

MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN PROCESOS DE MECANIZADO CON ARRANQUE DE VIRUTA: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

RESUMEN

El tema de la Rugosidad Superficial ha sido ampliamente estudiado por muchos autores, en busca de intentar predecir su comportamiento, así como definir los diferentes factores que la determinan. El presente artículo presenta una revisión de los diferentes enfoques usados para su predicción.

PALABRAS CLAVES: Rugosidad Superficial, Revisión.

ABSTRACT

The subject of the Surface Roughness has been studied by many authors, in search of trying to predict its behavior, as well as defining the different factors that determine it. The present article presents a revision of the different approaches used for the prediction of the Surface Roughness.

KEYWORDS: Surface Roughness, Revision.

VALENTINA KALLEWAARD E.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.

Profesor Asistente

Universidad Tecnológica de Pereira

valentin@utp.edu.co

HERNÁN A. GONZÁLEZ R.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.

Profesor

Universitat Politècnica de Catalunya

hernan.gonzalez@upc.edu

JOAN VIVANCOS C.

Ingeniero Industrial, Ph.D.

Profesor

Universitat Politècnica de Catalunya

joan.vivancos@upc.edu

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la automatización a nivel de todos los procesos en la industria, y en particular en los procesos de mecanizado, ha llevado al uso de modelos que permitan ayudar a determinar las mejores condiciones de mecanizado para la obtención de un buen acabado superficial.

Por medio de la revisión de los diferentes trabajos realizados en el campo del comportamiento de la rugosidad superficial, se ha visto que en los últimos años se ha logrado un amplio desarrollo en la investigación en estos temas, y la consecución de muy buenos resultados. Aunque, de acuerdo con Bernardos y Vosniakos [5], a pesar de que los modelos que se han desarrollado en el tema, son “exactos, correctos, acertados”, aún deben ser abordados más ampliamente y profundamente.

El objetivo del presente artículo es presentar y comentar los diferentes enfoques desarrollados para el estudio y la predicción de la rugosidad superficial.

2. LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL

La rugosidad superficial es un índice muy utilizado en la calidad del producto y como requerimiento técnico en los productos mecánicos. Lograr la rugosidad deseada es de gran importancia para el comportamiento de una pieza. La Topografía Superficial, que según la norma ASME B46.1, es “la representación tridimensional de las irregularidades geométricas de las superficies”, está descrita, en función de sus características espaciales, por las siguientes componentes (ver fig. 1) [40]:

- De longitud de onda corta: Rugosidad (*Roughness*).
- De onda media: Ondulación (*Waviness*).
- De onda larga: Errores de forma (*Form*).

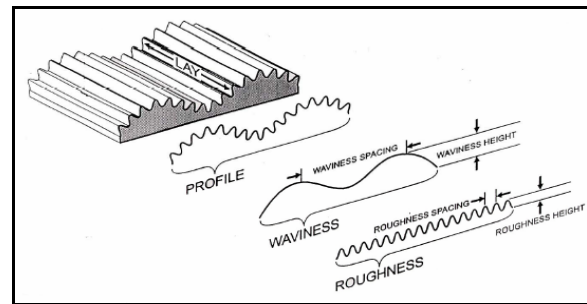


Figura 1. Componentes de la Topografía Superficial

La rugosidad, que se considera como la huella digital de una pieza, son las irregularidades provocadas por los parámetros de mecanizado, tales como el avance (f), la velocidad de corte (v_c), la profundidad de corte (a), así como factores no controlados tales como la no homogeneidad de la pieza y herramienta, el desgaste, errores en los movimientos de la máquina, formación de virutas y factores aleatorios no predecibles [7].

La rugosidad superficial tiene influencia sobre la resistencia a la fatiga, la resistencia a la corrosión, afecta a la fricción superficial, la reflexión de la luz, la apariencia y el costo, entre otros. Debido a que la rugosidad juega un papel tan importante, se hace necesario un buen conocimiento de los parámetros que la determinan y buscar la manera más adecuada de predecir su comportamiento [7].

