

Optimización de condiciones de operación usando el algoritmo NSGA II

Optimization of Operating Conditions Using NSGA II Algorithm

Miguel Á Flores-Rentería^a, Martín Ortiz-Domínguez^b, Arturo Cruz-Avilés^c, Luis E Martínez-Martínez^d

Abstract:

The product design is performed from different perspectives using various methodologies, among them is the design for manufacturability, which is the process of designing parts, components or products for ease of manufacturing with an end goal of making a better product at a lower cost, so it requires special attention in the manufacturing resources and operating conditions as these affect the cost, time and quality of the products. Operating conditions are an important element in the selection of manufacturing equipment both must be selected to meet design specifications, production requirements and a balance between production volume, cost and quality, for this is requires concurrent work. Currently there are many manufacturing practices and studies where resources and operating conditions are indicated for a large amount of materials, despite of this should be selected within a wide universe of data that contains a variety of correct solutions and there may be better ones than others, so you need to know what the optimal. In this work is presents the optimization of operating conditions for a turning process using the NSGA II algorithm (Nondominated Sorting Genetic Algorithms) and get the best compromise between the cost, time and quality of a product. The usefulness of the work is illustrated by a case study.

Keywords:

Optimization, NSGA-II, Operations conditions.

Resumen:

El diseño del producto se realiza desde diferentes perspectivas utilizando diversas metodologías, entre ellas está el diseño para la manufacturabilidad, que es el proceso de diseño de piezas, componentes o productos para facilitar la fabricación con el objetivo final de hacer un mejor producto a un menor costo, por lo que requiere especial atención en los recursos de fabricación y condiciones de operación, ya que estos afectan el costo, el tiempo y la calidad de los productos. Las condiciones de operación son un elemento importante en la selección del equipo de manufactura, ambos se deben seleccionar para cumplir especificaciones del diseño, requerimientos de producción y un equilibrio entre el volumen de producción, el costo y la calidad, para esto es requiere un trabajo concurrente. Actualmente existen muchas prácticas y estudios de manufactura en los que se indican recursos y condiciones de operación para una gran cantidad de materiales, a pesar de ello se debe seleccionar dentro de un amplio universo de datos que contiene una variedad de soluciones correctas y entre las puede haber unas mejores que otras, por lo que es necesario saber cuál es la óptima. En este trabajo se presenta la optimización de las condiciones de operación de un proceso de torneado utilizando el algoritmo NSGA II (algoritmos genéticos de clasificación no dominados) y obtener el mejor compromiso entre el costo, el tiempo y la calidad de un producto. La utilidad del trabajo es ilustrada por un estudio de caso.

Palabras Clave:

Optimización, NSGA-II, Condiciones de operación.

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior Ciudad Sahagún, ORCID: 0000-0001-8018-4708, Email: miguel_flores10233@uaeh.edu.mx.

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior Ciudad Sahagún, ORCID: 0000-0003-4475-9804, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior Ciudad Sahagún, ORCID: 0000-0003-0455-1646, Email: arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx.

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior Ciudad Sahagún, Email: inautolemm@gmail.com

Introducción

La selección de las correctas condiciones de operación influye directamente en la selección de los recursos de manufactura, el costo, el tiempo de producción y la calidad de los productos, deben ser seleccionadas para satisfacer las especificaciones de diseño y producción de los productos, con base en ellas se determinan la máquina, las herramientas de corte y sujeción, cumpliéndose con las especificaciones de diseño y un balance entre la producción, el costo y la calidad.

En un proceso de torneado se tienen tres objetivos en conflicto; volumen de producción, el costo de operación y la calidad del maquinado. Los tres objetivos antes mencionados están representados en funciones de la velocidad y profundidad de corte, así como de la alimentación. La selección de estos componentes afecta directamente la producción y competitividad, se encuentra inmersa en un proceso de optimización no lineal con restricciones, la dificultad principal con métodos convencionales radica en la velocidad de convergencia y en la precisión 1.

