar desbastando desde ø 104,8 hasta ø 92,8 por longitud 480 mm.
04	Cilindrar desbastando desde ø 92,8 hasta ø 89 por longitud 415 mm.
05	Cilindrar desbastando desde ø 89 hasta ø 77,8 por longitud 241 mm.
06	Cilindrar desbastando desde ø 77,8 hasta ø 72,8 por longitud 155 mm.
015	Torneado desbaste y semiacabado.
C ₁	Invertir pieza bruta e instalar en plato autocentrante de 3 mordazas, fijar. Desinstalar.
01	Refrentar cara libre hasta obtener longitud de 33 mm.
02	Cilindrar semiacabando desde ø148 hasta ø146.
03	Biselar a 1 x 45° extremo derecho del escalón de ø146.

Tabla 3.1 Tecnología de fabricación (continuación).

020	Torneado de semiacabado y acabado.
D1	Instalar pieza bruta entre puntos y perro de arrastre. Desintalar.
01	Cilindrar semiacabando desde $\phi 104,8$ hasta $\phi 102,8$ por longitud de 38 mm.
02	Cilindrar semiacabando desde $\phi 102,8$ hasta $\phi 90,8$ por longitud de 480 mm.
03	Cilindrar semiacabando desde $\phi 90,8$ hasta $\phi 87$ por longitud de 415 mm.
04	Cilindrar semiacabando desde $\phi 87$ hasta $\phi 75,8$ por longitud de 86 mm.
05	Cilindrar semiacabando desde $\phi 75,8$ hasta $\phi 70,8$ por longitud de 155 mm.
06	Cilindrar acabando desde $\phi 102,8$ hasta $\phi 102$ por longitud de 38 mm.
07	Cilindrar acabando desde $\phi 90,8$ hasta $\phi 90$ por longitud de 60 mm.
08	Cilindrar acabando desde $\phi 75,8$ hasta $\phi 75$ por longitud de 86 mm.
09	Cilindrar acabando desde $\phi 70,8$ hasta $\phi 70$ por longitud de 155 mm.
10	Biselar a $1 \times 45^\circ$ extremo derecho del escalón de $\phi 70$.

Para llevar a cabo el proceso de optimización, el primer paso es calcular los volúmenes a remover en cada una de las operaciones: desbaste, semiacabado y acabado. En la Tabla 3.2 se muestran los volúmenes para cada escalón, y los totales.

Tabla 3.2 – Resultado de los cálculos de los volúmenes.

Escalon	D [mm]	L [mm]	V_{DESB} [mm ³]	V_{SEM} [mm ³]	V_{ACAB} [mm ³]
1	146	32	14979	14778	0
2	102	38	346223	12344	2440
3	90	60	657957	17229	3400
4	87	179	2049612	49486	0
5	75	86	1115107	20642	4063
6	70	155	2100966	34768	6837
Total			6284844	149247	16741

3.3 – Resultado del Proceso de Optimización.

Con los valores de volúmenes de metal a remover, se aplica el algoritmo de optimización anteriormente mostrado, el cual fue implementado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

Desbaste.

Los resultados para la operación de desbaste se muestran en la Tabla 3.3. Como se puede observar, se han obtenido un conjunto de puntos de compromiso entre el tiempo de

elaboración y el consumo de herramientas. A partir de los resultados obtenidos, se construye el gráfico de la frontera de Pareto (ver Fig. 3.2).

Tabla 3.3 – Resultados de la optimización para el desbaste.

No.	a [mm]	f [mm/r]	v [m/min]	t_T [min]	x [%]
1	6.0	0.80	80.0	16.72	75.19
2	6.0	0.80	77.0	17.33	64.57
3	6.0	0.80	72.5	18.36	50.75
4	6.0	0.80	69.1	19.23	41.87
5	6.0	0.80	66.4	20.00	35.64
6	6.0	0.80	64.1	20.69	30.99
7	6.0	0.80	61.3	21.63	25.84
8	6.0	0.80	58.9	22.48	22.06
9	6.0	0.80	56.8	23.28	19.15
10	6.0	0.80	55.0	24.03	16.83
11	6.0	0.80	53.4	24.75	14.93
12	6.0	0.80	51.0	25.90	12.41
13	6.0	0.80	48.4	27.25	10.11
14	6.0	0.80	45.4	29.06	7.79
15	6.0	0.80	43.3	30.47	6.43
16	6.0	0.80	41.2	31.99	5.29
17	6.0	0.80	40.5	32.53	4.95
18	6.0	0.80	40.0	32.94	4.70

