

# APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y ECUACIÓN EXPANDIDA DE TAYLOR EN LA OBTENCIÓN DEL INTERVALO DE MÁXIMA EFICIENCIA

## **Orlando Durán**

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, [orlando.duran@ucv.cl](mailto:orlando.duran@ucv.cl), Av. Los Carrera, 01567, Quilpué, Chile

## **Roberto Barrientos**

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av. Los Carrera, 01567, Quilpué, Chile

## **Luiz Airton Cosalter**

FEAR, Universidade de Passo Fundo, CP, [lac@upf.br](mailto:lac@upf.br) Passo Fundo (RS), Brasil

**Resumen.** Para realizar optimizaciones en operaciones de mecanizado existen variados modelos analíticos, sin embargo esos modelos consideran la ecuación simplificada de Taylor. Por lo tanto, el hecho de no considerar la influencia de importantes parámetros tales como avance y profundidad de corte restringe significativamente la aplicabilidad del modelo. La solución es la optimización multi-objetivo, o sea, la definición conjunta de los parámetros de corte (velocidad, avance y profundidad) que garanticen condiciones de mínimo costo o las de máxima producción. Realizar esta optimización de manera analítica es una tarea difícil y no es viable para operaciones donde sea necesario obtener de manera rápida y confiable la condición de corte óptima para una dada operación. Este trabajo presenta los resultados de la creación y aplicación de un conjunto de algoritmos genéticos para realizar la optimización de las condiciones de corte según los criterios de mínimo costo y de máxima producción para una dada operación de torneado. Como restricciones utilizadas para los algoritmos desarrollados fueron consideradas la potencia disponible en la máquina y la rugosidad superficial pretendida para las operaciones de desbaste y acabado respectivamente. Los resultados muestran que a pesar de que los algoritmos genéticos no poseen buena capacidad de generalización, los modelos implementados generan resultados significativos para diversos materiales y situaciones del proceso de mecanizado bajo análisis. Para demostrar el funcionamiento y el desempeño del modelo se muestra en detalle un estudio de caso. Complementando este trabajo, se discuten futuros desarrollos y posibilidades de integración con sistemas CAM.

**Palabras-clave:** Intervalo de Máxima Eficiencia, Algoritmos Genéticos, Optimización, Ecuación de Taylor

## **1. INTRODUCCIÓN**

La fabricación mecánica es reconocidamente una actividad que está en constante desarrollo. Nuevas máquinas, nuevos materiales para herramientas y nuevos procesos de fabricación mantienen a este sector de la economía en permanente adecuación a estas novedades. La exigente competencia ha hecho que los ingenieros de fabricación busquen cada día soluciones y métodos más eficientes y productivos. Dentro de este contexto es que surgen los modelos de optimización en función de diversos criterios. Básicamente, estos modelos buscan generar condiciones de corte que maximicen la producción, minimizando el desgaste de las herramientas y por consiguiente, los costos de producción. Es tradicional el uso del Intervalo de Máxima Eficiencia<sup>(1)</sup>, a partir del cual se pueden identificar los valores de velocidad de corte para situaciones de mínimo costo y máxima producción. Considerando estos objetivos impuestos a la selección de condiciones de corte para una dada operación se concluye que la problemática está dentro de la categoría de los problemas de optimización multicriteriales. Estos múltiples criterios, son en esencia, conflictivos, por ejemplo, al

aumentar la velocidad de corte y el avance en una dada operación, para aumentar así, la tasa de remoción de material, el costo de la operación se podrá ver elevado debido a un mayor desgaste de la herramienta de corte. De esta forma, el problema de optimizar las condiciones de corte en una operación de mecanizado consiste en la búsqueda de un compromiso entre el cumplimiento de los diversos objetivos de producción. Diversas metodologías se han utilizado para optimizar condiciones de corte, entre las que se pueden citar los ya tradicionales métodos derivativos y basados en gradiente, como también la programación dinámica. Más recientemente, métodos no tradicionales, tales como, las redes neuronales<sup>(2)</sup> y simulated annealing han sido utilizados para planificar y optimizar condiciones de corte en mecanizado. Estos métodos presentan como principal desventaja, su lenta convergencia y eventualmente la obtención de óptimos locales lo que no los hace interesantes desde el punto de vista operacional.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la utilización de algoritmos genéticos para la optimización de condiciones de corte y obtención del intervalo de máxima eficiencia utilizando el modelo expandido para cálculo de vida de la herramienta de Taylor.

