

TESIS DE LA UNIVERSIDAD
DE ZARAGOZA

2024 116

Rafael María Gella Marín

Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes

Director/es

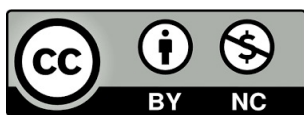
Huerta Talón, José Luis
García Hernández, César

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

ISSN 2254-7606



Premsas de la Universidad
Universidad Zaragoza



Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

DESARROLLO DE TRAYECTORIAS PARA
MECANIZADO Y VERIFICACIÓN DE ENGRANAJES

Autor

Rafael María Gella Marín

Director/es

Huerta Talón, José Luis
García Hernández, César

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

2016

Tesis Doctoral

Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes

Autor

Rafael María Gella Marín

Directores

César García Hernández
José Luis Huertas Talón

Para la obtención del Título de Doctor
por la Universidad de Zaragoza

Zaragoza, Marzo de 2016

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación

ÍNDICE

1. PUBLICACIONES QUE COMPRENDEN LA PRESENTE TESIS DOCTORAL.....	3
2. AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES.....	7
3. AGRADECIMIENTOS.....	13
4. ÍNDICE DE FIGURAS.....	17
5. ÍNDICE DE TABLAS.....	21
6. INTRODUCCIÓN.....	25
6.1. Marco de la Tesis.....	27
6.2. Motivación.....	35
6.3. Presentación de las publicaciones y justificación de su unidad temática.....	37
6.3.1. Presentación de la publicación “Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”.....	41
6.3.2. Presentación de la publicación “Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”.....	51
6.3.3. Presentación de la publicación “Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”.....	59
6.3.4. Presentación de la publicación “Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”.....	67
7. TRABAJOS PUBLICADOS	73
7.1. Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points.....	75
7.2. Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool.....	89
7.3. Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software.....	99
7.4. Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo.....	111
8. MEMORIA.....	119
8.1. Objetivos.....	121
8.2. Aportaciones del doctorando.....	122
8.3. Metodología.....	123
8.4. Conclusiones.....	126
8.5. Trabajos futuros.....	129
9. APÉNDICES.....	131

9.1. Factor de impacto de las revistas y áreas correspondientes a las publicaciones que se incluyen en la Tesis.....	133
9.2. Justificación de la contribución del doctorando si se trata de un trabajo en coautoría.....	135
10. BIBLIOGRAFÍA.....	137
11. RENUNCIA DE LOS COAUTORES NO DOCTORES.....	145

1. PUBLICACIONES QUE COMPRENDEN LA PRESENTE TESIS DOCTORAL

1. PUBLICACIONES QUE COMPRENDEN LA PRESENTE TESIS DOCTORAL

El presente trabajo de Tesis Doctoral lleva por título “**Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes**”. Se presenta como Tesis por compendio de publicaciones de acuerdo a los Artículos 12, 13 y 14 del R. D. 99/2011 de 28 de enero (BOE de 10 de febrero), por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado y al Título IV, Capítulo III del Acuerdo de 20/12/2013, del Consejo de Gobierno de la Universidad de Zaragoza, por el que se aprueba el Reglamento de Tesis Doctorales (BOUZ 10/01/2014).

Las publicaciones que componen esta Tesis Doctoral son las siguientes:

- Huertas Talón, J.L., Gella Marín, R. M., García Hernández, C., Berges Muro, L., López Gómez, C., Marín Zurdo, J. J., & Cisneros Ortega, J. C. (2013). **Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69(1-4), 361-374.

- Huertas Talón, J. L., García Hernández, C., Berges Muro, L., & Gella Marín, R. M. (2014). **Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool**. Computer-Aided Design, 50, 41-50.

- García Hernández, C., Gella Marín, R. M., Huertas Talón, J. L., Berges Muro, L. (2016). **Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software**. Measurement, 85, 1-12.

- Huertas Talón, J.L., García-Hernández, C., Gella Marín, R. M., Berges Muro, L., Valdivia-Calvo, F., Garde Barace, J. J., **Fabricación de engranajes elípticos mediante**

electroerosión por hilo. XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. 24-26 de septiembre de 2014. Málaga, España.

2. AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES



Departamento de
Ingeniería de
Diseño y Fabricación
Universidad Zaragoza

D. César García Hernández, Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña y Profesor del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza,

INFORMA:

Que la tesis titulada "**Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes**", elaborada por **D. Rafael María Gella Marín**, ha sido realizada bajo mi dirección, se ajusta al proyecto de tesis inicialmente presentado y cumple los requisitos exigidos por la legislación vigente para optar al grado de Doctor por la Universidad de Zaragoza. Una vez finalizada, autorizo su presentación en la modalidad de compendio de publicaciones para ser evaluada por el tribunal correspondiente.

Zaragoza, a 9 de marzo de 2016

Fdo.: César García Hernández

unizar.es



Departamento de
Ingeniería de
Diseño y Fabricación
Universidad Zaragoza

D. José Luis Huertas Talón, Doctor por la Universidad de Zaragoza y Profesor del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de dicha universidad,

INFORMA:

Que la tesis titulada "**Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes**", elaborada por **D. Rafael María Gella Marín**, ha sido realizada bajo mi dirección, se ajusta al proyecto de tesis inicialmente presentado y cumple los requisitos exigidos por la legislación vigente para optar al grado de Doctor por la Universidad de Zaragoza. Una vez finalizada, autorizo su presentación en la modalidad de compendio de publicaciones para ser evaluada por el tribunal correspondiente.

Zaragoza, a 9 de marzo de 2016

Fdo.: José Luis Huertas Talón

unizar.es

3. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis directores, los doctores César García y a José Luis Huertas por su gran apoyo a lo largo de los trabajos realizados en esta Tesis Doctoral. Gracias a ellos me he formado no sólo técnicamente sino también personalmente.

Quiero también expresar mi agradecimiento al Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación por la formación recibida.

A mis padres por su cariño y respaldo.

A mis abuelos, ya que siento su apoyo.

Muchas gracias a todos.

4. ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. El polígono de la derecha, al tener más lados, representa con mayor exactitud a la circunferencia.....	42
Fig. 2. Principio matemático.....	43
Fig. 3. Vectores delimitados por puntos de escaneo o generados por cualquier método analítico.....	44
Fig. 4. Sucesión de puntos escaneados.....	45
Fig. 5. Perfil del engranaje recto.....	48
Fig. 6. Ejemplo de representación de un engranaje recto en formato STL.....	52
Fig. 7. Algoritmo para obtener el contorno de una superficie STL.....	53
Fig. 8. Obtención de perfiles antes de generar la espiral.....	54
Fig. 9. Ruta XY para la proyección sobre la superficie STL.....	55
Fig. 10. Aplicación del algoritmo en la fabricación de engranaje.....	58
Fig. 11 Selección de los puntos de control alrededor de un diente.....	60
Fig. 12. Aproximación de la trayectoria del palpador a la evolvente usando arcos de la misma longitud	61
Fig. 13. Corrección de la posición en el plano XY para la verificación.....	62
Fig. 14. Esquema seguido en la verificación del engranaje	63
Fig. 15. Datos de entrada	64
Fig. 16. Flowchart del programa de la MMC	65
Fig. 17. Tres engranajes situados en el área de medición de la MMC.....	65
Fig. 18. Procesado del archivo de medición	66
Fig. 19 Representación de la verificación del perfil del diente de un engranaje.....	66
Fig. 20. Algoritmo para el diseño y fabricación	68
Fig. 21. Algoritmo para hallar los valores de los semiejes a y b en una elipse.....	69
Fig. 22. Elipse primitiva.....	69
Fig. 23. Distribución de los dientes en un engranaje elíptico.....	70
Fig. 24. Los puntos calculados con la hoja de cálculo se importan en CAD.....	70
Fig. 25. Extrusiones y redondeos.....	71
Fig. 26. Puntos postprocesado en un programa de CAM.....	71
Fig. 27. Engranajes elípticos fabricados engranando (a) y (b).....	72

5. ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre el número de líneas y el tiempo de mecanizado según el número de puntos programados para seguir la función amortiguada e importación a un programa de CAD.....	46
Tabla 2. Comparación entre el número de líneas y el tiempo de mecanizado según el número de puntos programados para seguir un perfil en espiral.....	47
Tabla 3. Comparación entre el número de líneas y el tiempo de mecanizado según el número de puntos programados para seguir un engranaje recto.....	48
Tabla 4. Comparación de las longitudes de las trayectorias de la herramienta y número de puntos.....	57

6. INTRODUCCIÓN

6. INTRODUCCIÓN

6.1. Marco de la Tesis

A lo largo de la Historia de la Humanidad se han usado diversos métodos para solucionar los problemas de transmisión de movimiento y potencia, siendo tradicionalmente muy utilizados los engranajes.