3. EL FENÓMENO DE CHATTER

Los parámetros controlables y los no controlables del proceso, causan vibraciones relativas entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo. El *chatter* está definido como una forma de vibración autoexcitada entre la

herramienta y la pieza de trabajo, que aparece en la zona de corte [31]. La aparición del *chatter* está muy asociada con la interacción de la pieza de trabajo y la cara de contacto de la herramienta [12], así como con las condiciones de corte.

El fenómeno de *chatter* es indeseable, principalmente debido a dos razones: La primera, es que las marcas dejadas por el *chatter* sobre la superficie mecanizada, afectan la calidad superficial y la exactitud dimensional. La segunda razón tiene que ver con el hecho de que su efecto negativo no es sólo sobre la vida de la herramienta, sino también sobre la máquina en si misma, y en particular sobre la vida del husillo [30].

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el fin de conocer el estado del arte en el tema de la predicción de la rugosidad superficial, se ha realizado una amplia búsqueda bibliográfica. La mayoría de las publicaciones encontradas se refieren al torneado y fresado, que son los procesos de mecanizado con arranque de viruta más ampliamente utilizados.

Bernardos y Vosniakos, en [5], presentan un estado del arte en el estudio de la predicción de la rugosidad superficial en el mecanizado, realizado en el año 2002. Este artículo sirve como referencia para desarrollar el presente trabajo, y permite comprobar que se ha venido trabajando arduamente en el tema, en los cuatro últimos años. Los autores, en [5], clasifican los diversos trabajos, en cuatro categorías: - Modelos basados en teorías de mecanizado: Modelos analíticos y/o algoritmos computacionales para representar la superficie.

- Modelos que examinan los efectos de varios factores a través de la ejecución de experimentos y análisis de resultados.

- Modelos realizados a través de las técnicas de Diseño de Experimentos (DOE).

- Modelos desarrollados utilizando la Inteligencia Artificial.

Por considerar que la clasificación presentada por los autores se ajusta muy bien a la literatura encontrada, será ésta la que se utilizará en este trabajo para presentar la revisión bibliográfica, aunque se ha visto que, adicionalmente a las categorías empleadas, se puede definir una categoría adicional, que es aquella donde se utilizan combinaciones entre las diferentes metodologías, y se han encontrado muchos autores que las han utilizado, obteniendo muy buenos resultados, incluso mejores que al utilizar una sola categoría. A esta categoría se le dará el nombre de Modelos desarrollados por medio de la combinación de metodologías.

Otro trabajo que presenta una revisión de las diversas investigaciones realizadas en el tema del acabado superficial es el presentado en [10], donde se incluyen las diferentes variables que lo afectan, las diferentes técnicas de análisis empleadas y los modelos de predicción de la

rugosidad encontrados. Por otro lado, Grzesik en [16], lleva a cabo una serie de experimentos, bajo ciertas condiciones, para obtener los datos necesarios que le permitan evaluar el comportamiento de algunos modelos de rugosidad anteriormente desarrollados. Inicialmente comenta el hecho de que en los estudios de rugosidad se asume que está influenciada por la v_c , por el f , y el radio de la herramienta, así como también por a , el desgaste y la frecuencia natural de la herramienta, la presencia de filo de aportación o "Built-up-Edge" (*bue*), y la dureza del material. En general, todos estos efectos se estudian con modelos de orden lineal o de segundo orden. Como parte de su trabajo, menciona que la comparación de los resultados obtenidos teóricamente, con respecto a los medidos, discrepa y esto se atribuye a que los modelos no consideran factores como: la deformación plástica en la zona primaria extendida entre el material adyacente y la superficie mecanizada, la elasticidad recuperada después del mecanizado, la interacción adhesiva entre la viruta y el filo de corte, y las vibraciones entre la herramienta y la pieza de trabajo.

- **Modelos basados en teorías de mecanizado:** Algunos de los modelos desarrollados analíticamente se basan en la geometría "del problema". Dentro de estos trabajos se ve que varios autores [21], [4] y [17], emplean el concepto de la excentricidad de corte o "*Cutter Runout*", que es un fenómeno común que afecta al corte en operaciones de fresado, y que se emplea en el modelado de estos procesos. El "*Runout*" es causado por la excentricidad del eje de corte, la irregularidad de los filos de corte, la vibración, el *chatter* y la deflexión de la herramienta. La geometría del problema presenta una gran influencia en la calidad superficial, pero se puede observar que al realizar las verificaciones experimentales de los modelos propuestos, se evidencia que existen muchos otros factores que también la afectan [4].