## 2. ALGORITMOS GENÉTICOS

Un algoritmo genético (AG), es una técnica de programación computacional que imita a la evolución biológica como estrategia para resolver problemas <sup>(3)</sup>. Dado un problema específico a resolver, la entrada del AG es un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, codificadas de alguna manera específica, y que permite evaluar cuantitativamente a cada opción. Esta evaluación de cada solución candidata es hecha de acuerdo con una función de aptitud o función objetivo. En un acervo de candidatas generadas aleatoriamente la mayoría no funcionarán en absoluto, y serán eliminadas, pero habrá otras que pueden ser prometedoras hacia la solución del problema. Estas candidatas prometedoras se conservan realizándose múltiples copias de ellas. Estas copias no son perfectas, se introducen cambios aleatorios durante el proceso de copia, formando un nuevo acervo de soluciones candidatas. Esta nueva generación de soluciones candidatas son sometidas a una nueva ronda de evaluación de aptitud. Las candidatas que han empeorado o no han mejorado con los cambios son eliminadas. Pero, al realizar variaciones aleatorias introducidas en la población se puede haber mejorado el desempeño de alguna de las posibles candidatas, convirtiéndolas en mejores soluciones del problema, más completas o más eficientes. De esta forma, se seleccionan y copian estos individuos vencedores hacia la siguiente generación promoviendo en ellos cambios aleatorios, repitiendo el proceso hasta una cierta condición de término (Figura 1).

Los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia enormemente poderosa y exitosa para resolver problemas, demostrando de manera espectacular el poder de los principios evolutivos. Se han utilizado algoritmos genéticos en una amplia variedad de campos para desarrollar soluciones a problemas tan difíciles o más difíciles que los abordados por los especialistas humanos <sup>(4)</sup>.

## 3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Un importante enfoque al problema de la modelación de procesos de mecanizado, es la obtención y utilización de relaciones empíricas, las cuales prescinden de una explicación causal de los fenómenos y se limitan a ofrecer un aproximador funcional que relacione ciertos datos obtenidos experimentalmente. Este ha sido el enfoque que ha predominado en la modelación de los procesos de corte de metales. La primera correlación satisfactoria para modelar el desgaste de la herramienta de corte fue la ecuación de Taylor (Ecuación 1):

$$K := T \cdot v^x \tag{1}$$

La cual relaciona la vida de la herramienta (T), con la velocidad de corte (v) utilizada en el proceso.

K: constante que depende del material elaborado y otras condiciones de corte.  
x: coeficiente que depende del material de corte.

Posteriormente la ley de Taylor fue expandida para tomar en cuenta el avance y la profundidad de corte, obteniéndose la llamada ecuación de Taylor expandida:

$$K := T \cdot v^x \cdot f^y \cdot a^z \tag{2}$$

f: avance.

a: profundidad de corte.

x, y, z: Coeficientes que dependen del material de corte, de la geometría de la herramienta y de otros factores del proceso; con la particularidad de que  $x > y > z$ .

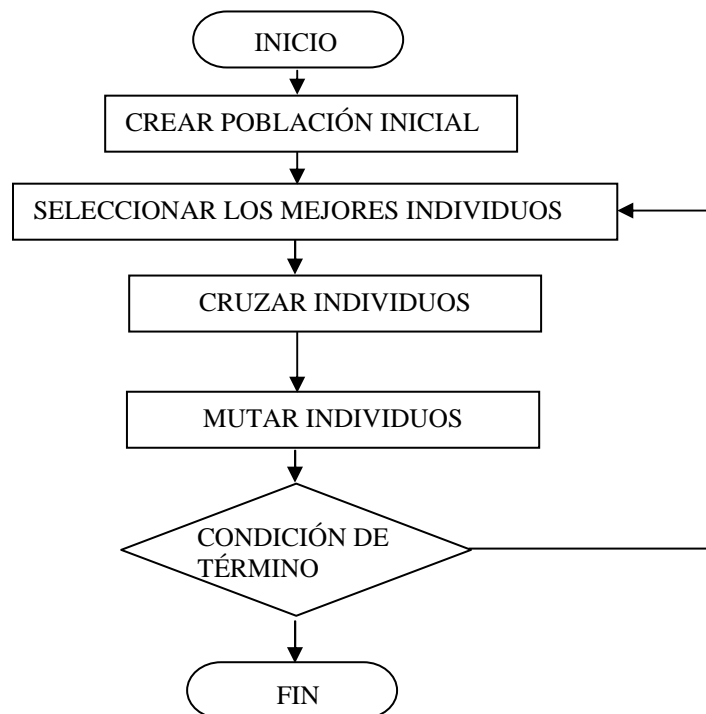


Figura 1. Diagrama de bloques del funcionamiento básico de un algoritmo genético simple.