La determinación de las óptimas condiciones de operación consiste en seleccionar de un conjunto óptimo a un grupo de valores integrado por la velocidad, alimentación y profundidad de corte para satisfacer un objetivo económico con varias restricciones impuestas. Algunas de las restricciones que han sido consideradas son las siguientes:

Económicas {
 Máxima producción o mínimo tiempo de producción.
 Mínimo costo de producción por pieza.
 La combinación de las dos anteriores.

Vida útil de la herramienta

Operacional {
 Valores mínimos y máximos.
 Acabado superficial.
 Potencia máxima de la máquina.

En la literatura, se han encontrado estudios empleando como método de optimización, principalmente, la programación dinámica o lineal, las cuales enfrentan el problema de que, al incrementar el número de variables, el problema se convierte combinatoriamente grande y por lo tanto complejo en su programación, la cual puede acarrear errores en la precisión y optimización, la alternativa a este problema es el uso de algoritmos genéticos.

Las condiciones de operación deben ser seleccionadas para que una máquina herramienta sea empleada en su máxima extensión y la vida útil de la herramienta de corte se prolongue un mayor tiempo. Si la velocidad y profundidad de corte, así como la alimentación se

reducen, la eficiencia del trabajo se disminuye y la resistencia de la herramienta al desgaste se prolonga. De esta manera el cortador se cuida y el costo por su reemplazo es menor, pero el de la estación de trabajo se incrementa, (la herramienta sólo representa el 10% del costo total del maquinado). Inversamente, no siempre es la intención producir dentro del tiempo de producción más corto. Cuando las condiciones de operación son seleccionadas para una operación de maquinado, se busca un compromiso entre la máxima remoción de material y el mínimo desgaste de la herramienta. El propósito de esta optimización es determinar un conjunto de condiciones de operación que satisfaga los límites de la ecuación objetiva y el balance entre los objetivos en conflicto. Las funciones están enfocadas en alcanzar el mínimo costo de operación o menor tiempo de operación, con esto se busca el costo más bajo de producción unitaria al menor tiempo requerido para realizar una operación. Se adoptará un criterio de costo de producción mínimo y máximo rango de producción

Relación recursos de manufactura y condiciones de operación

La selección de recursos de manufactura en un proceso de arranque de viruta es un medio por el cual se determinan las máquinas herramientas, los herramientas de corte y sujeción, así como las condiciones de operación adecuadas para producir una pieza cumpliendo con las especificaciones de diseño y manufactura. La figura 1 ilustra la relación de las condiciones de operación y los recursos de manufactura.

Al manufacturar un producto por arranque de viruta se requiere de un proceso, que puede ser el torneado, fresado, etc. Al proceso lo realiza una máquina herramienta que usa herramientas de corte y de sujeción, entre otros aditamentos, y todos requieren condiciones

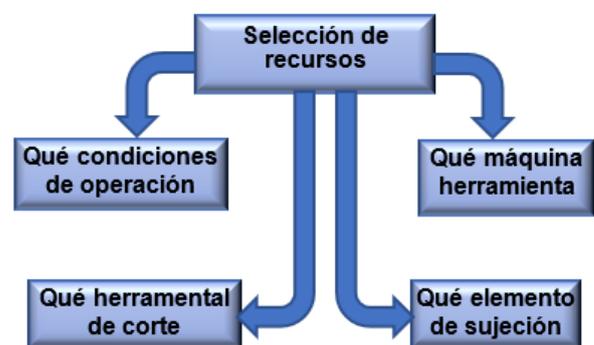


Figura 1. Selección de recursos de manufactura. Las condiciones de operación y los recursos de manufactura están relacionadas con la capacidad técnica de los recursos de manufactura, con las especificaciones de diseño y manufactura (acabado superficial, tolerancias,

etc.) así como con los requerimientos del cliente (costo, calidad, producción etc.). Lo anterior considera que existe una estrecha relación entre el diseño de un producto, los procesos, los recursos de manufactura y las condiciones de operación, estos elementos forman un conjunto dependiente entre sí, por lo que deben determinarse simultáneamente con estrategias que permitan obtener la mejor relación producción costo calidad 4.

La figura 2 muestra la dependencia entre los recursos de manufactura y las condiciones de operación.