Por otra parte, se observa que algunos autores han trabajado en el desarrollo de otros modelos geométricos, como es el caso de [20], donde el elemento clave es el radio de la herramienta, y se presenta un método para simular la superficie mecanizada usando la señal de aceleración. Otro método empleado en [38], se basa en predecir la rugosidad, en un proceso de rectificado (*grinding*), tomando en consideración la distribución aleatoria de las alturas de los granos de abrasivo.

Además de la geometría del problema, muchos autores trabajan con un factor que afecta de manera importante la rugosidad superficial y son las vibraciones, tema en el cual se encuentran una variedad de trabajos. En [27] se presenta una perspectiva práctica acerca del *chatter* regenerativo en máquinas herramienta y se lleva a cabo un estudio del tema de la estabilidad. Otros autores que analizan la estabilidad en el proceso de corte son Chen y Tsao [11], quienes trabajan igualmente, sobre el *chatter* regenerativo generado durante el corte de una pieza de trabajo flexible soportada con un cabezal móvil. En su

estudio desarrollan dos modelos: uno para la pieza y otro para la herramienta, y llegan a una conclusión importante que es que en los análisis de estabilidad de estos procesos, se debe tener en cuenta los efectos de la deformación.

Otro factor que se estudia, relacionado con las vibraciones, se presenta en [26], donde se estudia el fenómeno de *bue*, el cual se obtiene, en teoría, a una baja velocidad, y en una superficie blanda a más alta velocidad. Este fenómeno se ve sobre la superficie de la herramienta de corte como una consecuencia de un proceso de mecanizado a baja velocidad. El modelo pretende establecer la velocidad de corte crítica para evitar el *bue*.

Varios autores han trabajado considerando el sistema herramienta-pieza como un sistema simple de un solo grado de libertad. Por ejemplo, en [25], Litak, hace uso de un modelo simple de un proceso de corte con un grado de libertad para explorar el mecanismo de la generación del *chatter*. El autor menciona que los trabajos encontrados se enfocan en el problema de las vibraciones pero no en las condiciones de aparición de éstas. Otros autores, como Lipski y otros [24], adoptan un modelo simple de un grado de libertad para corte regenerativo, combinando los efectos no lineales de la fricción y el contacto entre la herramienta y la pieza. Se hace énfasis en el problema de la dinámica del proceso de corte, pero se enfoca hacia la calidad final del producto. También se encuentran autores que han trabajado sobre el tema, en operaciones de fresado, y desarrollan modelos de múltiples grados de libertad. Ejemplo de esto está en la referencia [39], donde se estudian operaciones de fresado con herramientas helicoidales, y el modelo considera los efectos regenerativos y la pérdida de contacto entre las componentes, para determinar las fuerzas de corte.

En [22], se presenta un modelo para simular el perfil de acabado superficial generado después de una operación de torneado, con características de vibración conocidas. El modelo incorpora los efectos del movimiento relativo entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo, con los efectos de la geometría de la herramienta. Esta simulación se usa para estudiar los efectos de vibraciones sobre el perfil. El propósito de Kim y Lee [19], es predecir el *chatter* en el fresado de acabado, en un centro de mecanizado vertical, mediante un modelo simplificado y experimentos. Primero, se presenta un modelo de dos grados de libertad, basado en el avance por diente o "chip load" (carga de viruta), la geometría de corte y la relación entre los dos anteriores. Luego, para medir las fuerzas de corte se realizan experimentos para diversas condiciones de corte. El modelo permite predecir cuando se genera el fenómeno de *chatter* en el dominio del tiempo.