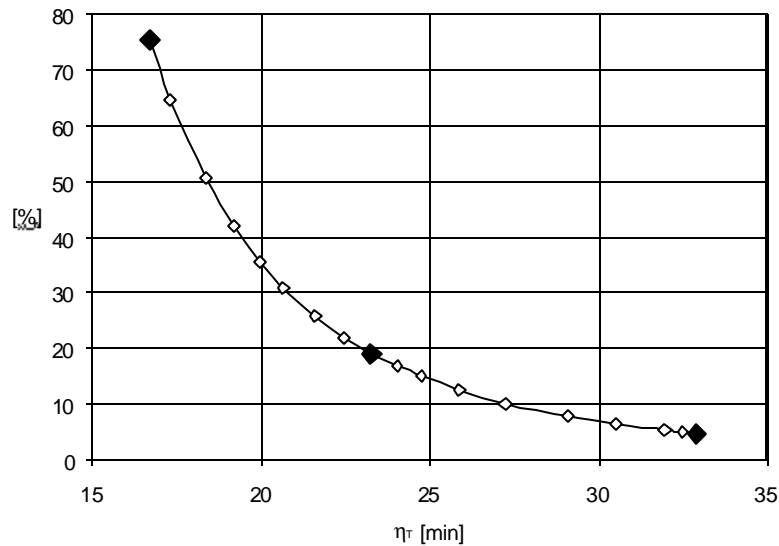


Fig. 3.2 – Representación gráfica de la frontera de Pareto para el desbaste.

Dentro del conjunto de puntos, obtenido como resultado, se toman tres que corresponden a las variantes de mayor productividad (punto 1), la de mayor ahorro de herramienta (punto 18) y una solución de compromiso (punto 5).

Semi acabado.

Para el semi acabado, se obtuvo como resultado los puntos mostrados en la Tabla 3.4. Al igual que en el caso anterior está formado por serie de puntos que corresponden a las diferentes relaciones entre los objetivos de optimización. En la figura 3.3 se muestra la correspondiente gráfica de la frontera de Pareto, construida a partir de los resultados anteriores.

Tabla 3.4 – resultados de la optimización para el semi acabado.

No.	a [mm]	f [mm/r]	v [m/min]	t_T [min]	x [%]
1	1,0	0,35	100,0	4,47	3,72
2	1,0	0,35	97,9	4,56	3,43
3	1,0	0,35	94,0	4,74	2,90
4	1,0	0,35	90,5	4,92	2,49
5	1,0	0,35	87,3	5,09	2,16
6	1,0	0,35	84,4	5,26	1,89
7	1,0	0,35	81,7	5,42	1,66
8	1,0	0,35	79,1	5,59	1,46
9	1,0	0,35	75,4	5,86	1,20
10	1,0	0,35	73,0	6,05	1,06
11	1,0	0,35	70,6	6,24	0,92
12	1,0	0,35	68,2	6,46	0,80
13	1,0	0,35	65,7	6,69	0,69
14	1,0	0,35	63,2	6,95	0,59
15	1,0	0,35	60,4	7,26	0,50
16	1,0	0,35	57,5	7,62	0,41
17	1,0	0,35	54,2	8,07	0,32
18	1,0	0,35	50,2	8,70	0,24
19	1,0	0,35	50,0	8,73	0,23

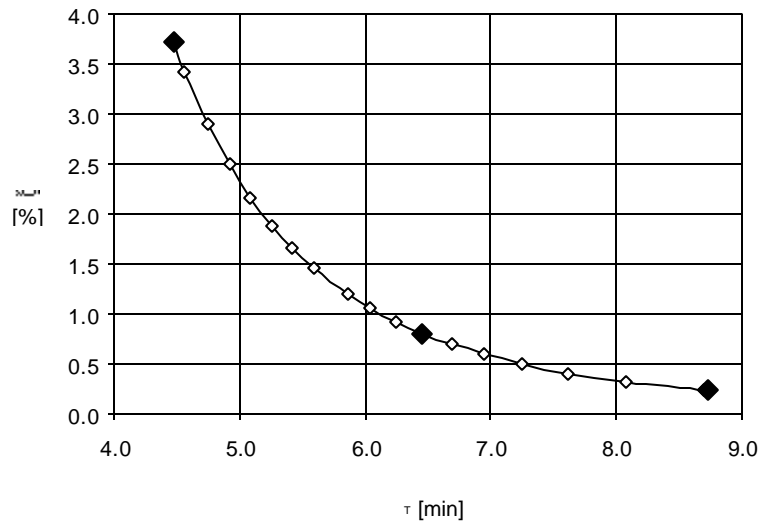


Fig. 3.3 – Representación gráfica de la frontera de Pareto para el semi acabado.

Las tres variantes seleccionadas corresponden a los puntos 1 (máxima productividad), 19 (máximo ahorro de herramienta) y 12 (solución de compromiso).

Acabado.

Los puntos obtenidos como resultado de la optimización para el desbaste, se muestran en la Tabla 3.5. La representación gráfica se ofrece en la Fig. 3.4.

Tabla 3.5 – Resultados de la optimización para el acabado.