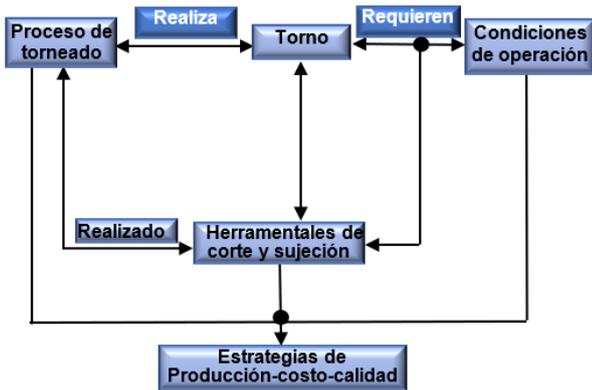


Figura 2. Dependencia entre recursos de manufactura y condiciones de operación

Un aspecto relevante en la selección de recursos de manufactura es integrar y compartir la información relacionada con el producto y con los recursos de manufactura, para asistir la toma de decisiones durante el proceso de selección. La integración de la información consiste, en el almacenamiento en una base de datos de la información que describe y representa a un producto, de las instalaciones de manufactura y de la información comercial sobre recursos de manufactura. Con la información integrada, se puede elegir las mejores alternativas y comprendiendo el impacto que tal acción tendrán en otras partes de la empresa.

Definición de condiciones satisfactorias

La determinación de las condiciones satisfactoria es una forma de asegurar la máxima operación técnica de los recursos de manufactura, y la eficiencia de producción. En su definición se consideran tres variables de decisión: velocidad de corte, profundidad de corte, la alimentación. Estas tres variables tienen influencia directa sobre la productividad en la fabricación de piezas por arranque de viruta. La figura 3 muestra la influencia que la velocidad de corte tiene sobre la productividad.

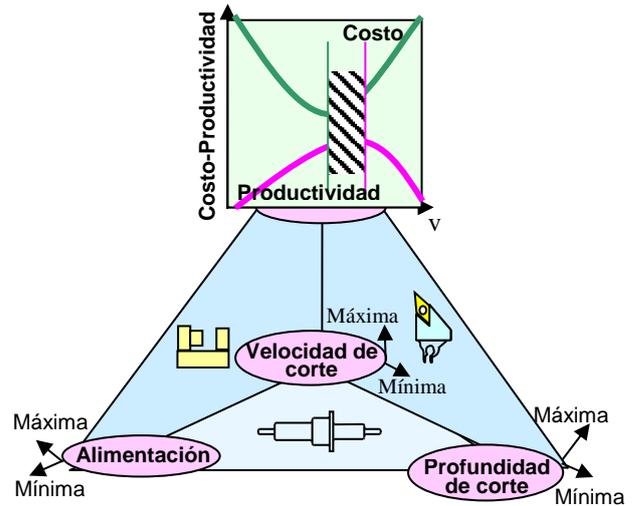


Figura 3. Influencia de la velocidad de corte en la productividad

Puede observarse que cuando la curva de costo está en su mínimo y la de productividad al máximo, sus extremos no coinciden para un mismo punto de velocidad. El área sombreada es conocida como área de alta eficiencia, dependiendo de la estrategia que se busque, ya sea trabajar con el costo más bajo, obtener una alta producción o una combinación de ambas, deben de buscarse las condiciones de operación dentro de esa área 6.

En este trabajo, se utiliza el criterio de máxima calidad del producto minimizando el costo y el tiempo de producción.

Formulación del problema de determinación de condiciones de operación

La determinación correcta de las condiciones de operación es un componente clave en la planeación del proceso de manufactura. Se tienen tres objetivos en conflicto; volumen de producción, el costo de operación y la calidad de maquinado los cuales están representados en función de la velocidad corte, alimentación, profundidad de corte y el número de pasos. La selección de estos parámetros tiene un impacto directo sobre la producción en el proceso de arranque de viruta, juega un papel importante en el incremento de la producción y competitividad.

Determinación de parámetros

Los parámetros que se buscan están basados en alcanzar el mínimo costo de operación, el mínimo tiempo de producción y la calidad deseada en los planos de producción.