- Modelos que examinan los efectos de varios factores a través de la ejecución de experimentos y análisis de resultados: Dentro de esta clasificación, se encuentran

muy pocos trabajos. En [6], Bouzid Sai y otros, estudian la influencia del fresado sobre la calidad superficial y sobre la profundidad afectada de la superficie mecanizada. Se realiza el análisis de factores como la evolución de los esfuerzos residuales, microestructura, microdureza y la rugosidad, en relación con los diferentes parámetros de corte en fresado. El desarrollo del estudio se basa en un pequeño número de experimentos, los cuales sirven para determinar modelos empíricos de la variación con diferentes parámetros de corte. En [30] se realiza un trabajo experimental donde se presenta una propuesta para realizar el análisis de la vibración utilizando el análisis FFT (Transformada Rápida de Fourier), sobre las marcas debidas a las fuerzas de corte, basado en dos condiciones de la herramienta de corte: una herramienta nueva y una usada.

En la referencia [14], se hace el desarrollo de un modelo empírico para predecir la rugosidad superficial en torneado de acabado. Para el desarrollo del modelo se toma una relación funcional entre las variables independientes bajo estudio.

- Modelos realizados a través del DOE: La técnica del diseño de experimentos (DOE), es una poderosa herramienta que permite analizar la influencia de ciertas variables de proceso sobre otras variables específicas, las cuales son usualmente llamadas variables respuesta. Vivancos y otros, en [34], presentan un trabajo cuyo objetivo es establecer las variables que deben ser consideradas en un modelo de rugosidad superficial en el mecanizado a alta velocidad, y para ello emplean el diseño de experimentos. Los parámetros considerados son v_c , f , las profundidades axial y radial de corte, y se toman como referencia dos modelos, que evalúan dos zonas diferentes de la pieza: una con el mecanizado en concordancia (*downcutting*) y otra con el mecanizado en oposición (*upcutting*).

Una de las técnicas que se emplean son las llamadas Técnicas Taguchi, que son un plan de experimentos con el objetivo de adquirir datos a fin de obtener información acerca del comportamiento de un proceso dado. Esta técnica ha sido empleada por diferentes autores para el estudio de la rugosidad. En la referencia [12], se establece una correlación entre la v_c , el f y a , para obtener ecuaciones para Ra y Rt , obtenidas por medio de regresión lineal múltiple. En [15], se evalúan los parámetros v_c , f y a , para el fresado de acabado. El objetivo de los experimentos es poder optimizar los parámetros para obtener valores más bajos (mejores) de rugosidad y de fuerza de corte resultantes.

Otra técnica usada en el DOE es el diseño factorial (es la técnica más usada), y consiste en experimentar con todas las combinaciones posibles de variables y niveles. En [35], se emplea un diseño de experimentos factorial fraccionado para determinar la influencia de la v_c , el f , las profundidades axial y radial de corte, sobre la rugosidad

en el fresado a alta velocidad. En [36], se presenta un modelo matemático desarrollado por DOE, y se pretende poder determinar las condiciones óptimas de mecanizado para satisfacer las especificaciones de fabricación. Se estudia el mecanizado a alta velocidad para moldes. En [33], el estudio se centra en coleccionar datos para analizar la rugosidad superficial y las vibraciones, con diferentes valores de v_c , f , a , radio de la punta de la herramienta, longitud de herramienta y longitud de pieza de trabajo. Para el autor, la diferencia entre la rugosidad real y la teórica se atribuye a la influencia de fenómenos físicos y dinámicos tales como: el *bue*, la fricción, y las vibraciones. Los datos reflejan el efecto de la variación de la viruta que actúa como una fuerza dinámica la cual excita la vibración de la herramienta.

En un experimento de caracterización, el interés suele centrarse en determinar las variables del proceso que afectan la respuesta. El siguiente paso lógico es la optimización, es decir, determinar la región de los factores importantes que conduzca a la mejor respuesta posible [41]. El RSM, Metodología de Superficies de Respuesta, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas que se utilizan para el modelado y el análisis, en aplicaciones donde una respuesta de interés es influenciada por muchas variables (factores) y cuyo objetivo es optimizar su respuesta [37]. Kopac y Bahor, en [18], utilizan el RSM, para el diseño y análisis de experimentos que permiten evaluar la influencia de la historia tecnológica del material de la pieza sobre la rugosidad. Evalúan la v_c , el f y el radio de la punta de la herramienta. Llegan a la conclusión de que las propiedades del material son esenciales para el proceso de mecanizado, y que diferentes combinaciones de materiales de la herramienta-pieza deben ser utilizadas para lograr la rugosidad deseada. Otros que utilizan el RSM, son Alauddin y otros en [3], quienes describen el desarrollo de un modelo de rugosidad superficial para el fresado de acabado. El modelo para la predicción matemática ha sido desarrollado en términos de la v_c , el f y la a . Se usa el RSM para estudiar el efecto de estos parámetros.