No.	a [mm]	f [mm/r]	v [m/min]	t_T [min]	x [%]
1	0,4	0,15	100,0	2,99	0,52
2	0,4	0,15	98,7	3,03	0,49
3	0,4	0,15	96,3	3,10	0,44
4	0,4	0,15	93,0	3,20	0,39
5	0,4	0,15	89,6	3,31	0,33
6	0,4	0,15	86,1	3,44	0,28
7	0,4	0,15	82,4	3,58	0,24
8	0,4	0,15	78,4	3,76	0,20
9	0,4	0,15	73,9	3,98	0,15
10	0,4	0,15	68,4	4,28	0,11
11	0,4	0,15	61,3	4,76	0,07
12	0,4	0,15	50,0	5,78	0,03

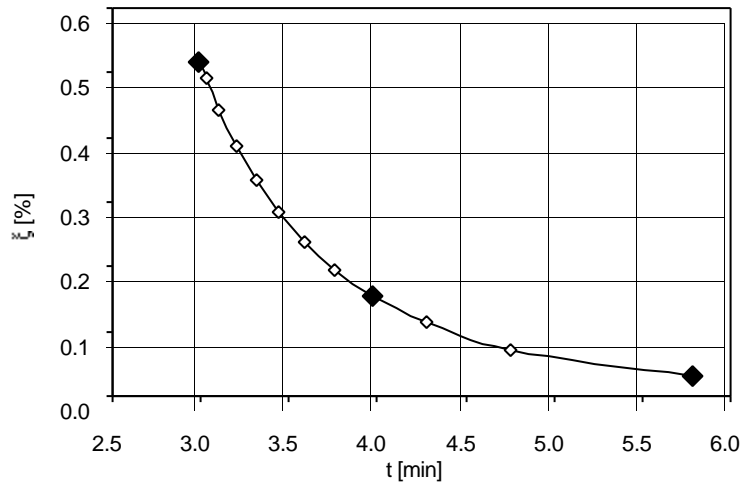


Fig. 3.4 – Representación gráfica de la frontera de Pareto para el acabado.

Para la variante de máxima productividad, se selecciona el punto 1, para el máximo ahorro de herramientas, el punto 12 y para la solución de compromiso, el punto 9.

3.4 – Cálculo de los regímenes de corte para cada transición.

A partir de los datos seleccionados, se calcula el régimen de corte para cada transición, mediante las expresiones de cálculo normalmente utilizadas [González, 1980]. Para ello, se analizan cada una de las transiciones tal como muestra la siguiente figura:

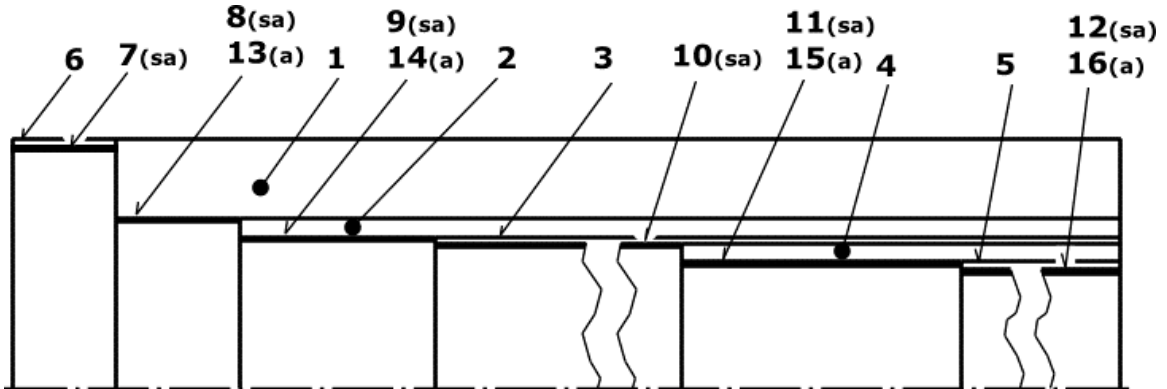


Fig. 3.5 – Transiciones.

Variante de mayor productividad.

En las Tablas 3.6 – 3.8, se muestran los valores de los resultados obtenidos para cada transición, para la variante de mayor productividad (menor tiempo de producción).

Tabla 3.6 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de mayor productividad.

Paso	Tipo	D [mm]	L [mm]	a [mm]	f [mm/min]	v [m/min]
1	D	104,8	518	5,66	0,80	41,2
2	D	92,8	480	6	0,80	36,4
3	D	89	420	1,9	0,80	35,0
4	D	77,8	241	5,6	0,80	30,6
5	D	72,8	155	2,5	0,80	41,2
6	D	148	32	2	0,80	37,2
7	SA	146	32	1	0,35	45,9
8	SA	102,8	38	1	0,35	40,4
9	SA	90,8	60	1	0,35	51,3
10	SA	87	179	1	0,35	49,2
11	SA	75,8	86	1	0,35	47,6
12	SA	70,8	155	1	0,35	44,5
13	A	102	38	0,4	0,15	40,1
14	A	90	60	0,4	0,15	50,9
15	A	75	86	0,4	0,15	47,1
16	A	70	155	0,4	0,15	44,0

Tabla 3.7 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de mayor productividad.