- Costo unitario de producción

El costo unitario de producción C_{up} estará determinado por.

$$C_{up} = C_m + C_c + C_h + C_p \quad (1)$$

donde:

C_m = Costo del maquinado.

C_c = Costo por reemplazo de la herramienta de corte.

C_h = Costo de la herramienta

C_p = Costo por tiempo de preparación

Costo por maquinado se determina con la ecuación.

$C_m = k_t * t_m$ donde k_t es el costo del operador de la máquina herramienta (\$/min)

t_m el tiempo de maquinado (min).

El tiempo de maquinado se define por

$$tm = \frac{\pi DL}{1000 Vf} \times (n) \quad (2)$$

donde;

V = Velocidad de corte

f = La alimentación

D = diámetro del maquinado

L = La longitud axial del corte

n = El número de pasadas que depende de la profundidad de corte.

El costo por maquinado estará determinado por

$$Cm = k_t \left[\frac{\pi DL}{1000} \left[\frac{1}{Vf} (n) \right] \right] \quad (3)$$

En esta selección de condiciones de operación se consideran pasadas de corte con igual profundidad. El número de pasadas está determinado por la profundidad total de corte, es decir el material que se tiene que remover, dividido entre los límites inferior y superior de la profundidad de corte definida en el catálogo del fabricante, de modo que el número de pasos estará en el

rango de $\left(\frac{dM}{d_{max}}, \frac{dM}{d_{min}} \right)$ donde dM es la profundidad

total de corte, d_{max} y d_{min} son la profundidad máxima y mínima definidas en el catálogo para un inserto específico.

Costo por tiempo de preparación

$$C_p = k_t * t_p$$

Se define por el costo del trabajador k_t multiplicado por el tiempo de preparación t_p . El tiempo de preparación, se constituye por dos términos $t_p = t_{cd} + t_{pe}$, uno de ellos constante definido por el tiempo empleado en las operaciones de carga y descarga t_{cd} , y otro variable debido al movimiento de posicionamiento de la herramienta de corte t_{pe} .

El tiempo de posicionamiento está en función del número de pasadas y la distancia recorrida, se determinará con la siguiente expresión,

$$t_{pe} = [v_a * L_r] n \quad (4)$$

v_a es la velocidad de aproximación, L_r la distancia recorrida.

El tiempo de preparación será $t_p = [v_a * L_r] n + t_{cd}$, y generan un costo en el maquinado igual a;

$$C_p = k_t [v_a L_r (n) + t_{cd}] \quad (5)$$

Costo por reemplazo de la herramienta es definido por.

$$C_c = k_t * t_{ch}$$

Está constituido por el tiempo de reemplazo de la

herramienta $t_{ch} = \frac{t_m}{T}$, por el costo del trabajador k_t . El tiempo requerido para cambiar una herramienta está en

función su vida útil definida por, $T = \frac{C}{v^n f^{n_1} d^{n_2}}$, de la

ecuación 2 se hace $t_m = K_1 = \frac{\pi D L n}{1000 v f}$ y sustituyendo en

t_{ch} , junto con T, se obtiene el tiempo por reemplazo de

$$\text{una herramienta } t_{ch} = \left(K_1 v^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{1}{n_1}-1} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \quad (6)$$

Donde C, n, n_1 y n_2 son constantes de la herramienta para la vida útil.

Se considera que la vida de la herramienta es la misma en el corte burdo y fino.

Costo por reemplazo de la herramienta es, por lo tanto;

$$C_{ch} = K_t \left[\left(K_1 v^{\frac{1}{n}-1} f^{\frac{1}{n_1}-1} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] \quad (7)$$

Costo de la herramienta por pieza $C_p = C_f \frac{t_m}{T}$

Está determinado por el costo por filo de la herramienta C_f (una herramienta de corte puede tener más de un filo) multiplicado por el tiempo de maquinado entre la vida útil de la herramienta.

$$C_p = K_t \left[\left(K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{m}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] + C_f \quad (8)$$

Funciones objetivo.