Algunos autores combinan diferentes técnicas de DOE. Choudhury y Ei-Baradie, en [8], utilizan una combinación entre el diseño factorial y el RSM, para estudiar los efectos de los principales parámetros tales como la v_c , el f y la a . De acuerdo con los autores, el RSM combinado con el diseño de experimentos factorial es una buena alternativa a los métodos tradicionales, y tiene la ventaja de que se reduce notablemente el número de experimentos que se deben realizar. Esta misma combinación la utilizan Wang y otros en [37], donde se estudia el tema de rugosidad aplicado a máquinas miniaturizadas.

- Modelos desarrollados utilizando la Inteligencia Artificial: La Inteligencia Artificial (IA) se define como aquella "inteligencia" exhibida por artefactos creados por

humanos (es decir, artificial), y se aplica hipotéticamente a los computadores. Dentro de las técnicas y campos de la IA se encuentra, entre otros: la ingeniería del conocimiento (*Knowledge Engineering*), la lógica difusa (*Fuzzy Logic*), las redes neuronales artificiales (*Artificial Neural Networks*), la computación evolutiva (*Evolutionary Computation*), las células binarias (*Binary Cells*): dentro de éstas se encuentra las estrategias evolutivas y los algoritmos genéticos (*Genetic Algorithms*) [42].

La Programación Genética es un enfoque de los métodos de *Evolutionary Computation* (EC). Debido a que el problema de mecanizado es muy complicado se hace necesario el uso de algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos están basados en la mecánica de la selección natural y la genética. En [7], se usa la programación genética para predecir la rugosidad, considerando como variables de entrada la v_c , el f , la a y las vibraciones. En [9], Colak y otros, usan el *Gene Expression Programming Method*, "GEPM" para predecir la rugosidad superficial en fresado, relativo a los parámetros de corte.

Otro trabajo encontrado en el campo de la EC [13], utiliza una nueva técnica, el PSO (*Particle Swarm Optimization*), para implementar un modelo para predecir la rugosidad. Las entradas son f , v_c y a . De acuerdo con el autor, los modelos construidos con redes neuronales y lógica difusa tienen sus limitaciones, pues no proveen ecuaciones matemáticas apropiadas para mostrar las relaciones entrada-salida, mostrándose como cajas negras. El PSO permite determinar ecuaciones matemáticas. Otra técnica se realiza a través del uso de redes abductivas, donde la información numérica es modelada a través de razonamiento abductivo. En [23], se desarrolla un modelo predictivo para determinar ciertas condiciones de corte (v_c , f y a), y obtener un valor de rugosidad deseado y el valor de la fuerza de corte.

Algunos autores combinan diferentes metodologías, en el campo de la IA, como es el caso de [2], donde se desarrolla un sistema basado en el conocimiento, para predecir la rugosidad superficial en el proceso de torneado. Se hace uso de redes neuronales y de la teoría de conjuntos difusos, como técnicas complementarias.

- Modelos desarrollados por medio de la combinación de metodologías: En [32], se presenta el desarrollo de un modelo que involucra el ángulo de desprendimiento radial y el radio de la punta de la herramienta, junto con otros factores. Se lleva a cabo, en primer lugar, el desarrollo de un modelo analítico basado en resultados experimentales usando el RSM, y luego se emplean los GA para optimizar el modelo, y así obtener la mejor calidad superficial posible.

Otros autores realizan la combinación de la experimentación con el desarrollo de modelos analíticos. Un ejemplo se presenta en [29], que se centra en el estudio de la optimización de los parámetros de corte para minimizar la rugosidad en el corte en oposición en fresado. Para lograr el objetivo, se utiliza una parte experimental y luego se lleva a cabo un desarrollo matemático, donde se obtienen modelos para determinar el Ra y el Rt , y para optimizar la v_c y el f . En [1], se quiere estudiar una correlación entre la rugosidad y las vibraciones en el torneado y determinar modelos matemáticos basados en parámetros de corte y vibraciones de la máquina herramienta. Se lleva a cabo un diseño factorial completo.