Existen numerosos ejemplos en los que se muestra su uso. Uno de los más antiguos (S. II a. C.) es el mecanismo de Anticitera. Este aparato se componía de un gran número de engranajes, y se usaba como un primitivo calendario. Posteriormente, en épocas como en el Renacimiento en Europa, se utilizaron engranajes en relojes y molinos. La transmisión de potencia mediante engranajes ha ido evolucionando y su interés en la industria ha ido creciendo debido a su gran variedad de aplicaciones. Como apunta Goch (2003), en la actualidad su uso es de gran aplicación en la industria automovilística, en la industria del transporte y elevación, en antenas, energía solar y eólica. Como muestra de su importancia, dentro del ámbito de la energía eólica, los engranajes de grandes dimensiones forman parte de los componentes principales en aerogeneradores (Wind Energy Systems, o WES). Se utilizan en los rodamientos para el giro azimutal de la torre (Yaw), en el rotor (Hub), en las palas (Blade), para su correcto posicionamiento en la dirección del viento y en el reductor del generador (Goch et al., 2012).

También está extendido el uso de engranajes en aplicaciones de precisión como transmisiones de pequeñas dimensiones (Goch, 2003). El campo de la micro tecnología está experimentando un rápido crecimiento cada año, usándose engranajes de reducidas dimensiones en la industria médica y en aplicaciones automotrices, donde se fabrican motores eléctricos en miniatura o micro motores y micro posicionadores o reductores de velocidad.

Si bien los engranajes gozan de una excelente posición en el mercado, como indica Goch, (2003), existen áreas en las que es posible aportar innovaciones mediante

investigación. Principalmente la industria demanda innovaciones que permitan reducir los costes de producción y mejore su fiabilidad y vida útil

Por esta razón, la fabricación de estos mecanismos requiere el cumplimiento de diversas especificaciones. El objetivo es obtener un producto con cero defectos en su producción. Sin embargo, los métodos de diseño, fabricación y verificación de engranajes suelen ser complejos, por lo que son de utilidad herramientas que agilicen los procesos de cada una de estas etapas.

Actualmente el proceso de fabricación de prototipos de mecanismos de transmisión de potencia sigue siendo objeto de varios estudios como en Bouquet et al., (2014) por diferentes tecnologías como fresado, láser, o electroerosión por hilo. Este último caso permite el trabajo sobre diferentes materiales (como sinterizados) tamaños y precisión aplicado al campo de los engranajes.

Tradicionalmente el tallado de engranajes se clasifica en dos grupos: mecanizado por reproducción y mecanizado por generación.

Si el mecanizado es por reproducción, con los datos del engranaje se seleccionará la herramienta cuyo borde cortante será la reproducción exacta del hueco entre dos dientes.

Si el mecanizado es por generación, la talladora hará que el movimiento de la herramienta y de la pieza realice el engrane del movimiento que seguirían dos engranajes, uno de los cuales es la herramienta y el otro la pieza sobre la que se mecanizará el perfil del engranaje.

Actualmente se está desarrollando un tercer método, basado en el uso de maquinaria convencional de control numérico (CNC), para hacer posible que herramientas estándar consigan el perfil del diente del engranaje, a partir de los movimientos programados para la máquina herramienta. Es en este tercer método en el que se pretende aportar innovaciones mediante el trabajo de esta tesis. En el tallado CNC es posible adaptar el mecanizado de la máquina herramienta (fresadora, torno con herramienta motorizada, electroerosión) a diferentes tipos de engranajes, facilitando la versatilidad en la producción. Esto proporciona la oportunidad de investigar mejoras en la fabricación y en el control de calidad en este método de tallado, enmarcándose de esta manera estos trabajos en el campo de investigación de la fabricación y verificación de engranajes.

Existe un cuarto método de fabricación, el cual se lleva a cabo mediante fabricación aditiva. En este caso es posible realizar la transición de la fase de diseño a la de fabricación utilizando materiales diversos como poliamida, o plásticos como ABS o PLA o materiales metálicos como aleaciones de hierros, aluminio o titanio. La fase de diseño en este método es también considerada en este trabajo.

Como se indica en Álvarez et al (2015), actualmente el mecanizado de engranajes en máquina de propósito general es un campo de investigación de gran demanda en las empresas. Ello es debido a que las ventajas que aporta el uso de una máquina de propósito general son, entre otras, la elevada calidad, su adecuación a la fabricación de engranajes complejos, la utilización de herramienta estándar, la flexibilidad en geometría y tamaño e incluso la posibilidad de la inclusión de la tecnología multitarea.

Se apunta asimismo en este artículo el proceso global del mecanizado de engranajes en máquina de propósito general, usando un software de diseño del engranaje y un software CAD/CAM para diseñar las estrategias de mecanizado.

El primer paso en el mecanizado de engranajes por CNC es partir de sus especificaciones técnicas: módulo, número de dientes, corrección del dentado, corrección de cabeza y la altura del diente. Si se trata de engranajes especiales como los cónico-helicoidales o los hipoides, son necesarios datos adicionales como el ángulo de giro de la hélice o la conicidad. Con estos datos de entrada se pueden obtener los puntos que definen geoméricamente su perfil y modelizar el engranaje mediante un programa CAD, es decir, una representación en 3D del engranaje.

Se han publicado muchos tratados sobre la matemática que rige el diseño, generación y cinemática de los engranajes (Litvin et al., 2004, Jones et al., 1961 y Villava, 2010), y sobre cómo resolver las ecuaciones que plantean su uso. Litvin et al., (2009) y Bloomfield, (1960), se centran en el diseño de la geometría y cinemática que definen los engranajes no circulares. Estos textos pueden ser complementados con los aportes indicados en del Río et al., (2007): se trata de una guía para aprender a programar y resolver las ecuaciones que se explican en los libros anteriores.

Otro método para obtener los puntos que definen geoméricamente el perfil es, en el ámbito de la ingeniería inversa, digitalizar la superficie de un engranaje previamente generado, obteniendo así la nube de puntos para posteriormente reconstruir en un

programa CAD el engranaje. En este caso, existen varios métodos para digitalizar un perfil o una superficie:

- 1) Usar una máquina de medir por coordenadas (MMC) (Cho et al., 2002).
- 2) Utilizar un láser en la MMC en lugar del palpador mecánico (Shiou et al., 2002).
- 3) Por medio de un láser tracker (Zhao et al., 2005).
- 4) Emplear un sistema de medición por cámara (Hu et al., 2013).
- 5) Utilizar instrumentación desarrollada específicamente para medir perfiles (Kang et al., 2010).

Barbero et al. (2011), proporcionan además una comparativa de diversas técnicas de digitalización, ofreciendo sus ventajas y desventajas para obtener la máxima eficacia.

La aplicación de estas técnicas se muestra en Efstathiou et al., (2012), donde partiendo de un mecanismo roto que se desea reproducir, se miden y se obtienen las dimensiones geométricas aplicando relaciones matemáticas clásicas.