A partir de la ecuación simplificada de Taylor se puede obtener el intervalo de máxima eficiencia. El intervalo de máxima eficiencia, es el intervalo comprendido entre la velocidad de corte para máxima producción y la velocidad de corte para mínimo costo (figura 2).

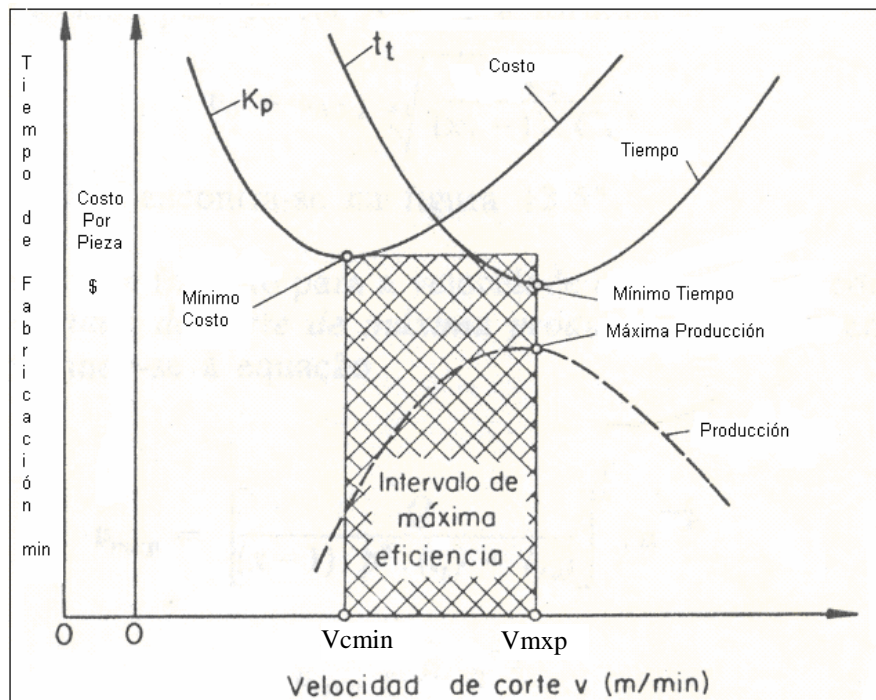


Figura 2. Intervalo de máxima eficiencia.

Es muy importante que los valores utilizados de la velocidad de corte estén comprendidos en este intervalo. Para velocidades de corte menores que  $V_{cmin}$ , se tiene un aumento del costo de producción por pieza acompañado de una caída de la producción. De igual manera, para valores de velocidad de corte mayores que  $V_{m xp}$ , hay un aumento del costo de producción y una reducción de la producción. Sin embargo, para los valores crecientes de la velocidad, a partir de  $V_{cmin}$  hasta  $V_{m xp}$ , habrá un aumento del costo por pieza y un correspondiente aumento de la producción.

Por otro lado, al utilizar la ecuación de Taylor expandida en el modelamiento del intervalo de máxima eficiencia, se obtienen las ecuaciones (3) y (4) para el costo de producción y el tiempo total por pieza respectivamente. En estas ecuaciones se presenta un problema de optimización complejo debido que a través de ellas se pretende obtener el avance y la velocidad de corte para optimizar tanto el costo como los tiempos de producción con una velocidad que esté comprendida dentro de este intervalo.

$$K_p := C_1 + \left( \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot v} \right) \cdot C_2 + \left[ \frac{(\pi \cdot d \cdot l_f \cdot v^{x-1} \cdot f^{y-1} \cdot a^z)}{(1000 \cdot K)} \right] \cdot C_3 \quad (3)$$

$$t_t := \frac{(l_f \cdot \pi \cdot d)}{(1000 \cdot f \cdot v)} + \left[ t_s + t_a + \left( \frac{t_p}{N} \right) \right] + \left[ \left[ \frac{(l_f \cdot \pi \cdot d \cdot v^{x-1} \cdot f^{y-1} \cdot a)}{(1000 \cdot K)} \right] - \left( \frac{1}{N} \right) \right] \cdot (t_{ft} - t_{fa}) \quad (4)$$

Como se puede apreciar en las figuras 2 y 3 las relaciones entre el avance, velocidad de corte y costo de producción y tiempo total respectivamente, no son lineales. Esto hace que la obtención de mínimos sea compleja matemáticamente. Por esta razón se optó por construir un modelo de optimización basado en algoritmos genéticos que se describe en los próximos párrafos <sup>(5,6)</sup>.