Paso	t_{TOTAL} [min]	x [%]	F_C [N]	P_C [kW]	E [kW·h]
1	20.95	1.99	1121	0.77	0.27
2	4.97	0.26	1210	0.74	0.06
3	4.37	0.08	386	0.22	0.02
4	2.58	0.05	1160	0.59	0.02
5	1.24	0.06	495	0.34	0.01
6	0.68	0.01	402	0.25	0.00
7	1.12	0.01	85	0.06	0.00
8	1.06	0.01	86	0.06	0.00
9	1.13	0.02	83	0.07	0.00
10	3.02	0.06	84	0.07	0.00
11	1.41	0.02	84	0.07	0.00
12	2.39	0.03	85	0.06	0.00
13	2.28	0.00	18	0.01	0.00
14	2.45	0.01	18	0.02	0.00
15	3.08	0.01	18	0.01	0.00
16	5.38	0.01	18	0.01	0.00

Tabla 3.8 – Resultados totales de la tecnología.

Tiempo total de la tecnología [min]	58,14
Consumo de herramienta de desbaste [%]	2,46
Consumo de herramienta de de semiacabado y acabado [%]	0,18
Consumo de energía eléctrica [kW·h]	0,39

Variante de mayor ahorro de herramienta.

En las Tablas 3.9 – 3.11, se muestran los valores de los resultados obtenidos para cada transición, en la variante de mayor ahorro de herramientas.

Tabla 3.9 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de mayor ahorro de herramienta.

Paso	Tipo	D [mm]	L [mm]	a [mm]	f [mm/min]	v [m/min]
1	D	104,8	518	5,66	0,80	82,3
2	D	92,8	480	6,00	0,80	72,9
3	D	89	420	1,90	0,80	69,9
4	D	77,8	241	5,60	0,80	77,0
5	D	72,8	155	2,50	0,80	72,0
6	D	148	32	2,00	0,80	83,7
7	SA	146	32	1,00	0,35	91,7
8	SA	102,8	38	1,00	0,35	101,7

Tabla 3.9 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de mayor ahorro de herramienta (cont.).

Paso	Tipo	D [mm]	L [mm]	a [mm]	f [mm/min]	v [m/min]
9	SA	90,8	60	1,00	0,35	89,9
10	SA	87	179	1,00	0,35	86,1
11	SA	75,8	86	1,00	0,35	95,3
12	SA	70,8	155	1,00	0,35	89,0
13	A	102	38	0,40	0,15	100,9
14	A	90	60	0,40	0,15	89,1
15	A	75	86	0,40	0,15	94,2
16	A	70	155	0,40	0,15	88,0

Tabla 3.10 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de mayor ahorro de herramienta.

Paso	t_{TOTAL} [min]	x [%]	F_C [N]	P_C [kW]	E [kW·h]
1	10,61	31,86	1011	1,4	0,24
2	2,57	4,20	1091	1,3	0,05
3	2,26	1,26	348	0,4	0,01
4	1,12	2,10	1010	1,3	0,02
5	0,77	0,53	455	0,5	0,01
6	0,39	0,36	356	0,5	0,00
7	0,64	0,21	76	0,1	0,00
8	0,51	0,27	75	0,1	0,00
9	0,71	0,22	77	0,1	0,00
10	1,79	0,52	77	0,1	0,00
11	0,78	0,33	76	0,1	0,00
12	1,27	0,42	77	0,1	0,00
13	1,00	0,13	16	0,0	0,00
14	1,46	0,11	16	0,0	0,00
15	1,62	0,16	16	0,0	0,00
16	2,77	0,20	16	0,0	0,00

Tabla 3.11 – Resultados totales de la tecnología.

Tiempo total de la tecnología [min]	30,27
Consumo de herramienta de desbaste [%]	40,31
Consumo de herramienta de de semiacabado y acabado [%]	2,56
Consumo de energía eléctrica [kW·h]	0,35

Variante de compromiso.

En las Tablas 3.12 – 3.13, se muestran los valores de los resultados obtenidos para cada transición, en la variante de compromiso.

Tabla 3.12 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de compromiso.

<i>Paso</i>	<i>Tipo</i>	<i>D [mm]</i>	<i>L [mm]</i>	<i>a [mm]</i>	<i>f [mm/min]</i>	<i>v [m/min]</i>
1	D	104,8	518	2,66	0,80	65,8
2	D	92,8	480	6,00	0,80	58,3
3	D	89,0	420	1,90	0,80	69,9
4	D	77,8	241	2,60	0,80	61,1
5	D	72,8	155	2,50	0,80	57,2
6	D	148,0	32	2,00	0,80	58,1
7	SA	146,0	32	1,00	0,35	57,3
8	SA	102,8	38	1,00	0,35	80,7
9	SA	90,8	60	1,00	0,35	71,3
10	SA	87,0	179	1,00	0,35	86,1
11	SA	75,8	86	1,00	0,35	75,0
12	SA	70,8	155	1,00	0,35	70,1
13	A	102,0	38	0,40	0,15	80,1
14	A	90,0	60	0,40	0,15	89,1
15	A	75,0	86	0,40	0,15	94,2
16	A	70,0	155	0,40	0,15	88,0

Tabla 3.13 – Regímenes de corte para cada transición en la variante de compromiso.