Tras digitalizar un perfil o una superficie o generar los puntos usando la función que define el perfil o la superficie (si admiten una ecuación), se dispone de un elevado número de coordenadas de puntos y, como consecuencia, un gran volumen de datos. Por ejemplo, los escáneres portátiles comerciales de última generación permiten captar un alto número de puntos por segundo en tiempo real, obteniendo una gran cantidad de información que es necesario procesar para reproducir la pieza escaneada. Trabajar con esta nube de puntos para poder postprocesar el perfil del engranaje exige un gran coste computacional que puede ralentizar el trabajo del técnico. Sin embargo, no todos los puntos aportan la misma calidad de información, siendo posible filtrar y seleccionar los puntos más importantes. Es decir, seleccionar los que aportan información significativa para la reconstrucción de la forma mediante un programa de CAD. Como resultado, para una calidad dada, se obtendrán un menor número de puntos o de líneas, lo que implica una velocidad de proceso mayor.

Dicha preocupación por filtrar los puntos más significativos de una nube de puntos es tratada por Corley et al., (2006), Budak et al., (2011), Ma et al., (2011), y Zhang et al., (2012).

Una vez obtenido el CAD del engranaje, el segundo paso es traducir este modelo 3D al lenguaje de programación de la máquina que lo fabricará. Para ello se utiliza un

programa de fabricación asistida por ordenador (Computer Aided Manufacturing, o CAM) con el cual se obtienen las trayectorias que debe seguir la talladora para mecanizar el engranaje. Es muy importante la elección de la máquina adecuada, ya que condiciona el proceso de la fabricación. Existen diferentes tecnologías de fabricación que se pueden utilizar para fabricar distintos tipos de engranajes.

En el caso de engranajes recto-cónicos o cilíndricos y no circulares rectos, es posible su fabricación mediante láser o por prototipado rápido (Tsai et al., 1999), electroerosión (Talón et al., 2006, Gupta et al., 2013 y Gupta et al., 2014), o por corte por agua (Axinte et al., 2009).

Para fabricar engranajes, además de los anteriormente mencionados e incluyendo otros tipos, como helicoidales, cónico-helicoidales o hipoides, la opción a la que se suele recurrir es el mecanizado. Kang et al., (1996), Ivanov et al., (1998), Litvin et al., (2001), Chen et al., (2005), Hsieh et al., (2006) y Zhang et al., (2010), analizan diversas técnicas de generación de las superficies de distintos tipos de engranajes y diferentes métodos de mecanizado.

En el caso del mecanizado, el uso de la fresa es una técnica en cuyo estudio se puede profundizar y en la cual se puede automatizar el proceso de generación del engranaje (como en la serie 30i-Modelo A de Fanuc, Talón et al., (2009) y en Talón et al., (2006)).

La fabricación de engranajes por métodos alternativos al tallado con fresas de forma o fresas madre ha sido estudiado en Lee et al. (2001), y Ozel, et al. (2005). Ozel, (2012) ha estudiado asimismo el error cometido en la selección de los puntos elegidos para definir la trayectoria de mecanizado.

Como se puede observar, en la fabricación mediante mecanizado el estudio de las trayectorias de la herramienta es un factor muy importante para asegurar un buen acabado. No todos los puntos que componen las trayectorias son igualmente importantes. Se necesitan más puntos en las zonas del perfil en las que la curvatura es mayor y menos puntos en las que la curvatura es menor para poder definirlo adecuadamente. Un alto número de puntos en las trayectorias implica una mayor cantidad de información que es necesario manejar por el programa CAM y el Control Numérico por Computador, lo cual puede encarecer o ralentizar los procesos de diseño y productivos. Mediante un adecuado conocimiento en este ámbito es posible reducir el

tiempo de procesado sin pérdida de calidad dimensional y obtener un buen acabado superficial.

Por lo tanto, el campo de la optimización de las trayectorias del mecanizado es muy importante para obtener un buen producto final. Así, Chen et al. (2002), estudian cómo obtener trayectorias de mecanizado evitando interferencias. Chen et al. (2008) investigan además cómo segmentar las pasadas de la herramienta usando polígonos (siendo el triángulo el elemento más usado) y cómo se pueden así mejorar los sistemas CAM.

Existen modelos de trayectorias en los que la herramienta debe acercarse y alejarse de la pieza con los problemas que conlleva el contacto entre la herramienta y el material mecanizado. Uno de estos problemas es la generación de marcas de mecanizado en la superficie. Estas marcas se pueden evitar en parte si la herramienta realiza entradas tangenciales para las trayectorias de mecanizado, si bien pueden aparecer brillos en las zonas de contacto inicial de la herramienta con la pieza. Además, esto causa otro problema: el aumento de tiempo de mecanizado.

Las trayectorias espirales eliminan estos problemas y permiten el mecanizado continuo de la pieza, como indican Held et al. (2009). También se pueden utilizar curvas como las B-splines. Este tipo de trayectorias se aplican por ejemplo en la industria del calzado (Lee R. T. et al., 2002). Quinsat Y. et al. (2006), estudian además las trayectorias de la herramienta incluyendo parámetros como la rugosidad.

Dentro del estudio de la optimización de trayectorias es muy importante considerar los parámetros de la calidad, del tiempo y del error en el mecanizado. Lu B. et al. (2013) y Azaouzi M. et al. (2012) desarrollaron estrategias de mecanizado para reducir el tiempo de fabricación en el conformado incremental de chapa. Hsieh et al. (2013) proponen algoritmos para trayectorias de la herramienta teniendo en cuenta el error en el mecanizado.

Como se puede observar, la optimización de las trayectorias del mecanizado es un campo en el que la investigación es muy demandada por las empresas. Solamente en el campo de los árboles de transmisión y engranajes se producen fresas de plaquitas orientadas al mecanizado de engranajes y software para el fresado de engranajes rectos y helicoidales. Ello es debido a que con los aportes que se pueden proporcionar en el

campo de la investigación, desarrollo e innovación, es posible ahorrar costes, reducir tiempos de mecanizado, optimizar la planificación y mejorar la calidad del producto acabado, como apuntan Álvarez et al (2015). Por esta razón se sigue trabajando actualmente en el desarrollo de nuevas aplicaciones y métodos conjuntamente con empresas con fines industriales, que dedican un porcentaje de su facturación a I+D+i y desarrollan como resultado numerosas patentes anualmente.

Finalmente, cuando ha terminado el proceso de fabricación, es necesario realizar una verificación dimensional para asegurar que el engranaje fabricado cumple con las especificaciones indicadas para satisfacer con el control de calidad. Además, como indica Goch et al. (2013), es necesario que el equipamiento utilizado para la verificación permita obtener resultados de calidad dentro de tiempos y costes razonables para el proceso productivo global.

Existen muchos métodos para verificar los parámetros dimensionales, desde los clásicos (Carro de Vicente Portela, 1978) en los que la medición se realiza manualmente con rodillos, bolas, micrómetro de platillos pie de rey de doble corredera, inspección mediante engranajes maestros y patrones (Gosch, 2003), etc., hasta los más avanzados tecnológicamente, en los que se puede realizar la medición bien por medios ópticos como por ejemplo la interferometría láser (Fang et al., 2011) o bien realizar la medición por palpado, como la máquina de medir por coordenadas (MMC).

La máquina de medir por coordenadas es, mediante el software y el hardware adecuado, uno de los métodos más versátiles para verificar el perfil de un engranaje debido a que es posible automatizar el proceso de medición (Boukebbab et al., 2007). Goch, (2003) indica además que el gran paso que se dio en la verificación de la calidad fue la introducción MMCs para la verificación no sólo de los engranajes sino también de las herramientas que se usan en su producción. Mediante el uso de la MMC, se reduce significativamente los factores de incertidumbre y el tiempo necesario en la medición y permite obtener mayor cantidad de información que no depende de factores subjetivos como por ejemplo la persona que realice la medición.