Algunos trabajos usan la combinación de RSM con algoritmos genéticos. Los autores mencionan que este tipo de combinación presenta muy buenos resultados. En [1], los resultados obtenidos mediante un diseño de experimentos, se utiliza para desarrollar un modelo matemático por medio de RSM, por el método de regresión. Una vez obtenido el modelo con RSM y regresión, se utiliza GA para predecir valores máximos y mínimos de la rugosidad. Este trabajo permite tener un rango de valores de la rugosidad y sus correspondientes condiciones óptimas de mecanizado para un cierto rango de parámetros de entrada. Oktema y otros, en [28], presentan el desarrollo de una metodología que ellos denominan “efectiva” para determinar las condiciones óptimas de corte, utilizando RSM y GA. Se usa RSM para desarrollar un modelo analítico en términos del f , la v_c , la a tanto axial como radial y luego con este modelo se usa GA para optimizar los valores de corte y poder obtener la rugosidad deseada.

5. CONCLUSIONES

Se ha visto que la mayoría de los modelos sólo tienen en cuenta los parámetros de corte, como son el avance, la velocidad de corte y la profundidad de corte, y no consideran otros factores que contribuyen con los mecanismos de formación de la rugosidad, y que son importantes en procesos como el acabado. Algunos de estos factores son: las vibraciones, el desgaste de la herramienta, la flexión de la herramienta, y los fenómenos térmicos.

La mayoría de los modelos encontrados se comportan como cajas negras, donde el conocimiento del proceso no es transparente. Los que más prometen son los teóricos y los de inteligencia artificial. Se dice que es válido combinar los teóricos con la inteligencia artificial, pero en la presente revisión no se ha encontrado ningún estudio y se propone la utilización de modelos combinados, como una buena estrategia.

A pesar de que en los últimos años se ha encontrado mucha investigación en este campo, acompañada de muy buenos resultados, es importante concluir que el tema debe aún ser estudiado más profundamente, pues existen

procesos donde la rugosidad es un factor muy importante (por ejemplo el fresado de paredes delgadas), y se hace necesario controlar las vibraciones para mejorar la rugosidad superficial y la tolerancia dimensional.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABOUELATTA, O., MADL, J. Surface Roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations. *Journal of Materials Processing Technology* 118(2001)269-277.
- [2] ABBURI, N.R., DIXIT U.S. A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2005.
- [3] ALAUDDIN M., EL BARADIE M., HASHMI M.J. Computer-aided analysis of a surface-roughness model for end milling. *Journal of Materials Processing Technology* 55 (1995) 123-127.
- [4] BAEK D.K., KO T.J., KIM H.S. Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41(2001) 451-462.
- [5] BENARDOS, P.G., VOSNIAKOS, G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 833-844.
- [6] BOUZID, W., BEN SALAH, J.L. Influence of machining by finishing milling on surface characteristics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 41 (2001) 443-450.
- [7] BREZOCNIK M., KOVACIC M., FICKO M. Prediction of surface roughness with genetic programming. *Journal of Materials Processing Technology* 157-158 (2004) 28-36.
- [8] CHOUDHURY, I.A., EI-BARADIE, M.A. Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology* 67 (1997) 57-61.
- [9] COLAK O., KURBANOGU C., KAYACAN M. C. Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Materials and Design* (2005).
- [10] CORREA M., RAMIREZ M de J, ALIQUÉ J.R., RODRIGUEZ C.A. Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: técnicas de análisis y modelos.
- [11] CHEN C., TSAO Y. A stability analysis of turning a tailstock supported flexible work-piece. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 18-25.
- [12] DAVIM, J. A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments. *Journal of materials processing technology* 116(2001)305-308.
- [13] EL-MOUNAYRI H., DUGLA Z., DENG H. Prediction of Surface Roughness in End Milling using Swarm Intelligence. *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2003, 220-7.

