

# Diseño óptimo multiobjetivo de procesos de maquinado

J. Kowalski \*, C. Díaz P. \*\*

\*Ostroroga 35, 60-349 Poznan, Polonia.

Tel: 0048 (61) 8671392

\*\* Instituto Tecnológico Universidad Católica de la Santísima Concepción

Colón 2466, Talcahuano, Chile.

Tel: 56 41 580767.

email: [jt@david.ucsc.cl](mailto:jt@david.ucsc.cl)

[chjdiazp@entelchile.net](mailto:chjdiazp@entelchile.net)

(Ponencia recibida para ser presentada en el 2º Congreso Cubano de Ingeniería Mecánica, ISPJAE, Ciudad de la Habana, Septiembre 2000)

## Resumen

En el presente artículo se muestra la implementación del análisis de tendencia, como tecnología predictiva, a través de la estadística matemática y su utilización en mediciones de parámetros de diagnóstico tanto espectral como de nivel total. El empleo de esta tecnología resulta de gran importancia debido a que permite pronosticar el momento de fallo, según el comportamiento de los niveles de los parámetros medidos, lo cual facilita la gestión del mantenimiento.

**Palabras claves:** Diseño óptimo, optimización multiobjetivo, procesos de maquinado.

## 1. Introducción

La polioptimización paramétrica de procesos de maquinado simple y múltiple ha sido dominada todavía por un enfoque doble objetivo. Abarca dos criterios clásicos tales como: tiempo unitario y costo unitario [3, 4, 9, 11, 13]. Fenton y Joseph [2] han aplicado un enfoque triple objetivo abordando capacidad de corte, costo unitario y ganancia unitaria.

En América Latina, el conocimiento de la optimización multiobjetivo de procesos de maquinado parece escaso [1]. A esta realidad, se sobrepone falta de interés institucional [8].

El objetivo del trabajo es presentar el método del diseño óptimo cuádruple objetivo de procesos de maquinado simple y múltiple, basándose en el costo unitario, tiempo unitario, potencia útil y ganancia unitaria. Se ofrece a la comercialización por las pequeñas y medianas empresas con el fin de aumentar su competitividad y productividad. Los procedimientos detallados se encuentran en [7].

## 2. El modelo procedural del diseño óptimo de procesos de maquinado

El problema de optimización vectorial no lineal de procesos de maquinado con una estructura dada se define como sigue:

$$\text{Minimizar } \left[ \vec{F}(\vec{x}) : \vec{W}(\vec{x}) \geq 0 \right] \quad (1)$$

Donde el vector de calidad de la solución, es decir, el vector de r-funciones objetivos es:

$$\vec{F}(\vec{x}) = [S_1(\vec{x}), \dots, S_r(\vec{x})] \quad (2)$$

Aquí,  $\vec{x}$  denota el vector de n-variables y  $\vec{W}(\vec{x})$  es el vector de m-restricciones de desigualdad.

El problema clásico multiobjetivo [1] puede ser transformado a los problemas escalares substitutos por medio de diferentes estrategias. Una de las más eficaces para el diseño óptimo de máquinas y equipos es la función de escala aditiva adimensional [6]. Por eso, parece conveniente aplicarla a la optimización de procesos de maquinado.

La función de escala puede ser expresada como:

$$\min_{\vec{x} \in X} f(\vec{x}, \vec{p}) = \min_{\vec{x} \in X} \sum_{k=1}^r \alpha_K S_K(\vec{x}_K, \vec{p}_K) / S_{K_D} \quad (3)$$

con la suma de los factores de escala igual a:

$$\sum_{k=1}^r \alpha_K = 1 \quad (4)$$

Una propiedad del proceso de maquinado  $S_K(\bar{x}_K, \bar{p}_K)$ , debe ser bien definida para que su decrecimiento sea ventajoso en el sentido técnico, es decir, acercando el proceso a la solución óptima;  $S_{K_0}$  es la k-ésima propiedad del proceso que se optimiza, que resulta del breve prediseño o el proceso inicial;  $X$  es el conjunto permisible de los vectores  $\bar{x}$ .

Las restricciones impuestas al proceso de maquinado determinan la región permisible  $\Phi$ , que puede ser expresado como:

$$\Phi : W_j(\bar{x}_j, \bar{p}_j) \geq 0 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

Las variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son seleccionadas durante el diseño del proceso de maquinado por un ingeniero tecnólogo, por ejemplo, la profundidad de corte, velocidad de avance y rotacional.