El uso de la MMC para medir engranajes o piezas en general sigue varios pasos. En primer lugar, se alinea la pieza con respecto a un sistema de coordenadas de referencia. A continuación, se realiza la medición del perfil, áreas o superficies seleccionadas del engranaje, bien por contacto mediante el palpador de la MMC o bien por métodos sin

contacto, como se ha indicado anteriormente como por ejemplo usando un láser en la MMC en lugar del palpador mecánico. Finalmente se evalúan los puntos medidos para poder emitir un resultado sobre la medición.

En los engranajes modernos se efectúan modificaciones sobre el flanco del diente tales como la corrección del perfil o la corrección de cabeza con objeto de poder adaptarse a las necesidades de la aplicación (Como por ejemplo desplazar la línea de actuación o facilitar la entrada y salida del diente al engranar). Por esta razón, es necesario conocer la matemática que rige el diseño de los flancos de los dientes, como se recoge en Litvin et al., (2004) y Litvin et al., (2009) y de esta manera poder programar las trayectorias de medición de la MMC.

Existe software comercial específico para verificar la calidad de los engranajes mediante la MMC que facilita al usuario el proceso de medición del engranaje. Este software debe ser adquirido por separado, debiéndose en ocasiones incluso actualizar el hardware de la MMC, con el consiguiente desembolso económico.

Sin embargo, la MMC, con el software y el hardware adecuado permite aplicar un método muy versátil para verificar el perfil de un engranaje e, incluso, toda la superficie del flanco de los dientes de un modo comparable al llevado a cabo con máquinas de medición dedicadas en exclusiva a engranajes. Ello es debido a que, frente a máquinas de medición cuyo método de trabajo es cerrado, es posible personalizar las rutinas de medición en una MMC para centrar la verificación en los puntos críticos de la pieza que se desean evaluar. Para este fin ya se proponen métodos ópticos sin contacto de un palpador. Usando estas diferentes tecnologías descritas en la norma de medición de engranajes (UNE 18-048-83), es posible verificar si la fabricación de un engranaje cumple los requisitos indicados. Como se indica en Goch, (2003), la metrología por contacto usando la MMC ha evolucionado hasta un punto en el cual las mejoras que se demandan son una mayor funcionalidad y eficiencia productiva para realizar verificaciones dentro de los tiempos productivos establecidos.

6.2. Motivación

La motivación de esta Tesis surge a partir del deseo de desarrollar una línea de investigación en la cual se generen nuevos métodos de fabricación y verificación que permitan agilizar el trabajo de diseñadores, investigadores y operarios. Su objetivo es recorrer los pasos que componen el proceso productivo y aportar mejoras en las diversas etapas de producción que sean útiles para su aplicación en la industria, especialmente en el mantenimiento o en la fabricación de series cortas.

Los trabajos presentados parten de investigaciones y colaboraciones con empresas, previamente iniciadas por los Directores de Tesis. Talón et al., (2007) comienza el análisis de la selección de los puntos que más información aportan para reconstruir en CAD un perfil o para mecanizarlo por control numérico. Seguidamente, Talón et al. (2010) profundiza en la matemática necesaria para generar el perfil de un engranaje recto. Finalmente, Talón et al. (2006) se centra en optimizar las trayectorias de mecanizado para tallar un perfil aerodinámico. Estos trabajos previos y los presentados surgen de la colaboración conjunta con industrias del sector del metal.

Al comenzar a desarrollar esta tesis el primer paso fue asimilar estos trabajos previos para obtener un punto de partida de las técnicas y métodos generados. Se estudiaron previamente las herramientas y métodos utilizados en las fases del diseño, fabricación y verificación para tener una visión global del proceso productivo. Con este conocimiento se pudo posteriormente profundizar en cada una de las fases del proceso productivo de engranajes en máquina de propósito general para analizar qué innovaciones diferenciadoras era posible aportar.

1) La primera fase es el diseño del engranaje, en la cual se genera el modelo CAD. Dicho modelo puede generarse a partir de las ecuaciones matemáticas que rigen su diseño o escaneando un engranaje previamente fabricado. La generación de este modelo exige la gestión un gran número de puntos. Por esta razón, una adecuada selección de los puntos que más información de calidad aportan puede agilizar el proceso de generación del modelo CAD.

2) La segunda fase es, usando el modelo CAD, diseñar las estrategias de mecanizado mediante un programa CAM, es decir las trayectorias que debe de seguir la máquina de propósito general. Este punto es de gran importancia, ya que el uso de trayectorias no óptimas puede encarecer el proceso productivo incrementando los tiempos de fabricación o generar piezas con acabados superficiales deficientes. Por esta razón la optimización de las trayectorias de mecanizado puede mejorar el proceso de fabricación.

3) Una vez que el mecanizado del engranaje ha finalizado, la siguiente fase del proceso productivo es el control de calidad, en el cual se verifica que el producto fabricado cumple con las especificaciones del cliente. La investigación en herramientas y aplicaciones orientadas a este proceso ayuda a asegurar la obtención de un producto que cumpla con los parámetros de calidad establecidos.

Estas fases se analizaron usando como producto base los engranajes rectos debidos a que era el producto del que partían las investigaciones previas realizadas por los Directores de tesis. Con objeto de ampliar el alcance de las innovaciones que se deseaban aportar, a lo largo del desarrollo de los trabajos se profundizó en el conocimiento de los engranajes rectos para aplicar y adaptar la experiencia adquirida y extender las innovaciones en la fabricación a engranajes no circulares.

Para el desarrollo de los trabajos se partió de conocimientos previos en CAD, postprocesado CAM, tratamiento de datos usando macros de hojas de cálculo o lenguajes de programación de cálculo técnico de alto nivel y de la programación de aplicaciones informáticas. A lo largo del desarrollo de estos trabajos se ha profundizado en el uso de estas herramientas y en las etapas correspondientes a la producción de engranajes. Se han desarrollado métodos que optimizan el mecanizado, herramientas de software para fabricar distintos tipos de engranajes y se ha programado una aplicación que verifica la calidad del producto final.

6.3. Presentación de las publicaciones y justificación de su unidad temática

Las publicaciones presentadas en este trabajo de Tesis Doctoral se enmarcan dentro de los procesos de diseño, fabricación y verificación de engranajes, y como se ha indicado anteriormente, son las siguientes:

- **Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points.**
- **Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool**
- **Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software**
- **Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo**

Realizan un recorrido a lo largo de los procesos que componen su manufactura aportando mejoras. Comienzan estudiando el desarrollo de trayectorias para el mecanizado de perfiles, proporcionando métodos y herramientas que optimizan el tratamiento de datos en las aplicaciones informáticas mediante las cuales se genera el perfil de la superficie de un engranaje y que posteriormente se postprocesa para mecanizar.

En “**Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points**” se analizan los métodos existentes para digitalizar un perfil o superficie y se propone una metodología en la cual partiendo de un perfil escaneado previamente, se seleccionan los puntos que más información aportan al perfil para reconstruirlo mediante CAD o para su mecanizado por control numérico. Esta metodología se implementa en una aplicación y se evaluó mediante experimentos en laboratorio.

Tras digitalizar el perfil y seleccionar los puntos más representativos, el siguiente paso para seguir el proceso de fabricación es estudiar las trayectorias de mecanizado. En “**Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool**” se analizan las diferentes estrategias de mecanizado usadas actualmente y se desarrolla una técnica mediante la cual se optimiza el recorrido de la herramienta y por lo tanto el tiempo de mecanizado, y mediante la cual es posible

obtener un buen acabado superficial. Esta técnica se implementa también en una aplicación y se evalúa mediante experimentos en laboratorio.