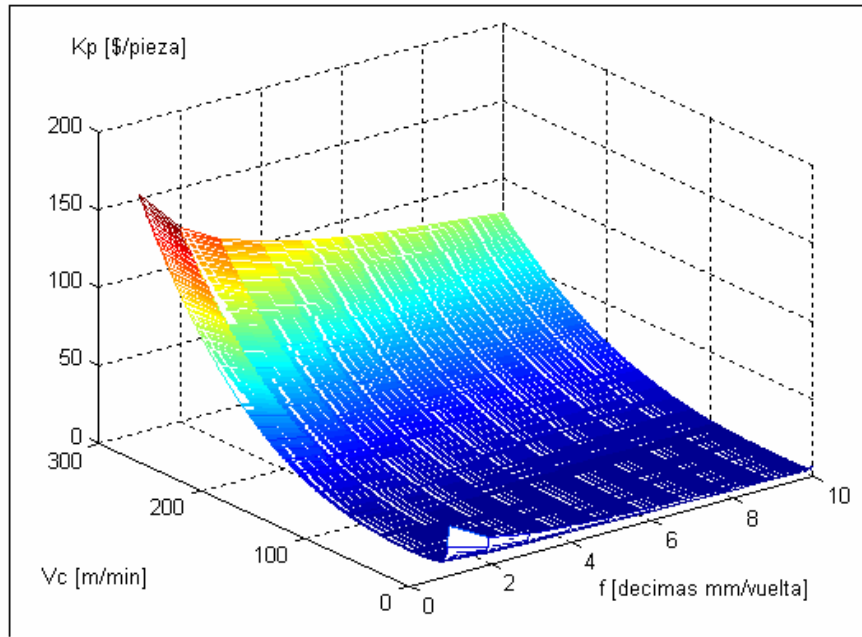


Figura 3. Variación del costo en función del avance y de la velocidad de corte

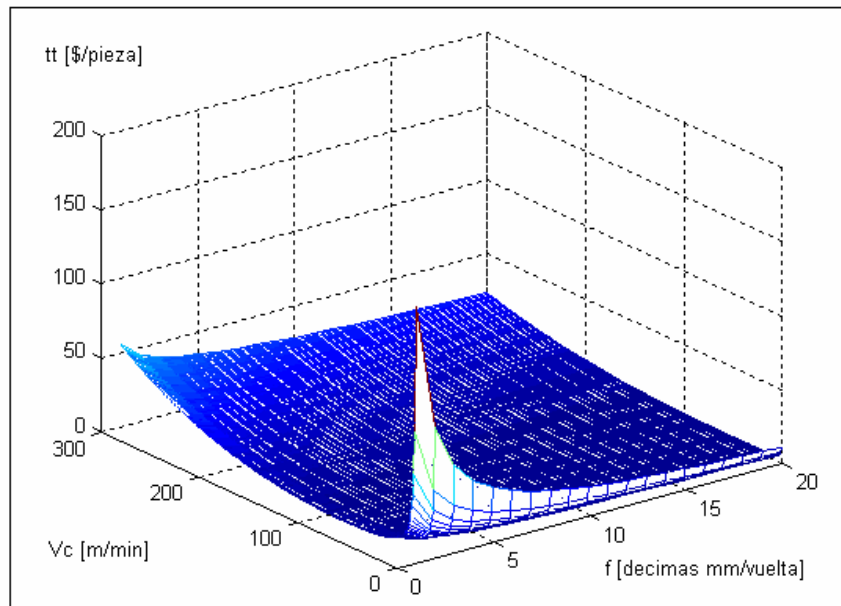


Figura 4. Variación del tiempo por pieza en función del avance y de la velocidad de corte

Para desarrollar el modelo de optimización usando algoritmos genéticos se ocupó la plataforma computacional del MATLAB 7.0 en el cual se implementaron dos modelos a través de los cuales se obtuvieron los valores de velocidad de corte y avance que corresponden a los mínimos para las ecuaciones 3 y 4 respectivamente.