Los parámetros son representados por el vector de parámetros  $\bar{p}$  que ocurre en la función de escala y el vector de parámetros  $\bar{p}_j$  en las restricciones. En el conjunto de parámetros se pueden incluir: dimensiones del semiproducto, dimensiones geométricas de la herramienta, costo de la herramienta, potencia de la máquina-herramienta y su eficiencia, costo de operación del puesto de trabajo, tolerancia dimensional, clase de rugosidad superficial, factores y exponentes en las fórmulas para duración de la herramienta y fuerza principal de corte.

Basándose en el análisis de significación de los índices de procesos de corte se han seleccionado los siguientes componentes de la función de escala: el costo unitario  $K_j$ , el tiempo unitario  $t_j$ , la potencia útil  $P_e$  (se la maximiza para la pasada de desbaste en una máquina en uso y se le minimiza para una máquina diseñada) y la ganancia unitaria  $Z_j$ . La rigosidad superficial  $Rz$  y la precisión dimensional y de forma  $\Delta d$ , por lo general, se han transferido a las restricciones (excepto casos particulares donde forman la función de escala). Entre las restricciones que ocurren siempre se necesitan mencionar las condiciones de energía, fuerza y duración de la herramienta. Las propiedades de capa superficial (por ejemplo, la temperatura de corte) pueden ser siempre consideradas como una restricción, cuando se cortan materiales termoplásticos.

La figura 1 muestra el concepto del espacio tridimensional de calidad del proceso de maquinado.

Para formular el problema del diseño óptimo, se necesita crear un modelo de optimización del proceso de maquinado que debe ser adecuado al problema real y de fácil solución con ayuda de un computador. Para incrementar la eficiencia de modelación de optimización

del proceso de maquinado se aplica el concepto del sistema de modelación en dos niveles de jerarquía para la optimización de los objetivos diseñados [6]. En dicho sistema, el modelo cuantitativo es un detalle minucioso del modelo analítico estructural.

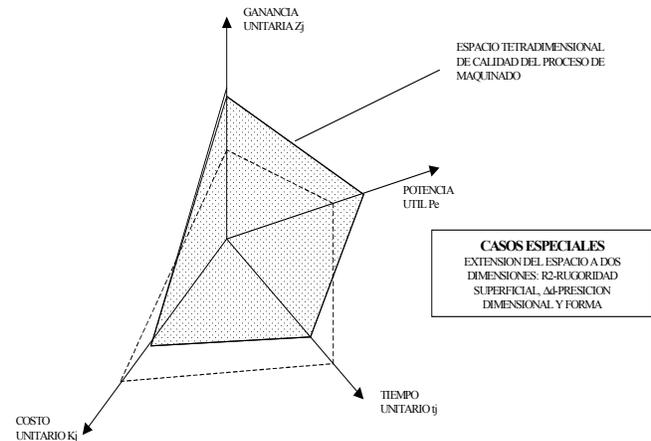


Figura 1. Espacio tridimensional de calidad del proceso de maquinado.

Para formular el criterio de optimización y las restricciones, se emplean las fórmulas analíticas indispensables de la teoría de corte [5,9].

La tabla 1 muestra la característica sintética de modelos de optimización de los procesos de maquinado típicos incluyendo los resultados tecno-económicos de cálculos numéricos.

### 3. Diseño óptimo cuádruple objetivo del proceso de torneado cilíndrico en dos pasos

En aras de simplificar la exposición, se presenta dicho ejemplo muy esencialmente. Los detalles se pueden encontrar en [7]. El modelo estructural del proceso de torneado cilíndrico se muestra en la figura 2. Se consideran como variables: la velocidad rotacional para la pasada de desbaste  $n_1$ , la velocidad rotacional para la pasada de acabado  $n_2$ , los respectivos avances  $f_1, f_2$  y la profundidad de corte para la pasada de desbaste  $a_{p1}$ .