Una vez completado el proceso de fabricación, la atención se centra en desarrollar aplicaciones que apoyen el proceso de verificación de calidad del producto fabricado, centrándose en la verificación de engranajes rectos. En **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** se analizan las herramientas existentes para verificación de engranajes. Son herramientas automatizadas basadas en módulos específicos que deben ser adquiridas adicionalmente y que no permiten personalización por parte del usuario. Se presenta una aplicación informática, desarrollada mediante software abierto específicamente para la verificación de engranajes rectos usando una máquina de medir por coordenadas. Al ser desarrollada mediante software abierto permite la personalización de los puntos más críticos en la fabricación que se desean verificar. Esta aplicación se ha desarrollado siguiendo las especificaciones de verificación de la norma UNE 18048:1983. Esta aplicación se ha verificado mediante experimentos en laboratorio.

Finalmente, con los conocimientos adquiridos en los trabajos anteriores en desarrollo de trayectorias de mecanizado de engranajes rectos, se aplica la experiencia obtenida para ampliar el campo de fabricación estudiado y proporcionar métodos y mejoras en el mecanizado de engranajes no rectos. En **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** se presenta un método implementado y verificado en laboratorio que permite el uso del CAM, previo diseño en el CAD, para la fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo y que es aplicable a corte por agua, corte por láser o mecanizado y mediante el cual el desarrollador puede controlar el diseño del engranaje y los métodos de fabricación para asegurar un mejor acabado del engranaje.

Es posible además dividir los trabajos presentados según su temática, como se muestra a continuación.

Dentro de la temática de diseño y fabricación se incluye la publicación **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”**. Este trabajo se centra en el tratamiento de los puntos que componen el perfil de una superficie que se procederá a fabricar. Estos puntos que componen la llamada nube de puntos se postprocesarán con la máquina-herramienta para mecanizar la superficie que describen.

Como se indica en el trabajo, un alto número de puntos puede ralentizar el trabajo de la máquina. Como no todos los puntos aportan la misma información al perfil de la superficie, en este trabajo se ha implementado un algoritmo para seleccionar los puntos más significativos de un perfil y de esta manera agilizar su procesado. Este método se ha evaluado en distintos perfiles, incluyendo el perfil de un engranaje.

Dentro la temática de fabricación se incluye también **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”**. Esta publicación representa el paso siguiente en el proceso de fabricación con respecto al trabajo anterior. Una vez se han seleccionado los puntos más significativos que componen un perfil, la siguiente fase es generar las trayectorias que debe seguir la máquina-herramienta para mecanizar el perfil. En este estudio se implementa y evalúa un algoritmo para reducir el tiempo de mecanizado y se propone su aplicación al mecanizado de engranajes.

La publicación **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”**, se enmarca dentro del campo de la verificación de la calidad dimensional. Mediante técnicas tradicionales y/o incluyendo las técnicas descritas en los trabajos anteriores es posible fabricar un engranaje recto. En el trabajo descrito en esta publicación se desarrolla un método y una herramienta informática para verificar la calidad dimensional de dicho engranaje recto usando una máquina de medir por coordenadas. Durante el proceso de este trabajo se desarrollan los conocimientos necesarios para diseñar engranajes rectos.

La publicación **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** también pertenece a la temática de fabricación. En ella se parte de los citados conocimientos adquiridos en las publicaciones anteriores para el desarrollo de trayectorias en engranajes rectos. Esta experiencia se adapta para desarrollar trayectorias de mecanizado para engranajes elípticos y se evalúa mediante la fabricación por electroerosión por hilo.

6.3.1. Presentación de la publicación “Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”

Como se ha indicado en la introducción, el primer paso en el diseño de un engranaje es, usando datos iniciales como el módulo, el número de dientes, ángulo de presión, desplazamiento del tallado y la corrección de cabeza, definir geoméricamente el engranaje. Con estos datos de entrada se pueden obtener los puntos que definen su perfil y generar el modelo de CAD. Con él se obtiene el programa de CAM con el cual se podrá tallar el engranaje.

Otro método es, en el ámbito de la ingeniería inversa, digitalizar la superficie de un engranaje previamente generado, obteniendo así la nube de puntos para posteriormente reconstruir en un programa CAD el engranaje.

Este primer paso de obtención de la nube de puntos del perfil o de la superficie es de gran importancia en el proceso de fabricación, ya que de ella dependerá en parte la precisión dimensional de los engranajes fabricados.

No todos los puntos que componen la nube son igualmente importantes. Se necesitan más puntos en las zonas del perfil en los que la curvatura es mayor y menos puntos en los que la curvatura es menor para poder definirlo adecuadamente. En esta publicación se presenta un método de selección de los puntos más importantes para reconstruir un perfil basado en el error cordal máximo. Mediante este método se reduce el número de puntos para enviar por Control Numérico por Computador (CNC) a la talladora o para reconstruir el perfil mediante un programa CAD. De esta forma se utiliza menos información, un menor número de puntos o de líneas de programa de control numérico (NC).

Para implementar este proceso de selección de puntos más significativos que definen un perfil se puede usar cualquier lenguaje de programación. En este estudio se ha aplicado para su desarrollo una macro de una hoja de cálculo y un lenguaje de programación de cálculo técnico. Se trata de un algoritmo que puede ser usado fácilmente en cualquier lenguaje informático, lo que proporciona una gran versatilidad para los diseñadores.

En esta publicación se presenta pues el desarrollo del método de selección de los puntos más significativos de un perfil, su implementación en un programa, su aplicación en

diferentes tipos de perfiles con objeto de seleccionar los puntos más importantes y la evaluación de este método comparando el tiempo de mecanización de estos perfiles con la nube de puntos originales y con la nube de puntos obtenida tras aplicar este método.

Si se observa la Fig. 1, se muestran dos circunferencias con aproximaciones poligonales. Cuantos más lados tiene el polígono, con mayor exactitud representará la circunferencia. Esta es la estrategia que se utiliza en diversos programas de CAD/CAM para indicar la exactitud en la representación de curvas.



Fig. 1. El polígono de la derecha, al tener más lados, representa con mayor exactitud a la circunferencia.

De esta manera, los puntos que aportan más información se sitúan en las zonas con mayor curvatura, y los puntos que aportan menos información se sitúan en las zonas de menor curvatura.

En el apartado 3 del artículo se describe el desarrollo del algoritmo para seleccionar solamente estos puntos más significativos o que aportan más peso al trazado de una curva. En la generación del algoritmo se ha decidido usar el coseno de dos vectores tomando como referencia el trabajo de Corley et al. (2006).

Al inicio del proceso en primer lugar se especifica el error cordal admisible en una curva. De esta forma el técnico cuantifica la precisión con la que se aproxima la curva fragmentada en segmentos a la curva real.

Para evaluar la relación entre el número de segmentos en los cuales se divide una curva como la de la circunferencia de la Fig. 1 y el error cordal, se parte de la Fig. 2.

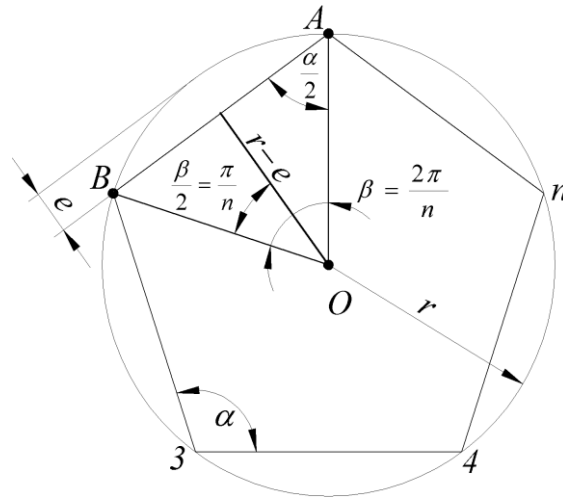


Fig. 2. Principio matemático.