La primera función objetivo que se considera en la optimización de condiciones de operación corresponde al tiempo de producción. La función está constituida por los siguientes tiempos; el tiempo de maquinado t_m , de preparación t_p , y el de reemplazo de la herramienta de corte (duración de la herramienta) t_{ch} , es la siguiente.

$$obj[1] = [K_1 v^{-1} f^{-1}(n)] + [(V_a * L_r)(n)] + 2 \left[\left(K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{m}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] C$$

La segunda función objetivo corresponde al costo de producción, la integran los costos de maquinado, el costo de reemplazo y costo de la herramienta, así como el de preparación, es definida por;

$$obj[2] = K_t [K_1 v^{-1} f^{-1}(n)] + K_r [(V_a * L_r)(n)] + K_i \left[\left(K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{m}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] + K_i \left[\left(K_1 v^{\frac{1}{n}} f^{\frac{1}{m}} d^{\frac{1}{n_2}} \right) / C \right] + C_f$$

La tercer función objetivo busca garantizar la calidad deseada y es;

$$obj[3] = \frac{1000 f^2}{8r}$$

- *Variables del problema*

Se han definido cuatro variables.

1. Velocidad de corte v
 $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$
2. Alimentación f
 $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$
3. Profundidad de corte d
 $d_{\min} \leq d \leq d_{\max}$

4. Número de pasos n
 $\frac{dM}{d_{\max}} \leq n \leq \frac{dM}{d_{\min}}$

Restricciones del problema

Restricción en la potencia

$$cstr[1] = \frac{k_1 f_f^\mu d_f^v V_f}{6120 \eta} - P_{\max}$$

P_{\max} = potencia máxima del motor

η = Eficiencia

Restricción el acabado superficial.

$$cstr[2] = obj[2] - R_m$$

R_m = Rugosidad máxima

Restricción en la profundidad de corte.

$$cstr[3] = d * n - PC_t$$

PC_t = Profundidad total de corte

La optimización de las funciones objetivo se constituye por un conjunto de n parámetros (velocidad y profundidad de corte, alimentación y número de pasadas), un conjunto de k funciones objetivo ($obj[1], obj[2], obj[3]$), y un conjunto de restricciones ($cstr[1], cstr[2], cstr[3]$). Las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las variables de decisión 3, 5, 7, 9, 10.

Algoritmo NSGAI

NSGA-II usa un procedimiento para organizar la población por no dominancia, así como un enfoque para preservar el elitismo y un operador para dispersar los individuos en la frontera de Pareto. Inicialmente organizan toda la población aleatoria en fronteras de no dominancia, siendo la primera frontera los individuos que no son dominados dentro de la población. Para organizar el resto de la población, se olvida de las fronteras organizadas y evalúa los individuos no dominados organizándolos en una nueva frontera.

El algoritmo crea una población combinada (ver figura 4), $R_t = P_t \cup Q_t$. La población R_t es de tamaño $2N$ y está clasificada de acuerdo con la no dominancia. Puesto que todos los miembros de las poblaciones previas y actuales están incluidos en R_t el elitismo está asegurado. Ahora las soluciones pertenecientes al mejor conjunto F_1 no dominado son la mejor solución en la población combinada y debe ser enfatizado más que cualquier otra solución. Sí el tamaño de F_1 es menor que N ,

definitivamente se eligen a todos los miembros del conjunto F_1 para la nueva población P_{t+1} . Los miembros sobrantes de la población P_{t+1} son elegidos para subsecuentes fronteras no dominadas para su ranqueo. Así se eligen las soluciones del conjunto F_2 y F_3 . Este procedimiento continúa hasta que ya no se puedan acomodar más conjuntos. Se dice que F_1 es el último conjunto no dominado más allá de que cualquier otro pueda ser acomodado. En general, la cantidad de soluciones de todos los conjuntos desde F_1 hasta F_i será tan grande como el tamaño de la población. Para seleccionar exactamente N miembros de la población se clasifica la solución de la última frontera F_i usando el operador de comparación de amontonamiento π_n en orden descendente y se elige a la mejor selección requerida para llenar las ranuras de todas las poblaciones. El procedimiento se muestra en la figura 4