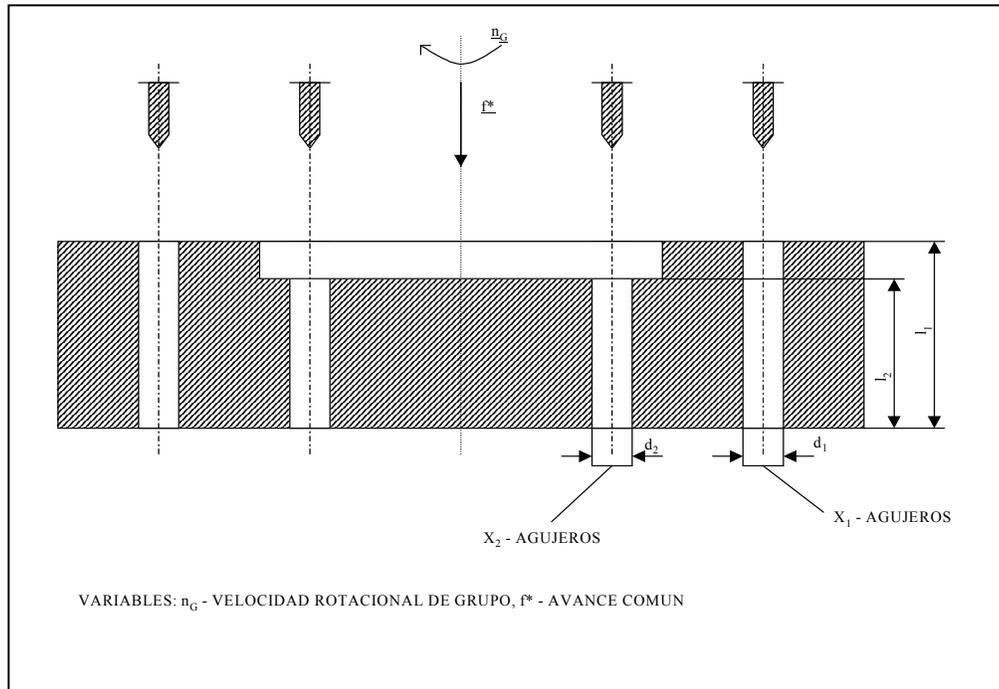
El modelo analítico estructural del proceso es un medio efectivo para determinar las relaciones estructurales básicas y los conjuntos de los parámetros no materiales, incluidos en las restricciones. Además, da lugar a la creación del modelo cuantitativo, por lo cual, este modelo es directamente sistematizado.

Las relaciones estructurales básicas se encuentran en la matriz de la función de escala (tabla 2) y la matriz de las restricciones (tabla 3).

**Tabla 1.** Característica sintética de modelos de optimización de los procesos de maquinado típicos.

Nº	Proceso de Maquinado	Número Objetivos	Número Variables	Número Restricciones de Desigualdad	Resultados Tecno-Económicos de Cálculos Numéricos			
					$K_j \%$	$t_j \%$	$P_e \%$	$Z_j \%$
1	Torneado cilíndrico en dos etapas	4	5	6	2.8	0.27	0.6*	30.5
2	Taladrado de agujeros del disco	4	2	5	17.5	17.5	28.4	26.2
3	Tornedo de envoltura del engranaje	4	3	9	2.6	0.4	5.4	0.7
4	Fresado de planos del bastidor	4	4	5	Punto de partida para un computador			

\*  $P_{e1}$  . Potencia útil de pasada de desbaste.



**Figura 2.** Modelo estructural del proceso de torneado cilíndrico.

**Tabla 2.** Matriz del criterio de optimización para el proceso de torneado cilíndrico.

Variable Comp. Función de Escala	$n_1$	$n_2$	$f_1$	$f_2$	$a_{p1}$
$K_j$	$K_{j1}$	X		X	X
	$K_{j2}$		X		X
$t_j$	$t_{j1}$	X		X	X
	$t_{j2}$		X		X
$P_{e1}$		X		X	X
$Z_j$	$Z_{j1}$	X		X	X
	$Z_{j2}$		X		X

**Tabla 3.** matriz de las restricciones para el proceso de torneado cilíndrico.

Restricción \ Variable	$n_1$	$n_2$	$f_1$	$f_2$	$a_{p1}$
$W_{1,5}$	X		X		X
$W_2$			X		X
$W_3$				X	
$W_4$				X	X
$W_6$		X		X	X

La región permisible  $\Phi$  está determinada por las siguientes restricciones:

- $W_1$  – condición de potencia de la pasada de desbaste,
- $W_2$  – condición de resistencia del filo para la pasada de desbaste,
- $W_3$  – condición de rugosidad superficial para la pasada de acabado,
- $W_4$  – condición de precisión dimensional y de forma para la pasada de acabado.
- $W_5$  – condición de duración del filo para la pasada de desbaste,
- $W_6$  – condición de duración del filo para la pasada de acabado.