El error cordal está relacionado con el radio de la circunferencia mediante la expresión:

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{r-e}{r} \Rightarrow e = \left(1 - \cos \frac{\beta}{2}\right) r \quad (1)$$

Que se obtiene del triángulo OAB. El ángulo α entre las caras de del polígono se relaciona con el ángulo β entre los radios mediante la expresión:

$$\beta + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{2} = \pi \Rightarrow \alpha = \pi - \beta \quad (2)$$

Sustituyendo en la expresión anterior se obtiene:

$$\cos \alpha = \cos(\pi - \beta) = -\cos \beta = 1 - 2 \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

El error cordal está relacionado con el coseno del ángulo α , el cual se puede obtener a partir del ángulo que forman las cuerdas o los lados del polígono mediante el cual se aproxima la circunferencia. A este primer ángulo se le denomina α_1 . De esta manera, sustituyendo (3) en (1) se obtiene la siguiente expresión.

$$\cos \alpha_1 = 1 - 2 \left(1 - \frac{e}{r}\right)^2 \quad (4)$$

Es necesario indicar que si el error cordal se incrementa, el valor absoluto de $\cos(\alpha_1)$ disminuye. Por lo tanto, una mayor precisión implica un bajo valor del coseno del ángulo entre dos caras o un alto valor absoluto. Hay que indicar además que para obtener un error cordal bajo, α debe aproximarse a π radianes.

Si los lados del polígono mediante el cual se aproxima la curva se convierten en vectores (Fig. 3), el ángulo entre dos caras se define por el producto escalar entre dos vectores. A este ángulo se le denomina α_2 (5).

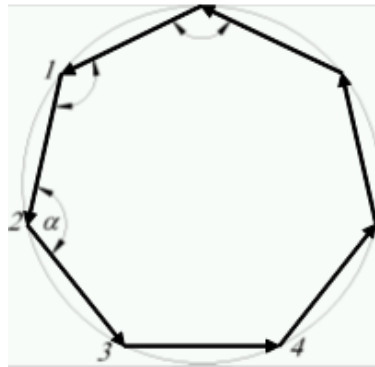


Fig. 3. Vectores delimitados por puntos de escaneo o generados por cualquier método analítico.

$$\cos\alpha_2 = \frac{\mathbf{V}_{12} \cdot \mathbf{V}_{23}}{|\mathbf{V}_{12}| \cdot |\mathbf{V}_{23}|} \quad (5)$$

Como los puntos en la trayectoria se hallan lo suficiente cerca para que coincida el radio de curvatura, cada ángulo α es mayor de 90° , y por lo tanto su coseno es negativo. La situación límite se produce cuando los puntos están alineados. En este caso el coseno es -1, y por lo tanto el ángulo α es 180° .

Como se indica en la Fig. 3, los puntos que delimitan los vectores pueden corresponder a puntos escaneados. Observando la Fig. 4, si los puntos escaneados se hallan lo suficientemente cerca, cada 3 puntos determinan una circunferencia cuyo centro coincide con el centro de curvatura, y su radio r es el radio de curvatura en el entorno

próximo a los puntos. De esta forma, se pueden obtener las circunferencias definidas por los puntos (1, 2, 3), (2, 3, 4) y así sucesivamente.

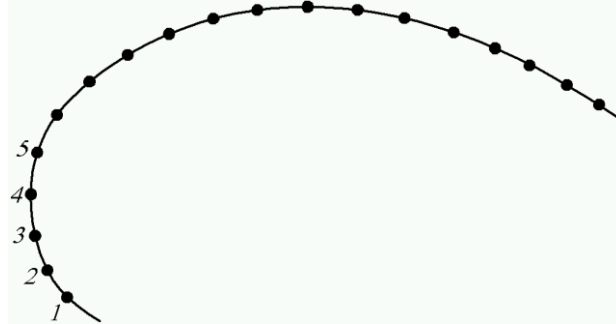


Fig. 4. Sucesión de puntos escaneados.

Es posible escribir un algoritmo que estudie los puntos (1, 2, 3) los cuales pertenecen a la circunferencia de radio r . Este radio se puede obtener porque se conocen los tres puntos de la circunferencia.

El ángulo α_1 calculado en (4) corresponde al error cordal e . Si el ángulo α_2 es mayor significa que el valor real del error cordal es menor que el admitido. Así se cumple:

$$\alpha_2 > \alpha_1 \Rightarrow \cos(\alpha_2) < \cos(\alpha_1) \quad (6)$$

Este método se puede implementar en una macro de una hoja de cálculo y simplificar el proceso de eliminación del punto de la serie. Si el número de puntos es alto, la resolución mediante programación en un lenguaje de cálculo técnico es la mejor opción, ya que simplemente se trata de eliminar el elemento correspondiente en el vector que contiene todos los puntos de la serie.

Todo esto permite que el algoritmo desarrollado sea recursivo y simplifica el seguir avanzando en cada iteración sin necesidad de revisar si un elemento ha sido eliminado. La macro de la hoja de cálculo se encarga de eliminar cada fila innecesaria o bien la programación mediante un lenguaje de cálculo técnico elimina el elemento en el vector

que contiene los puntos. Este algoritmo es aplicable como se indica en la publicación tanto para trayectorias en 2D como en trayectorias en 3D.

Como se describe en el apartado 4 del artículo, para evaluar la validez del algoritmo se decidió mecanizar una serie de perfiles y comparar la diferencia de tiempos de mecanizado entre cada perfil original y el mismo perfil tras aplicar el algoritmo. Se eligieron tres perfiles en 2D y uno en 3D que se mecanizaron con una fresadora de control numérico. Los perfiles fueron los siguientes:

- a) Función amortiguada.
- b) Espiral de Arquímedes.
- c) Evolvente corregida perteneciente al diente de un engranaje recto.
- d) Sillín de bicicleta en 3D.

Se utilizó la siguiente función amortiguada en el intervalo entre 0 y 80 mm para evaluar el algoritmo bajo condiciones extremas, ya que mezclaba zonas de una alta curvatura con otras casi rectas.

$$y = 50 \sin\left(\frac{x}{4}\right) e^{-0.05x} \quad (7)$$

Realizando incrementos en este intervalo de $\Delta x=0.00001$, se necesitaron 800001 puntos. Aplicando el algoritmo desarrollado usando un error cordal de 0.001 mm, se necesitaron 144 puntos.

En la Tabla 1 se muestra la comparativa de tiempos entre usar 144 y 800001 líneas de programa de control numérico.

Avance programado mm/min	Tiempo/avance real		Diferencia de tiempo (segundos) a favor del método propuesto
	Error cordal 1 μm (144 líneas CN)	$\Delta x=0.0001$ mm (800001 líneas CN)	
8000	4/7500	45/667	41
4000	8/3750	45/667	37
2000	15/2000	44/682	29
Importación con programa de CAD			
Tiempo/Kb	Menos de 3 s/149	Más de 13 min/48025	Más de 13 min.

Tabla 1. Comparación entre el número de líneas y el tiempo de mecanizado según el número de puntos programados para seguir la función amortiguada e importación a un programa de CAD.

En el caso de la espiral de Arquímedes, el experimento se realizó con un programa de cálculo técnico. Se obtuvieron los puntos de la espiral usando una longitud de arco de 0.05 mm, siendo el paso de la espiral 10 mm y la longitud total de la espiral que se mecanizó fue de 500 mm. En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en una fresadora FANUC Robodrill. Se puede observar la mejora de tiempos usando el algoritmo.

Avance programado mm/min	Tiempo/avance real		Diferencia de tiempo (segundos) a favor del método propuesto
	Error cordal 1 μm (210 líneas CN)	Arcos de 0.05 mm (10000 líneas CN)	
8000	4/7500	45/667	41
4000	8/3750	45/667	37
2000	15/2000	44/682	29
Importación con programa de CAD			
Tiempo/Kb	Menos de 1 s/208	Más de 10 s/848	9

Tabla 2. Comparación entre el número de líneas y el tiempo de mecanizado según el número de puntos programados para seguir un perfil espiral.