<i>Paso</i>	<i>t_{TOTAL} [min]</i>	<i>x [%]</i>	<i>F_C [N]</i>	<i>P_C [kW]</i>	<i>E [kW·h]</i>
1	13,16	7,41	491	0,5	0,12
2	3,17	1,72	1128	1,1	0,06
3	2,26	1,26	348	0,4	0,01
4	1,37	0,47	485	0,5	0,01
5	0,94	0,21	471	0,4	0,01
6	0,49	0,08	376	0,4	0,00
7	0,93	0,03	82	0,1	0,00
8	0,61	0,11	78	0,1	0,00
9	0,86	0,09	79	0,1	0,00
10	1,79	0,52	77	0,1	0,00
11	0,95	0,13	79	0,1	0,00
12	1,57	0,16	80	0,1	0,00
13	1,22	0,05	17	0,0	0,00
14	1,46	0,11	16	0,0	0,00
15	1,62	0,16	16	0,0	0,00
16	2,77	0,20	16	0,0	0,00

Tabla 3.11 – Resultados totales de la tecnología.

Tiempo total de la tecnología [min]	35,16
Consumo de herramienta de desbaste [%]	11,15
Consumo de herramienta de de semiacabado y acabado [%]	1,55
Consumo de energía eléctrica [kW·h]	0,22

3.5 – Comparación de las variantes.

En la tabla 3.11 se muestran los principales parámetros de la tecnología, considerada para las tres variantes analizadas.

Tabla 3.12 – Parámetros generales de la tecnología.

Variante	Tiempo de Producción total [min]	Consumo total de herramientas [%]		Consumo de Electricidad [kW·h]
		Desbaste	Acabado	
Mayor productividad	30,27	40,31	2,56	0,35
Mayor ahorro de herramientas	58,14	2,46	0,18	0,39
Compromiso	35,16	11,15	1,55	0,22

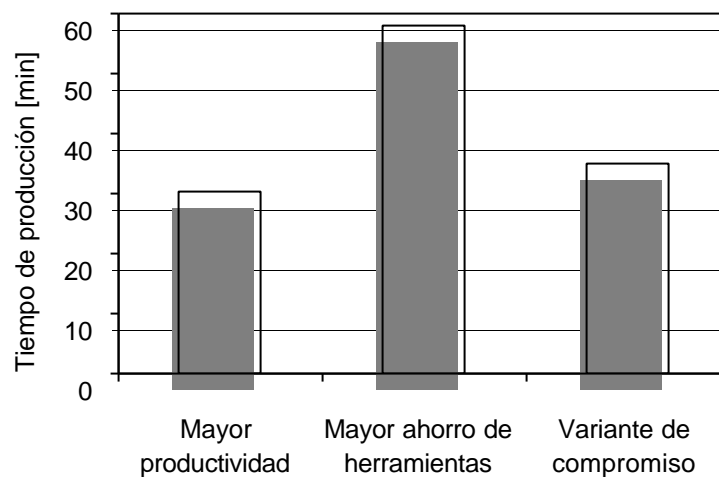


Fig. 3.6 – Comparación gráfica del tiempo total de elaboración para las tres variantes consideradas.

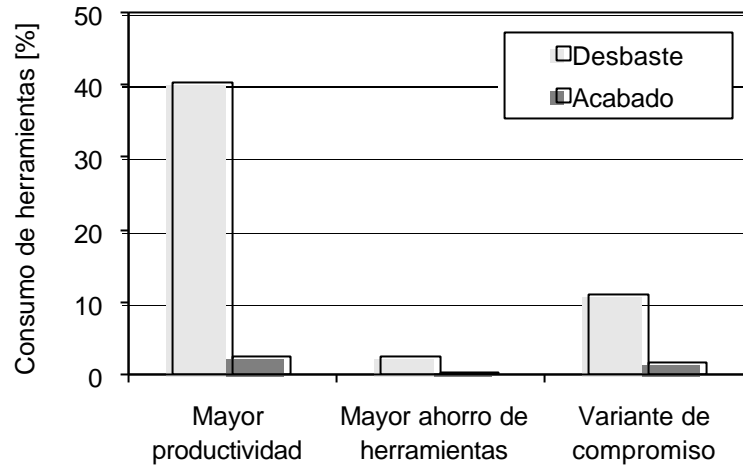


Fig. 3.7 – Comparación gráfica del consumo de herramientas para las tres variantes consideradas.