En el modelo cuantitativo del proceso se cuantifica todas las clases de relaciones como una formulación matemática, es decir, igualdades y desigualdades. El problema de optimización del proceso de torneado cilíndrico ha sido reducido a encontrar el mínimo de la función de escala no lineal, en un espacio de 5 dimensiones limitado por 6 restricciones de desigualdad.

Se ha optimizado un proceso de torneado cilíndrico existente [9] con los siguientes parámetros básicos:

- i. Material labrado: acero 45 (norma polaca PN-75/H-93200, equivalente SAE 1045); semiproducto de barra laminada,  $D = 60$  mm,  $d = 50$  mm (h8),  $l = 250$  mm, costo de material  $K_m = 1.88$  U.S.D.;
- ii. Herramienta: cuchilla de punta postiza NNZa20x20S20 (PN-75/M-18050, P20ISO 513);
- iii. Máquina-Herramienta: TUV50x1500, potencia del motor eléctrico  $P_s = 7.8$  kW, costo de operación del puesto de trabajo  $K_s = 13.44$  U.S.D./kr;
- iv. Maquinado en seco;
- v. Clase de calidad del producto: 8 DIN.

Por el análisis, resulta que el proceso existente satisface todas las restricciones. Lo que permitió

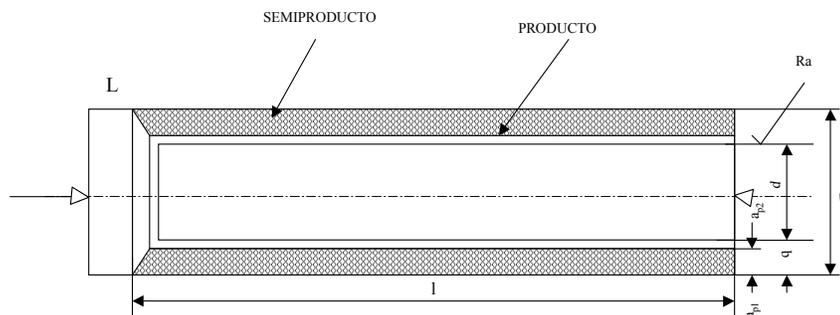
determinar el punto de partida para un computador. Se determina el conjunto de límites de las variables, cercando el punto de partida con un paralelepípedo multidimensional y requiriendo las características discretas para las variables.

El modelo cuantitativo ha sido resuelto, usando un método mixto de gradiente y de Monte Carlo [10], que permite encontrar automáticamente la mejor solución de compromiso. La tabla 4 da los valores de las variables para los procesos existentes y óptimo. Los valores de la función de escala y sus componentes han sido presentados en la tabla 5. La reducción de la función de escala de un 26.7% está correspondiendo a la reducción del costo unitario del proceso de un 2.8% (0.1 U.S.P.), al aumento del tiempo unitario de un 0.2% (0.034 min), al decrecimiento de la potencia útil para la pasada de desbaste de un 0.6% (0.038 kw) y a la subida de la ganancia unitaria del proceso de un 30.5% (0.294 U.S.D./min). La duración del filo se aumentó para las pasadas de desbaste y de acabado de un 169 min. y 13 min. respectivamente.

**Tabla 4.** valores de las variables para los procesos de torneado cilíndrico existente y óptimo.

Variable	Proceso Existente	Proceso Óptimo
$n_1$ rpm	1250	400
$n_2$ rpm	1250	1250
$f_1$ mm/rev	0.15	0.75
$f_2$ mm/rev	0.125	0.088
$a_{p1}$ mm	4	3.6

La figura 3 muestra la gráfica de la función de escala dependiente de la variable  $n_1$  incluyendo la mínima. Las gráficas correspondientes a las  $f_1$ ,  $f_2$  se dan en [7]. La solución polióptima obtenida se ubica cerca de la frontera determinada por la condición  $W_1$ . La eficiencia de la solución del problema de optimización ha sido calculada considerando [7].



**Figura 3.** Gráfica de la función de escala dependiente de  $n_1$ .

**Tabla 5.** Valores de la función de escala y sus componentes para los procesos de torneado cilíndrico existente y óptimo.