A continuación se aplicó el algoritmo en la evolvente del diente de un engranaje recto. Para la realización del experimento se supuso un engranaje recto de módulo 8, con 20 dientes y con un factor de corrección del dentado de 0.5. Para la obtención de los puntos que componen el perfil del engranaje sólo era preciso realizar un flanco del diente, ya que a partir de él era posible obtener el otro flanco por simetría, obteniéndose un diente completo. Finalmente, realizando 19 copias por rotación se completó engranaje con los 20 dientes. Este procedimiento partió de Talón et al. (2006).

Mediante un programa de cálculo técnico se obtuvieron los puntos que forman el perfil del engranaje y se aplicó el algoritmo para un error cordal de 0.001 mm, con lo que se obtuvo la Fig. 5.

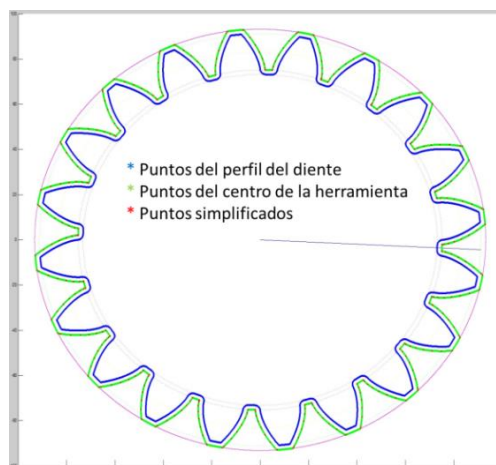


Fig. 5. Perfil del engranaje recto.

A continuación el fichero generado con las coordenadas de estos puntos se importó en una hoja de cálculo y se realizaron los programas de control numérico para mecanizar con la fresadora. Al igual que en los casos anteriores, se evaluaron las diferencias entre los mecanizados para los puntos iniciales y para los puntos simplificados, así como su importación en CAD. Además se realizó una verificación del perfil del engranaje obtenido con una fresa de 4mm de diámetro. Los resultados se muestran en la Tabla 3, mostrando una clara ventaja usando el algoritmo.

Avance programado mm/min	Tiempo/avance real		Diferencia de tiempo (segundos) a favor del método propuesto
	Error cordal 1 μm (400 líneas CN)	Arcos de 0.01 mm (94181 líneas CN)	
2000	21/3500-4500	97/700-800	76
1500	22/2500-3800	97/700-800	75
1000	35/2000	97/700-800	62
Importación con programa de CAD			
Tiempo/Kb	Menos de 1 s/224	Más de 1 min 30s/6256	1 min 30 s

Tabla 3. Comparación entre el número de líneas y el tiempo de mecanizado según el número de puntos programados para seguir un engranaje recto.

Finalmente, se evaluó este algoritmo en la superficie de un sillín de bicicleta en el cual se generaron un total de 230911 puntos con un programa de CAM. Este número correspondía con el número total de líneas del programa de control numérico exceptuando el inicio y el final del programa. Aplicando el algoritmo con un error

cordal de 0.001 mm, el número de puntos necesarios disminuyó hasta 74268 (Aproximadamente un tercio del número de puntos originales)

6.3.2. Presentación de la publicación “Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”

En la publicación anterior se realizó el primer paso en el diseño para fabricación de engranajes. Se partió de un perfil escaneado formado por una nube de puntos y se desarrolló un algoritmo para seleccionar los puntos más significativos del perfil y de esta forma reducir el tiempo de mecanizado. Este método se evaluó en distintos tipos de perfiles, incluyendo el perfil de un engranaje.

En esta publicación se dio el paso siguiente. Una vez optimizado el perfil mediante el algoritmo generado anteriormente, se planteó estudiar las trayectorias que debe ejecutar la herramienta de mecanizado para fabricar el perfil. De esta manera se desarrolló un método para optimizar el tiempo de mecanizado y obtener un buen acabado superficial. Este método se evaluó en el perfil que forma el sillín de una bicicleta y se planteó su aplicación al mecanizado de engranajes.

En primer lugar es necesario definir el formato STL (STereo Lithography) mediante el cual se definen los perfiles que se mecanizaron.

El formato STL es un formato de archivo informático de CAD que define la geometría de objetos 3D sin incluir información adicional como las texturas que incluyen otros formatos CAD. Actualmente este formato es el más usado en el software de control utilizado en impresoras 3D de extrusión de filamento de plástico y en sinterizado por láser. Un archivo STL describe una superficie mediante triángulos. Es un formato universal mediante el cual los técnicos pueden usar las piezas que desarrollen virtualmente en cualquier software de CAD comercial. Por supuesto, al exportar un diseño al formato STL es posible controlar el número de triángulos con los que se aproxima la pieza, controlando de esta manera la precisión de la exportación.

En las superficies STL no se encierra un volumen y sus caras exteriores tienen vectores directores con una componente positiva en Z (Fig. 6), guardándose estas superficies en un archivo de formato binario.

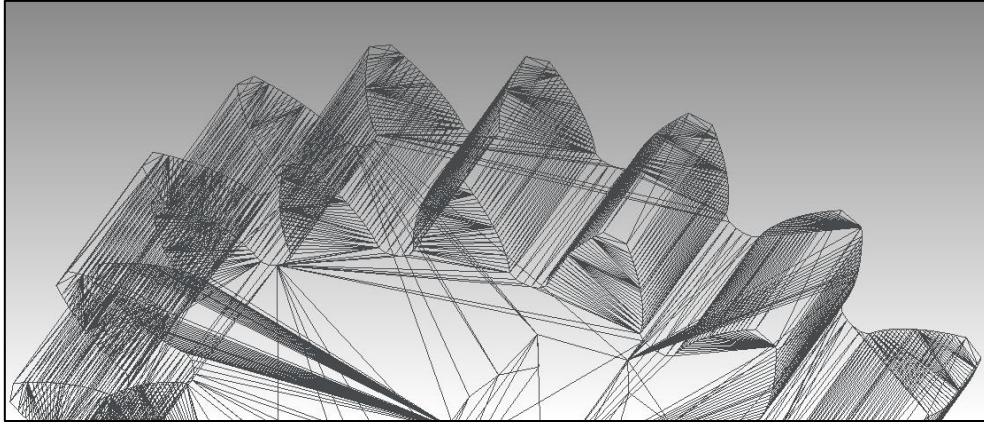


Fig. 6. Ejemplo de representación de un engranaje recto en formato STL.

En el apartado 2 del artículo se describen las operaciones que se deben seguir en este procedimiento:

1. Obtención del contorno de la superficie que se desea mecanizar.
2. Obtención de la trayectoria en 2D de la herramienta y su transformación en espiral.
3. Aplicación de algoritmos para suavizar el perfil.
4. Proyección de los puntos de la trayectoria de la herramienta en 2D sobre la superficie.
5. Cálculo de los puntos de la trayectoria final, x , y , z mediante técnicas no determinísticas.

En la primera operación, obtención del contorno de la superficie, se desarrolla un algoritmo para, partiendo de una superficie STL dada, obtener la polilínea de su perímetro (Fig. 7)

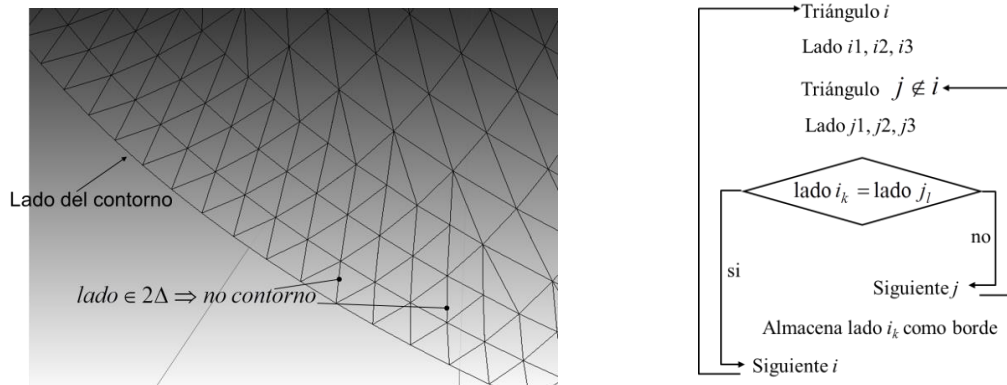


Fig. 7. Algoritmo para obtener el contorno de una superficie STL.