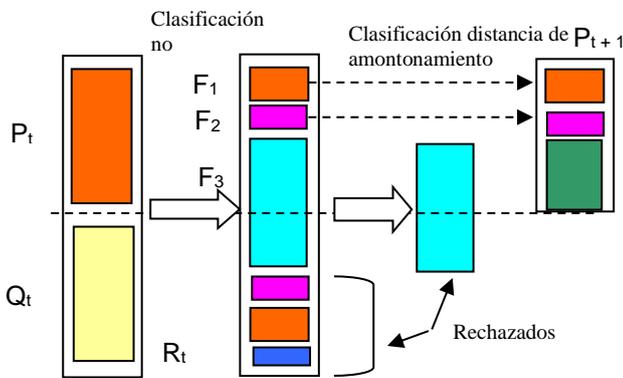


Figura 4. Esquema del procedimiento de NSGA-II, adaptado de Deb

selección, cruza y mutación que formará una nueva población Q_{t+1} de tamaño N . Es importante notar que se utiliza un torneo binario como operador de selección, pero el criterio de selección está basado en el operador de comparación de amontonamiento π_n . Puesto que este operador requiere el ranking y la distancia de amontonamiento para cada solución en la población, se calcula esa cantidad mientras se forma la población P_{t+1} . Considerando la complejidad de una iteración en el algoritmo. Las operaciones básicas en el peor de los casos de complejidad son las siguientes.

1. El sorteo no dominado es $O(M(2N)^2)$;
2. La asignación de la distancia de amontonamiento es $O(M2N)\log(2N)$;
3. El sorteo en π_n es $O(2N\log(2N))$;
4. La complejidad total del algoritmo es $O(MN^2)$, la cual es gobernada por el sorteo de no dominancia. Si el algoritmo se ejecuta con cuidado, el tamaño de la población para ser

dominada de acuerdo con el sorteo de no dominancia es $2N$. En cuanto el procedimiento ha encontrado suficientes fronteras para tener N miembros en P_{t+1} no hay razón para continuar con el procedimiento de selección.

La diversidad entre las soluciones no dominadas se da por un procedimiento de comparación usando la distancia de amontonamiento, la cual es usada durante el torneo de selección y durante la fase de reducción de la población. Puesto que las soluciones están relacionadas con la distancia de amontonamiento (una medida de la densidad de soluciones en un vecindario), no se necesita un parámetro extra. Aunque esta es calculada en el espacio de las funciones objetivo, esto también puede ser implementado en el espacio paramétrico, si así se desea. Abajo se describirá la t ésima generación del algoritmo propuesto 4, 8.

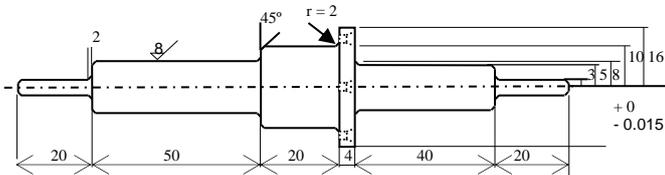
- Combina las poblaciones de padres e hijos para crear $R_t = P_t \cup Q_t$, realiza el ordenamiento de R_t identificando las fronteras $F = (F_1, F_2, \dots)$ todas las fronteras no dominadas de (R_t)
- $P_{t+1} = 0$ e $i = 1$ Hasta que $|P_{t+1}| + |F_i| \leq N$, hasta que la población sea igual a N .
- Cálculo de la distancia de amontonamiento en (F_i)
- Se incluye la i -ésima frontera no dominada en la población padre $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i$.
- Comprueba la incursión de la próxima frontera. $i = i + 1$
- Sortea la descendencia usando π_n comparador de amontonamiento. $Sort(F_i, \pi_n)$.
- Escoge a los primeros elementos de $(N - |P_{t+1}|)$ de F_i . $P_{t+1} = P_{t+1} \cup F_i[1 : (N - |P_{t+1}|)]$
- Se usa la selección, cruza y mutación para generar una nueva población Q_{t+1} . $Q_{t+1} = crear(P_{t+1})$
- $t = t + 1$

Resultados.