Función de Escala y Sus componentes	Proceso Existente	Proceso Óptimo
$f(x, p)$	1.0000	0.7330
$K_j$ U.S.D.	3.610	3.510
$t_j$ min.	15.297	15.331
$P_{el}$ Kw	6.078	6.040
$Z_j$ U.S.D./min	0.963	1.257

#### 4. Conclusiones

Lo que resulta de la tabla 1, el procedimiento del diseño óptimo cuádruple objetivo aplicado a los procesos de maquinado típicos ha permitido mejorar sus resultados. Por eso, la comercialización del método puede proporcionar ahorro significativo para la empresa, aumentando su productividad y competitividad. En la etapa de comercialización, el usuario puede imponer las condiciones especiales en el problema de optimización formulado, por ejemplo, el costo constante, ganancia determinada, utilización de la potencia de salida determinada o maximización del tiempo considerando el proceso total de fabricación de una pieza dada. Puede también solicitar un modelo aleatorio de optimización, por ejemplo, de la misma manera que [12]. Una posible modificación del modelo de optimización no es un problema difícil.

Por su parte la referencia [7] aborda también el método del diseño óptimo de procesos de elaboración de madera. Por ejemplo, se ha optimizado un proceso de rectificado perpendicular de un prisma regular basándose en el rendimiento del proceso, costo de la herramienta y la ganancia unitaria.

#### 5. Bibliografía

1. Acosta, A., Restricciones de parámetros de corte en el torneado (in: Applied Mechanics in The Americas, Vol. 5 (M. Rysz, L.A. Godoy, L.E. Suárez, eds.), The University of Iowa, Iowa City, 1966.
2. Fenton, R.G., and Joseph, N.D., "The Effects of the statistical Nature of Tool Life on the Economics of Machininy; International Joconel of Machine Tool Design and Research, N0 1, 1979, 43-50.
3. Jacobs, H.J., Fink, K., Junker, F., Monssa, A., "Gestaltung von Fertigungsprozessen der spanenden Tailefertigung von Polyoptimierung", Fertigungstechnik und Betrieb, Vol. 28, N° 10, 1978, 590-593.
4. Jha, H.K., "A Discrete Data Base Multiple Objctive Optimization of Milling Operation Through Geometric Programming, Trans. ASME, B, Vol. 112, N° 4, 1990, 368-374.
5. Kaesmarek, J., Fundamentos de Maquinado, Maquinado Abrasivo y Electromaquinado, Editorial Científico Tecnológico Polaco, Varsovia, 1970 (en polaco).
6. Kowalski, J., "An Operation Strategy for Mathamatical Modeling in Optimum Design of Machine Construction", Jownal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Trans. ASME, Vol. 107, N° 4, 1985, 463-476.
7. Kowalki, J., Fundamentos del Diseño óptimo multiobjetivo de precesos de maquinado y de elaboración de madera. Materiales de curso para una Universidad Latioamericana, Poznan, 2000.
8. Kowalki, J., Diseño óptimo multiobjetivo de procesos de maquinado, Informe sobre el comienzo de investigación Depto. Ingeniería Mecánica, Universidad del Bio Bio, Concepción, Noviembre 1997.
9. Kulawik, E., Optimización de parámetros de corte (en) Manual de Ingeniero Maquinado, Vol. I, Editorial Científico Tecnológico Polaco, Varsovia, 1991 (en polaco).
10. Porankiewics, B., Mathematical Model of Edge Dullness for Prediction of Wear of Wood Cutting Tools", Proc. 9 th Wood Machining Seminaw, UC Berkeley, CA, 1988, 169-170.
11. Ravignani, G., "Machining for A Fixed Demand: An Approach to Optimization", International Jownal of Production Research, Vol. 12, N° 3, 1974, 361-376.
12. Sheikk, A.K., Kendall, L.A., and Pandit, S.M., " Probabilistic Optimization of Multitod Machining Operations", Journal of Engineery for Industry, Trans. ASME, Vol. 102, N° 8, 1980, 1149-1155.
13. Sawabwski, J., "Pasametric Polyoptimization of Multicut Turning Operations", Progress in Machine and Equipment Tecnology, Vol. 18, N° 2, 1994, 51-71.

---

**Trend analysis techniques in spectral and total level mensurations**