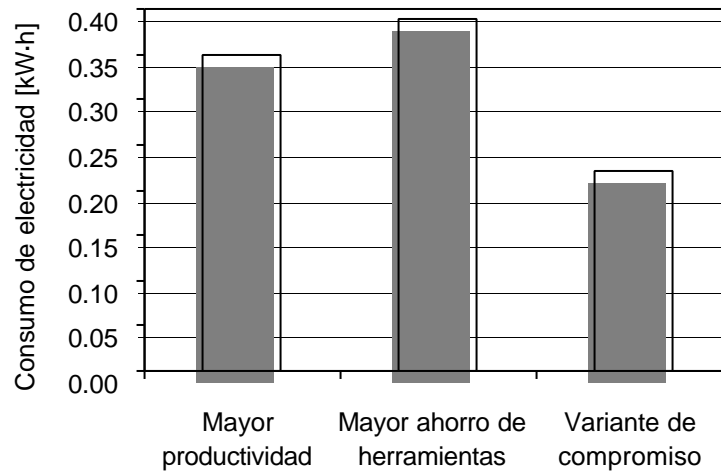


Fig. 3.8 – Comparación gráfica del consumo de electricidad para las tres variantes consideradas.

Como se puede observar en las figuras 3.6 – 3.8, la diferencia en el tiempo de elaboración total, entre las variantes es notable. La variante de mayor productividad consume casi la mitad del tiempo que la de mayor ahorro de herramientas. En cambio, consume más de diez veces la cantidad de herramientas. La diferencia en el consumo de energía eléctrica entre las variantes, no es tan marcado.

3.6 – Análisis económico.

El análisis económico aporta gran cantidad de información para la toma de decisiones, por lo cual fue realizado para las tres variantes propuestas. En cada caso, el costo total de la operación se puede considerar como la suma de tres costos básicos: el costo de salario, Z_{SAL} ; el costo de herramientas, Z_{HER} ; y el costo de energía eléctrica, Z_{ELE} .

El costo de salario se puede determinar como el tiempo total de trabajo, por el salario del operario z_{SAL} :

$$Z_{SAL} = z_{SAL} \cdot t_{TOT} \cdot \quad (3.1)$$

El costo de herramientas, a su vez, se determina como el consumo de herramientas por el costo de cada filo de la herramienta (si es de cambio rápido) o el de toda la herramienta, considerando la cantidad de veces que puede ser afilada (si es de placa calzada):

$$Z_{HER} = z_{HER-DESB} \cdot x_{DESB} + z_{HER-ACAB} \cdot x_{ACAB} \cdot \quad (3.2)$$

Finalmente, el costo de energía eléctrica se calcula como el precio de la misma, z_{ELE} , por el consumo:

$$Z_{ELE} = E \cdot z_{ELE} \cdot \quad (3.3)$$

En el caso de estudio, el salario del operario es 1,33 CUP/h; el costo de la cuchilla utilizada para el desbaste es de 5,13 CUP, y para el acabado 6,7025 CUP (ambas se afilan 15 veces como promedio, durante su período de uso); el precio de la electricidad es de 0,068 CUP/(kW·h). Con estos datos se determinó el costo de cada variante, tal como se muestra en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13 – Costos de las tres variantes consideradas.

Costo salario	Costo de herramientas	Costo de electricidad	Costo total
\$0.67	\$0.15	\$0.02	\$0.84
\$0.78	\$0.05	\$0.01	\$0.84
\$1.29	\$0.01	\$0.03	\$1.32

Como se puede observar, en la figura 3.9, los costos son prácticamente iguales en las variantes de mayor productividad y de compromiso. Por su parte, en la variante de mayor ahorro de herramienta, el costo total es notablemente mayor que en las dos anteriores.

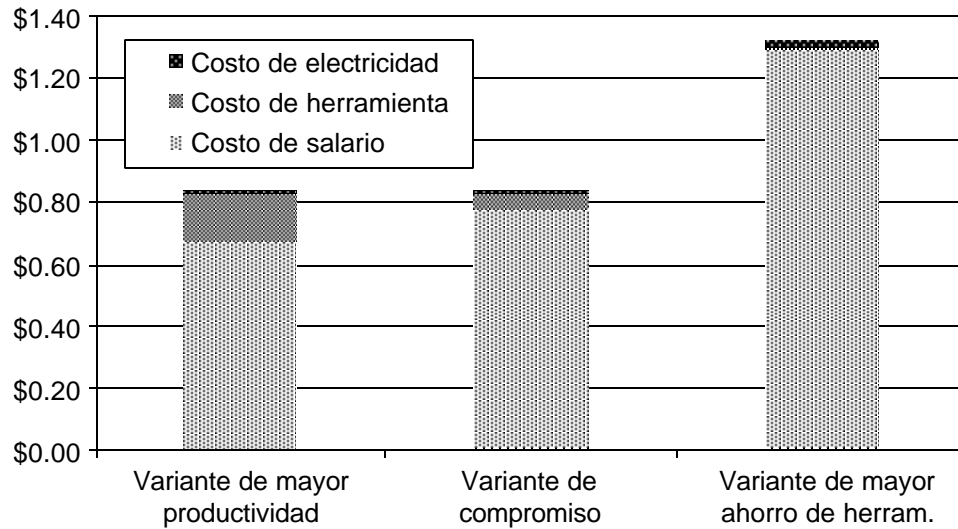


Fig. 3.9 – Gráfico de costos de las tres variantes consideradas.