Los modelos desarrollados corresponden a operaciones de torneado cilíndrico. Estos modelos admiten que ciertos parámetros sean modificados por el usuario para otorgarle mayor flexibilidad a la solución creada y proporcionar resultados para diversas situaciones. Los parámetros que pueden ser modificados son, el largo del mecanizado y el diámetro de la superficie a ser torneada, el número de piezas mecanizadas por vida, el valor de la hora hombre y el costo de la hora máquina, además del costo de la herramienta por vida y todos los tiempos considerados en el modelo del intervalo de máxima eficiencia (cambio de herramienta, aproximación y alejamiento de la herramienta, tiempos secundarios de mecanizado, tiempo de preparación de la herramienta y el

tiempo de afilado de la herramienta). Además se puede considerar cualquier tipo de material a través de la modificación de la constante y exponentes de la ecuación de Taylor expandida.

Para obtener la mejor combinación de parámetros del algoritmo genético, se desarrollaron pruebas o simulaciones, variando el tamaño de la población, la fracción de cruzamiento y el rango inicial de la población. A través de esas simulaciones se pudo determinar el rango de velocidades y avances para los cuales, ambas ecuaciones alcanzan sus mínimos respectivos. Estos valores se utilizan como patrón de comparación para evaluar los resultados arrojados por los algoritmos genéticos y aislar la mejor combinación de parámetros para los algoritmos genéticos. La configuración del algoritmo genético utilizada para ambos modelos es la siguiente:

Tamaño de la población = 200 individuos  
Fracción de cruzamiento = 0,5  
Conteo de la elite = 2

Se muestra el funcionamiento de los dos modelos con un ejemplo en la siguiente sección.

### 3. ESTUDIO DE CASO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Se desea seleccionar los parámetros de corte óptimos, para un proceso de cilindrado de semiacabado del escalón extremo de un eje de acero 1045, mecanizado con una herramienta de corte TNMG 22 04 08-PM (ISO P-10). Los parámetros de este caso fueron extraídos de un trabajo de la literatura <sup>7</sup>.

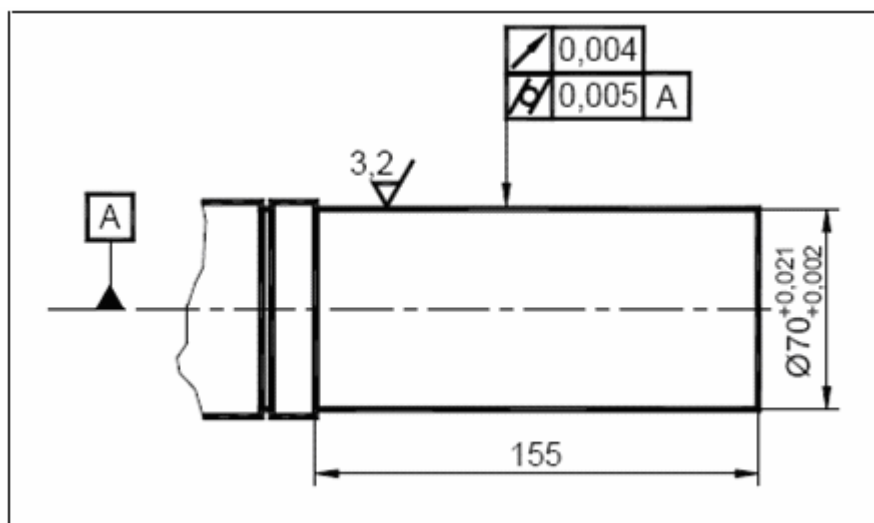


Fig.5: Esquema de la pieza a analizar en el caso

Diámetro de la pieza.  $d = 70$  [mm]  
Recorrido del avance.  $l_a = 155$  [mm]  
Avance.  $f = 0,3$  [mm/vuelta]  
Profundidad de corte.  $a = 2$  [mm]  
Salario-Hombre.  $Sh = 6000$  [\$/h]  
Salario-Máquina.  $Sm = 9000$  [\$/h]  
Costo de la herramienta por vida (T).  $K_{ft} = 3000$  [\$/h]  
Tiempo de cambio de la herramienta.  $t_{ft} = 3$  [min]  
Tiempo de aproximación y alejamiento de la herramienta.  $t_a = 0,1$  [min/pieza]  
Tiempo secundario de mecanizado.  $t_s = 1,5$  [min/pieza]  
Tiempo de preparación de la máquina.  $t_p = 15$  [min]