Se ha optado por el algoritmo NSGA II debido a que en las condiciones de operación para un proceso de torneo se obtuvieron tres funciones objetivo. La presencia de múltiples funciones objetivos requiere de un

conjunto de soluciones óptimas (conocido como óptimas de Pareto) en lugar de una única. En ausencia de cualquier información adicional, una de estas no puede considerarse que es mejor que las otras, esto exige encontrar tantos resultados óptimos de Pareto como sea posible. Los algoritmos evolutivos multiobjetivo son capaces de encontrar múltiples respuestas en una sola ejecución. El algoritmo NSGA II ha demostrado ser un método efectivo y rápido para encontrar un conjunto de soluciones, supera a otros algoritmos de optimización multiobjetivo, debido a su menor complejidad computacional y a su propiedad de elitismo. Presenta las siguientes tres características que le permiten determinar múltiples alternativas en problemas con múltiples funciones objetivo: i) utiliza un principio elitista, ii) emplea un mecanismo que preserva la diversidad, y iii) hace hincapié en las soluciones no dominadas de una población. Una descripción completa de NSGAII puede encontrarse en (Deb, Patrap, & Agarwal, 2002).

Para mostrar la aplicación de algoritmo NSGA II se presenta el siguiente caso de estudio, el cual consiste en la selección de las condiciones de operación para manufacturar la pieza mostrada en la figura 5 por medio de un conjunto de recursos previamente seleccionados, los datos iniciales son tomados de catálogos de fabricantes y prácticas de manufacturas.



Chamfer are 45°
Radios r = 2
Tolerancias + 0.0, -0.0015
Material 15GA HB=128

Área de trabajo	Símbolo	F [mm/rev]		a _p [mm]		Ra [μ m]	
		min.	Máx.	min.	Máx.	min.	Max.
extrafino	EFN	0.05	0.15	0.25	2.0	0.09	1.4
Fino	FIN	0.1	0.3	0.5	2.0	0.29	2.97
Medio	MDM	0.2	0.5	1.5	4.0	1.25	10.3
Burdo ligero	LRG	0.4	1	3	10.0	3.6	30.2
Burdo	RGH	0.5	1.5	6	15.0	6	70
Burdo pesado	HRG	0.7	>	8	20.0	10	80

Figura 5. Geometría de estudio

Para determinar las condiciones de operación óptimas se han empleado las funciones objetivas, así como las restricciones descritas anteriormente. El código computacional del algoritmo NAGA II se desarrolló en lenguaje C, el tamaño de la población fue 200 por generación y se consideraron 100, 200 y 400 generaciones, los resultados se obtuvieron en 40 segundos y se muestran en las gráficas siguientes