3.7 – Toma de decisión.

Dadas las tres variantes y sus respectivos parámetros tecnológicos y costos, la decisión debe basarse en las condiciones concretas del taller donde se vaya a realizar la producción.

Por ejemplo, si el taller considerado está trabajando en condiciones normales, el régimen de corte más conveniente corresponderá la variante de menos costo, que en este caso pudiera ser la de mayor productividad o la de compromiso. Por el contrario, si el taller tiene una producción pequeña o discontinua, que no ocupa todo el tiempo, no hay necesidad de usar bajos tiempos de operación. En estos casos, obtener una vida útil larga es mucho más importante; por tanto, se debe seleccionar la variante de mayor ahorro de herramientas.

Por último, en condiciones especiales, tales como en tiempo de guerra u otra emergencia, el volumen de producción es el elemento más importante a la hora de seleccionar el régimen de corte. Por tanto, en estas circunstancias, se debe seleccionar la variante de mayor productividad, independientemente de sus costos. No obstante, en el caso estudiado, esta variante posee costos muy bajos.

En el caso de estudio, teniendo en cuenta las condiciones del taller donde se producirán las piezas, y considerando que las variantes de mayor productividad y de compromiso tienen el mismo costo, se selecciona la primera variante, que permite elevar al máximo el límite de producción.

CONCLUSIONES

Como se pudo ver, para la toma de decisiones desde el enfoque a *posteriori*, el esquema propuesto de optimización permite considerar dos objetivos que son mutuamente conflictivos y a su vez diferentes: el consumo de herramientas y el tiempo de elaboración de la pieza, a la vez que tiene en cuenta también el consumo energético.

Por su parte, el gráfico de Pareto que se presentó como resultado de la optimización, permitió tomar decisiones con relativa facilidad y teniendo en cuenta las diversas condiciones que se pueden presentar en la industria.

A partir de las variantes consideradas, se seleccionaron los regímenes de corte más convenientes para las condiciones concretas del caso de estudio considerado, demostrando tanta efectividad y mayor flexibilidad que los métodos de optimización tradicionales basados en un solo objetivo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ahmad, N. y Anwarul Haque, A.F.M., 2001, "Optimization of process planning parameters for rotational components by genetic algorithms" [online], *4th Int. Conference on Mechanical Engineering*, Dhaka (Bangladesh), Vol. VII, pp. 227 - 233, [citado: 6-nov-2003], disponible en Internet en: <http://www.buet.ac.bd/ipe/nafis/cv.pdf>.
2. Alfonso, E., 2002, "Apuntes sobre la interrelación composición – microestructura – propiedades del acero". *Monografías 2002* [cd-rom]. Matanzas: Universidad de Matanzas. ISBN 959-16-0188-3.
3. Amiolemhen, E. y Ibhadode, A.O.A., 2004, "Application of genetic algorithms determination of the optimal machining parameters in the conversion of a cylindrical bar stock into a continuous finished profile", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44 (12 - 13), pp. 1403 - 1412.
4. António, C.A.C. y Davim, P.J., 2002, "Optimal cutting conditions in turning of particulate metal matrix composites based on experiment and a genetic search model", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 33 (2), pp. 213 - 219.
5. Bhaskara Reddy, S.V.; Shunmugam, M.S. y Narendran, T.T., 1998, "Optimal subdivision of the depth of cut to achieve minimum production cost in multi-pass turning using a genetic algorithm", *Journal of Materials Processing Technology* 79 (1 - 3), pp. 101 - 108.
6. Cakir, M.C. y Gurarda, A., 1998, "Optimization and graphical representation of machining conditions in multi-pass turning operations", *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 11 (3), pp. 157 - 170.
7. Chien, W.T. y Tsai, C.S., 2003, "The investigation on the prediction of tool wear and the determination of optimum cutting conditions in machining 17-4PH