Tamaño de lote.  $N = 150$  [piezas]  
 Tiempo de afilación de la herramienta.  $t_{fa} = 0$   
 Constante de Taylor.  $K = 5,485 \cdot 10^9$   
 Exponente de la velocidad de corte.  $x = 3,45$   
 Exponente del avance.  $y = 0,69$   
 Exponente de la profundidad de corte.  $z = 0,45$

Se generó una matriz de valores de tiempos y costos en función de la variación de la velocidad de corte y del avance (en los rangos permitidos por la herramienta) obteniéndose una aproximación del valor mínimo de las respectivas funciones, y poder así compararlo con el valor que obtiene el algoritmo genético. Igualmente de compararon los valores obtenidos por el algoritmo genético con valores recomendados en catálogos por un fabricante de herramientas.

El valor mínimo para la función de costo se obtiene para un avance de 0,6 [mm/vuelta] y para una velocidad de corte variable entre  $234 \leq V_c \leq 239$  [m/min]. Por otro lado, y usando la misma metodología, el valor mínimo para la función de tiempos totales se obtiene para un avance de 0,6 [mm/vuelta] y para una velocidad de corte variable entre  $376 \leq V_c \leq 378$  [m/min]. Una vez ejecutados ambos algoritmos genéticos se obtienen los siguientes resultados: El intervalo de máxima eficiencia para este caso analizado se da para velocidades de corte mayores que 236 [m/min] y menores que 376 [m/min].

La vida de la herramienta para los datos utilizados es la siguiente:

$K = 5.485 \cdot 10^9$   
 $x = 3,45$   
 $y = 0,69$   
 $z = 0,46$   
 $a = 2$  [mm]  
 $f = 0,3$  [mm/vuelta]  
 $v = 234 - 373$  [m/min] (intervalo de máxima eficiencia)

para  $v = 234$  [m/min].

Tenemos

$$T = 61,33 \text{ [min]}$$

Es decir que para los datos obtenidos por el algoritmo genético la vida de la herramienta es 61,33 [min]. Para poder analizar los resultados entregados por el sistema implementado con algoritmos genéticos, es necesario comparar estos resultados con datos entregados por un fabricante de herramientas, en este caso se utilizó el catálogo Corokey de Sandvik. Según ese fabricante, las velocidades recomendadas corresponden a una vida de 15 minutos. El fabricante para el caso a estudiar, es decir con un avance de 0.3 mm/vuelta y una profundidad de corte de 2 [mm], recomienda utilizar una velocidad de corte de 330 m/min, con la cual asegura una vida de la herramienta de 15 min. Este fabricante entrega una tabla de corrección para la velocidad de corte en función de otras duraciones o vidas de la herramienta (Tabla 1).

Tabla 1. Factor de Corrección para diferentes vidas de la herramienta  
 (Fuente: Catálogo Corokey – Sandvik Coromant 2003).

Vida Herramienta (min)	10	15	20	25	30	45	60
Factor de Corrección	1,11	1,0	0,93	0,88	0,84	0,75	0,70

Como fue dicho anteriormente el fabricante recomienda los valores para una vida de 15 min, para poder comparar los datos que entrega el fabricante es necesario adecuar la velocidad de corte que se recomienda a la vida que se calculó anteriormente. O sea, adecuar el valor recomendado en el catálogo a una vida de 61,33 min. Se optó por construir un modelo de corrección de la vida de la herramienta y así ampliar los valores mostrados en la tabla 1. A partir de esos datos se obtuvo el siguiente gráfico (Figura 6).