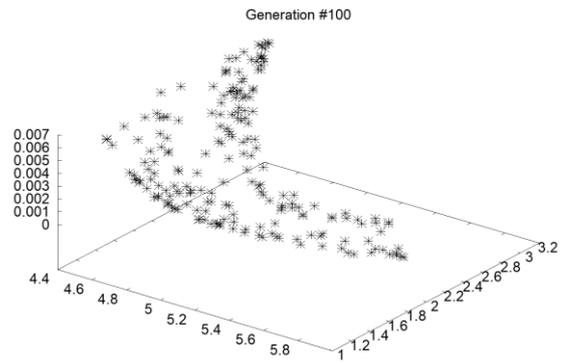


Figura 6. Gráfica de resultados con 100 generaciones

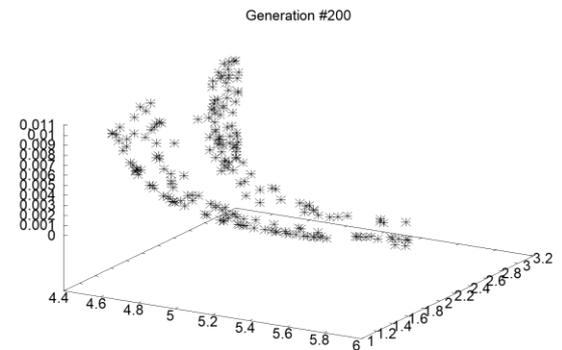


Figura 7. Gráfica de resultados con 200 generaciones

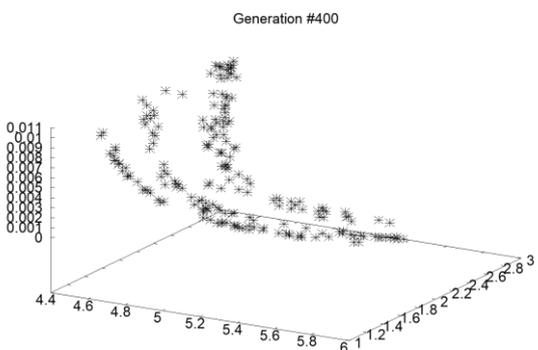


Figura 8 gráfica de resultados con 400 generaciones.

Al analizar los resultados se considera que es posible emplear, en este problema, las soluciones con 200 generaciones, en la figura 9 se han seleccionado los mínimos

Máquina Puma 230MA								
Inserto DN#K 150608								
Porta Ins DDJNR 12								
Mordaza 3QLC DIN:2405								
Mínimo costo de producción								
Tp	Cp	V	f	d	Vida útil	Tiempo total	Costo total	Número de
(min)	(\$)	(mm/min)	(mm/r)	(mm)	(min)	(min)	(\$)	Máquinas
3.700	1.012	325	0.436	3.7	27.9	1480	404	3

Mínimo tiempo de producción								
Tp	Cp	V	f	d	Vida útil	Tiempo total	Costo total	Número de
(min)	(\$)	(mm/min)	(mm/r)	(mm)	(min)	(min)	(\$)	Máquinas
3.010	1.460	449	0.670	3.746	26.0	1204	584	2.5

Figura 9. Tabla de resultados con 200 generaciones

Conclusiones.

En este trabajo se ha investigado la aplicación del algoritmo de optimización de múltiples objetivos NSGA II, en la obtención de condiciones óptimas de operación empleadas en la manufactura de una pieza mecánica mediante un proceso de torneado, los resultados muestran la integración de las condiciones de operación con las estrategias de manufactura.

En la actualidad se encuentran bases de datos proporcionados por fabricantes con condiciones de operación óptimas para manufactura una pieza en especial, las cuales difieren de las de los manuales. La optimización de múltiples objetivos por medio de NSGA-II, permite obtener condiciones óptimas de manufactura con base en las estrategias de producción existente.

Referencias

[1] Bruccoleri, M., Renna, P., & Perrone, G. (2005). Reconfiguration; a key to handle exceptions and performance in manufacturing operations. *International journal of production research*, 4125-4145.

[2] Deb, K., Patrap, A., & Agarwal, S. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm NSGA II. *IEEE Transaction on evolutionary computation*, 182-197.

[3] Eduardo, A., & Micaroni, R. (2002). Cutting conditions for finish turning process aiming the use of dry cutting. *International journal of machine tools and manufacturing*, 899-904.

[4] Gupta, M., & Evans, P. (2013). Operation planning and scheduling problems in advanced manufacturing system. *International journal of production research*.

[5] Hattem, H. (2011). Study the effect of cutting conditions for turning process on the machined surface. *Nahrain University College of Engineering*, 61-66.

[6] Karim, M., & Smith, R. (2008). Empirical relationships between some manufacturing practices and performance. *International journal of production research*, 3583-3613.

[7] Lu, K., & Zhang, X. (2012). Optimization of machining parameters in turning process by dynamic programming. *ASME 2012 Annual Dynamic System and control conference*.

[8] Lucas de Almeida, R. (2015). Multi objective genetic algorithm for variable selection in multivariate classification problems. *Procedia computer science*.

[9] Oberg, E., & Franklin, J. (2016). *Machinery handbook 30th edition*. New York: Industrial Press.

[10] Xavior, A., & Jeyapandiarajan, P. (2018). Multi-objective optimization during hard turning of aisi D2 steel using grey relation analysis. *Material today proceedings*, 13620-13627.