- stainless steel”, *Journal of Material Processing Technology* 140 (1 - 3), pp. 340 - 345.
8. Chua, M.S.; Loh, H.T.; Wong, Y.S. y Rahman, M., 1991, “Optimization of cutting conditions for multi-pass turning operations using sequential quadratic programming”, *Journal of Materials Processing Technology* 28 (1 - 2), pp. 253 - 262.
 9. Croitoru, C.; Severincu, M. y Belous, V., 2001, "A solution for the multi-criteria optimisation of the cutting process" [online], *Buletinul Institutului Politehnic din Isai XLVII (LI)*, pp. 83 – 90, [citado: 5-mar-2002], disponible en Internet en <<http://athena.mt.tuiasi.ro/icms/papers/2k1014.pdf>>.
 10. Cus, F.; Balic, J., 2003, “Optimization of cutting process by GA approach”, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 19, pp. 113 - 121.
 11. Dereli, T.; Filiz, I.H. y Baykasoglu, A., 2001, “Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms”, *International Journal of Production Research* 39 (15), pp. 3303 - 3328.
 12. Kayacan, M.C.; Filiz, I.H.; Sönmez, A.I.; Baykasoglu, A. y Dereli, T., 1996, “OPPS-ROT: An optimised process planning system for rotational parts”, *Computers in Industry* 32, pp. 181 - 195.
 13. Ko, T.J. y Kim, H.S., 1998, “Autonomous cutting parameter regulation using adaptive modeling and genetic algorithms”, *Precision Engineering* 22 (4), pp. 243 - 251.
 14. Kurpati, A.; Azarm, S. y Wu, J., 2002, “Constraint handling improvement for multiobjective genetic algorithms”, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 23, pp. 204 - 213.

15. Kumar Jain, R. y Kumar Jain, V., 2000, "Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural networks", *Journal of Material Processing Technology* 108, pp. 62 - 67.
16. Herreros, A., 2000, *Diseño de controladores robustos multiobjetivo por medio de algoritmos genéticos* [online], Tesis Doctoral, Valladolid (España): Universidad de Valladolid, [citado: 7-jun-2003], disponible en Internet en <http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/herreros_thesis.ps.gz>.
17. Lee, B.Y. y Tarn, Y.S., 2000, "Cutting-parameter selection for maximizing production rate or minimizing production cost in multistage turning operations", *Journal of Materials Processing Technology* 105 (1 - 2), pp. 61 - 66.
18. Liang, M.; Mgwatu, M. y Zuo, M., 2001, "Integration of cutting parameter selection and tool adjustment decisions for multipass turning", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17, pp. 861 - 869.
19. Meng, Q; Arsecularatne, J. A. y Mathew, P., 2000, "Calculation of optimum cutting conditions for turning operations using a machining theory", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (12), pp. 1709 - 1733.
20. Nefiódov, N. y Osípov, K., 1980, *Problemas y ejemplos de corte de metales y herramientas cortantes*, Moscú: Editorial Mir.
21. Nian, C.Y.; Yang, W.S. y Tarn, Y.S., 1999, "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics", *Journal of Materials Processing Technology* 95 (1 - 3), pp. 90 - 96.
22. Quiza, R., 2004, *Optimización multiobjetivos del proceso de torneado*, Tesis Doctoral, Matanzas (Cuba): Universidad de Matanzas.
23. Quiza, R. y Rivas, M., 2003, "Optimización del proceso de torneado mediante un método basado en algoritmos genéticos", *8va Convención Internacional de*

- las Industrias Metalúrgica, Mecánica y del Reciclaje METANICA'2003 [cd-rom], La Habana, ISSN 1607-6281.
24. Quiza, R. y Rivas, M., 2004, "Selección de regímenes de corte para el torneado a través de optimización multiobjetivo", aceptado para publicación en *Centroazúcar*.
 25. Quiza, R.; Rivas, M.; Alfonso, E., 2005, "Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Article in press.
 26. Sandvik, 1994, *El mecanizado moderno - manual práctico*, 1ra Edición, Sandviken (Suecia): Sandvik Coromant, Dpto. de Ediciones Técnicas, ISBN 91-972299-2-X.
 27. Saravanan, R.; Asokan, P. y Vijayakumar, K., 2003, "Machining parameters optimisation for turning cylindrical stock into a continuous finished profile using genetic algorithm (GA) and simulated annealing (SA)", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21, pp. 1 - 9.
 28. Shaw, M.C., 1984, *Metal cutting principles - Oxford series in advanced manufacturing*, Oxford (UK): Oxford University Press, ISBN 0-19-859002-4.
 29. Sönmez, A.I.; Baykasoglu, A.; Dereli, T. y Filiz, I.H., 1999, "Dynamic optimization of multipass milling operation via geometric programming", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39, pp. 287 - 320.
 30. Taylor, F.W., 1907, "On the art of cutting metals", *Transactions of the ASME* 28, pp. 310 - 350.
 31. Toscano, G., 2001, *Optimización multiobjetivo usando un micro algoritmo genético* [online], Veracruz (México): Universidad Veracruzana, [citado: 23-oct-2003], disponible en Internet en <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/tesis/tesis_toscano.ps.gz>

32. Vijayakumar, K.; Prabhakaran, G.; Asokan, P. y Saravanan, R., 2003, "Optimization of multi-pass turning operations using ant colony system", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43 (15), pp. 1633 - 1639.
33. Wang, J.; Kuriyagawa, T.; Wei, X.P. y Gou, G.M., 2002, "Optimization of cutting conditions using a deterministic approach", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42, pp. 1023 - 1033.
34. Zuperl, U. y Cus, F., 2003, "Optimization of cutting conditions during cutting by using neural networks", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 19, pp. 189 - 199.