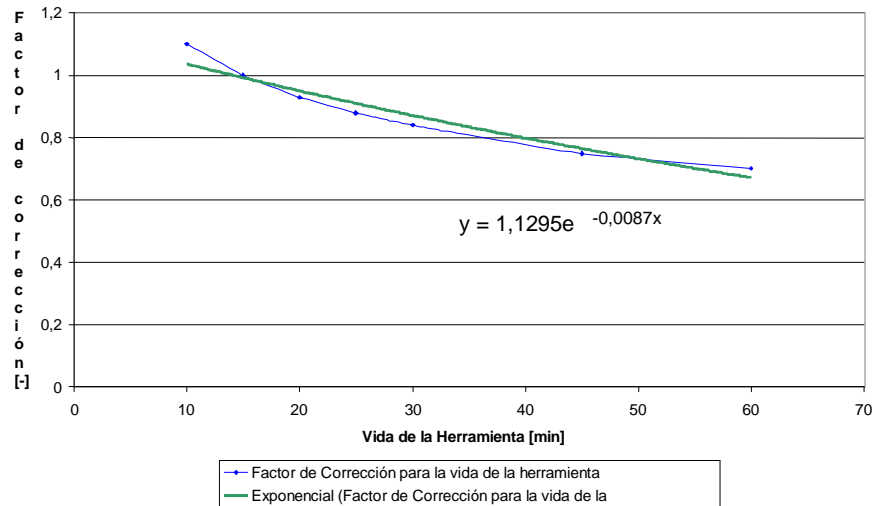


Fig.6: Gráfico Factor de Corrección v/s Vida de la Herramienta

De este gráfico se obtuvo la ecuación de corrección.

$$Y := 1.1295e^{-0.0087 \cdot T} \quad (5)$$

Donde:

T: vida de la herramienta calculada.

Y: Factor de corrección para la velocidad de corte recomendada por el fabricante.

Es decir para la vida de la herramienta calculada ( T = 61,33 min), el factor de corrección es el siguiente:

$$Y = 0.66$$

Al obtener el factor de corrección se puede obtener la velocidad de corte a la cual trabajaría la herramienta según las condiciones recomendadas por el fabricante para tener una vida útil igual a la calculada, es decir para obtener una vida de la herramienta de 61,33 min. Para obtener esta velocidad se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_c := Y \cdot V_f \quad (6)$$

Donde:

Vf: Velocidad de corte (330 m/min) recomendada por el fabricante para obtener una vida de la herramienta de 15 min.

Vc: Velocidad obtenida al multiplicar la velocidad de corte recomendada por el fabricante (330 m/min) para una vida de la herramienta de 15 min, por el respectivo factor de corrección (0.66). Como dicho anteriormente, este factor de corrección se utiliza para poder obtener una vida de la



herramienta equivalente a 61,33 min, que es la que se obtiene al utilizar una velocidad de corte de 234 m/min.

Por lo tanto la velocidad a la cual debería trabajar la herramienta recomendada por el fabricante para obtener una vida de la herramienta de 61,33 min, sería 218 m/min. La tabla 2, muestra una comparación de los valores de costo y tiempo para los parámetros obtenidos por el algoritmo genético y por las recomendaciones hechas por el catálogo del fabricante de herramientas. Respecto al valor de la velocidad de corte que recomienda el fabricante como esta se encuentra fuera del intervalo de máxima eficiencia, se puede apreciar en la Tabla 2 que existe un aumento del costo y del tiempo de fabricación por pieza si se utilizara esta velocidad. La figura 7 muestra las convergencias obtenidas por ambos algoritmos genéticos en función del número de generaciones.

Tabla 2. Resultados comparativos

Vc	Kp	tt
[m/min]	[\$/pieza]	[min/pieza]
V <sub>min</sub> = 234	596	2,205
V <sub>mxp</sub> = 373	656	2,109
V <sub>fabricante</sub> = 218 (*)	597	2,235