- [14] FENG, C. X., WANG, X. Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2002) 20:348–356.
- [15] GHANI J.A., CHOUDHURY I.A., HASSAN H.H. Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology* 145 (2004) 84–92.
- [16] GRZESIK, W.A revised model for predicting surface roughness in turning. *Wear* 194(1996)143-148.
- [17] KIM, B.H., CHUB, C.N. Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method. *Computer-Aided Design* 31 (1999) 485–494.
- [18] KOPAC, J., BAHOR, M. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. *Journal of Materials Processing Technology* 92-93 (1999) 381-387.
- [19] KIM, S. K., LEE, S.Y. Chatter prediction of end milling in a vertical machining center. *Journal of Sound and Vibration* (2001) 241(4), 567-586.
- [20] LEE K., KANG M., JEONG Y.H., LEE D.W., KIM J.S. Simulation of surface roughness and profile in high-speed end milling. *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001) 410-415
- [21] LI, H.Z., LI, X.P. A numerical study of the effects of cutter runout on milling process geometry based on true tooth trajectory. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2005)25: 435–443.
- [22] LIN, S.C., CHANG, M.F. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 (1998) 763-782.
- [23] LIN W.S., LEE B.Y., WU C.L. Modeling the surface roughness and cutting force for turning. *Journal of Materials Processing Technology* 108 (2001) 286-293.
- [24] LIPSKI J., y otros. Surface quality of a work material's influence on the vibrations of the cutting process. *Journal of Sound and Vibrations* (2002) 252(4), 729-737.
- [25] LITAK G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process (45). *Caos, Solitons and Fractals* 13 (2002) 1531-1535.
- [26] MUÑOZ-ESCALONA, P. y CASSIER, Z. Influence of the critical cutting speed on the surface finish of turned steel. *Wear* 218 (1998) 103-109.
- [27] OLGAC, N., HOSEK, M. A new perspective and analysis for regenerative machine tool chatter. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 (1998) 783-798.
- [28] OKTEMA H., ERZURUMLU T., KURTARAN H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology* (2005).
- [29] SAI, K., BOUZID, W. Roughness modeling in up-face milling. *International Journal Advanced Manufacturing Technology* (2005) 26: 324–329.
- [30] TOH, C.K. Vibration analysis in high speed rough and finish milling hardened steel. *Journal of Sound and Vibration* 278 (2004) 101–115.
- [31] SURESH, K.R, VENKATESWARA R., DESHMUKH S.G. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 675–680.
- [32] SURESH, K.R., VENKATESWARA R., DESHMUKH S.G. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2005) 26; 1202-1210.
- [33] THOMAS M., BEAUCHAMP Y., YOUSSEF A., MASOUNAVE, J. Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process. *Computers ind. Eng.* Vol 31 (1996) 637– 644.
- [34] VIVANCOS J., ORTIZ J.A., COSTA L., LUIS C.J. Determining factors in the study of the surface roughness in the high-speed milling of hardened mould steel. 8th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT2004, 15-18.
- [35] VIVANCOS J., LUIS C.J., ORTIZ J.A, GONZALEZ H.A. Analysis of factors affecting the high speed side milling of hardened die steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v 162-163, 15 May 2005, 696-701.
- [36] VIVANCOS J., LUIS C.J., COSTA L., ORTIZ J.A. Optimal machining parameters selection in high speed milling of hardened steels for injection moulds. *Journal of Materiales Processing Technology* 155-156 (2004) 1505-1512.
- [37] WANG W., KWEON S.H., YANG S.H. A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniaturized machine tool. *Journal of Materials Processing Technology* 162–163(2005) 702–708.
- [38] ZHOU, X., XI, F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture, Design, Research and Application* 42 (2002) 969-977.
- [39] A Mechanics Based Model for Study of Dynamics of Milling operations. *Meccanica* 35: 89-109,2000.
- [40] FERRÉ, R., VIVANCOS J., COBA M. Characterization of Surface Texture-State of Art. *Reporte Interno PROHIP*.
- [41] MONTGOMERY, D.C. *Diseño y Análisis de Experimentos*. Limusa Wiley, 2002.
- [42] http://es.wikipedia.org/wiki/Inteligencia_artificial