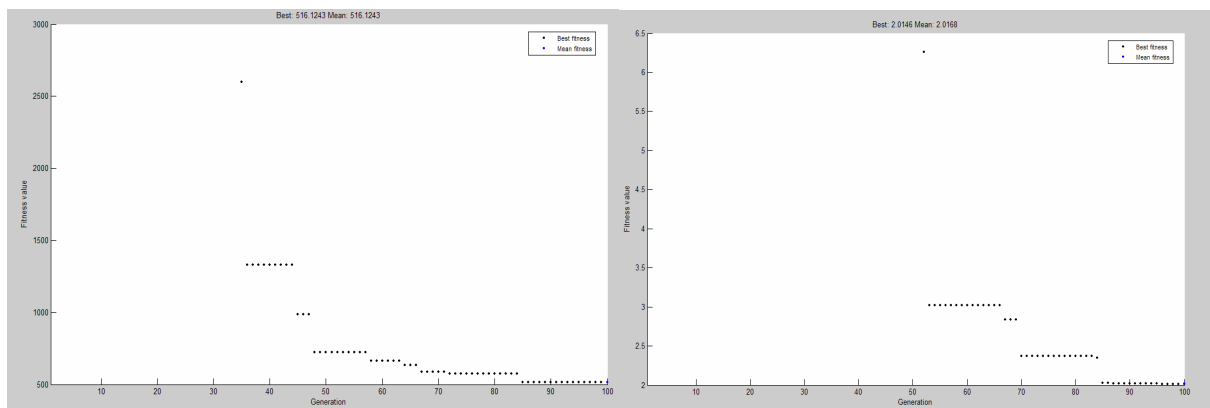


Figura 7. Convergencias de los algoritmos genéticos para los casos de mínimo costo (izquierda) y máxima producción (derecha)

#### 4. CONCLUSIONES

En primer lugar podemos decir que el algoritmo genético se comporta de excelente manera, ya que al comparar los resultados obtenidos a través de las respectivas simulaciones con los obtenidos por el algoritmo genético, se puede apreciar que estos resultados son prácticamente iguales, con pequeñas diferencias las cuales se pueden atribuir sólo a diferencias en el tratamiento de los decimales.

Como conclusión se puede decir que la configuración de los algoritmos genéticos comentada en el capítulo anterior hace que se llegue al resultado esperado en su primer intento y con una rápida convergencia, con lo cual se puede asegurar que este sistema cumple a cabalidad la determinación de condiciones de corte para operaciones de torneado, en un lapso de tiempo muy corto.

#### 5. REFERENCIAS

1. FERRARESI, Dino, **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1977, 751p.
2. YUE, Y, DING, L, AHMET, K, Study of neural network techniques for computer integrated manufacturing **ENG COMPUTATION** 19 (1-2): 136-157 2002
3. MICHALEWICZ.Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, second edition, 1994.

4. CHAUDHRY, SS, LUO, W Application of genetic algorithms in production and operations management: a review **INT J PROD RES** 43 (19): 4083-4101 OCT 1 2005
5. DERELI, T, FELIZ, IH, BAYKASOGLU, A Optimizing cutting parameters in process planning of prismatic parts by using genetic algorithms **INT J PROD RES** 39 (15): 3303-3328 OCT 2001
6. DERELI, T, FILIZ, IH Optimisation of process planning functions by genetic algorithms **COMPUT IND ENG** 36 (2): 281-308 APR 1999
7. SARDIÑAS, R., SANTANA, M., BRINDIS, E., Genetic algorithm-based multi-objective optimization of cutting parameters in turning processes **ENG. APPLICATIONS ART INT** 19 (2006) 127 - 133

## **APLICACION OF GENETIC ALGORITHMS AND TAYLOR EXPANDED EQUATIONS FOR OBTAINING MAXIMUM EFFICIENCY INTERVAL**

### **Orlando Durán**

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, [orlando.duran@ucv.cl](mailto:orlando.duran@ucv.cl), Av.Los Carrera, 01567, Quilpué, Chile

### **Roberto Barrientos**

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Av.Los Carrera, 01567, Quilpué, Chile

### **Luiz Airtton Cosalter**

FEAR, Universidade de Passo Fundo, CP , [lac@upf.br](mailto:lac@upf.br) Passo Fundo (RS), Brasil

**Resumen.** *There is a large number of analytic methods for optimization in machining. However, those models take into account some simplified method for quantifying the tool life. Among those models, Taylor equations are recurrent in optimization applications. Nevertheless, the simplified Taylor equation does not consider the influence of important parameters such as feed rate and depth of cut. This fact restricts the applicability of the optimization models. Multi-objective optimization is being used in order to find simultaneously the cutting parameters, either for minimization of operation costs or for maximization of production levels. There are analytic ways to optimize cutting conditions, but such optimization tasks require a much longer time to prepare and test the resolution methods, therefore they can be deficient from the operational point of view. This work presents the results of applying genetic algorithms for optimization of cutting conditions, both in minimum costs conditions and maximal production rates, in turning operations. Restrictions consider power and superficial roughness. Results show that despite the generalization difficulties that genetic algorithms present, the models proposed in this paper lead to satisfactory results. For demonstrating the performance of the proposed algorithms a case study is shown.*

**Keywords:** *Maximum Efficiency Interval, Genetic Algorithms, Optimization, Taylor's equation.*