En la siguiente operación, obtención de la trayectoria de la herramienta en espiral, se desarrolla un algoritmo informático para, una vez obtenido el perfil de la superficie, producir las pasadas de contorneado para obtener el fresado.

El algoritmo comienza desde el perfil exterior o contorno de la superficie, considerado como el primer perfil. El objetivo es calcular los siguientes perfiles para ir eliminando el material desde el exterior hacia el interior (Aunque posteriormente, mediante una reorganización, es posible cambiar el orden del mecanizado).

Las trayectorias de mecanizado son perfiles “paralelos” que se obtienen tal como se indica en la Fig. 8, desplazando cada punto una determinada cantidad hacia el interior del perfil en la dirección del eje OX y otra determinada cantidad en la dirección del eje OY , de la misma forma que si se escalase, pero variable en cada dirección. El dato de entrada es la distancia d entre puntos homólogos pero medida en una determinada dirección que depende de la posición del punto. Finalmente, estos perfiles “paralelos” se convirtieron en trayectorias en espiral.

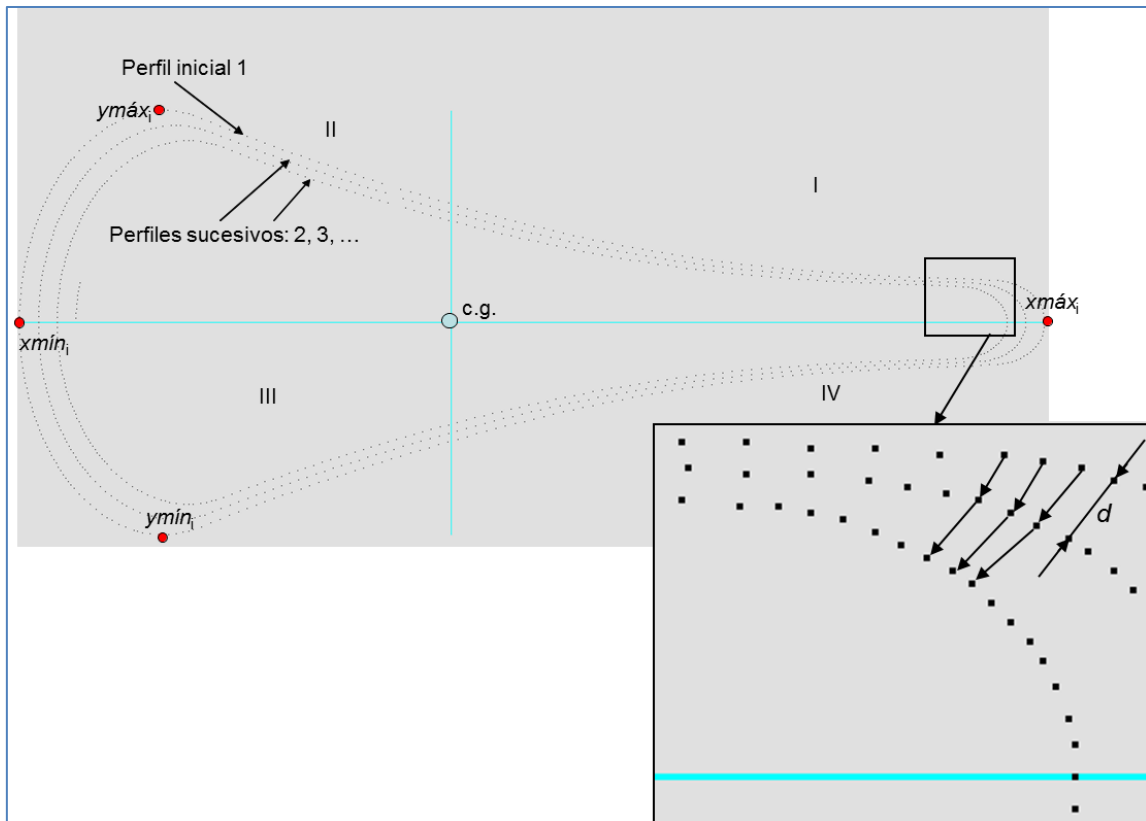


Fig. 8. Obtención de perfiles antes de generar la espiral.

En la tercera operación es posible aplicar algoritmos para suavizar el perfil. El uso de los procesos de suavizado no es nuevo y se ha usado en diferentes campos, como indica McMaster (1989). Por lo tanto, si el perfil es muy abrupto, se puede suavizar con este proceso. Es posible así usar la media de los puntos u optimizar la trayectoria a un mínimo número de puntos (Talón et al., 2013).

Una vez que se realizó el suavizado de acuerdo a la precisión de la malla del STL, puede ser necesario añadir más puntos intermedios. Esto se realiza dependiendo de un step, o paso de precisión de interpolación (distancia entre dos puntos consecutivos), en la dirección de la propia espiral desde un punto al siguiente en el sentido de recorrido. Así, se pueden añadir entre dos puntos iniciales uno o más puntos intermedios.

La cuarta operación es la proyección de los puntos de la trayectoria en espiral sobre la superficie. Los puntos de la trayectoria en espiral 2D obtenidos anteriormente se proyectan sobre la superficie STL teniendo en cuenta el tamaño de la herramienta y se obtiene la tercera coordenada z de cada punto de la trayectoria en espiral.

En la quinta y última operación se calcula la trayectoria final x , y , z de la herramienta usando técnicas no determinísticas. Para calcular la trayectoria de la herramienta en 3D, la trayectoria en 2D obtenida anteriormente se proyecta sobre la superficie que se desea mecanizar, (Fig. 9), teniendo siempre en cuenta las posibles interferencias de la herramienta con la superficie.

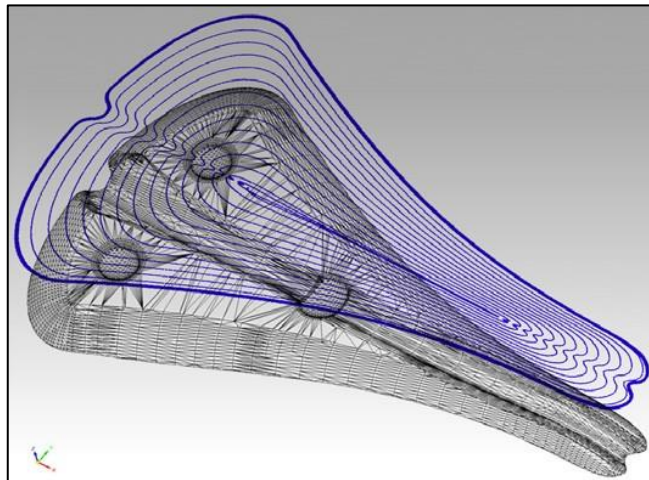


Fig. 9. Ruta XY para la proyección sobre la superficie STL.

En el apartado 3 del artículo se realiza la comparación del algoritmo con tres paquetes comerciales de CAM.

En So et al. (2007), se compara el método desarrollado con software de CAD-CAM comercial para evaluar los resultados de su algoritmo. De manera similar, en este trabajo se contactó con tres expertos en diferentes paquetes de CAM para aplicar la trayectoria en espiral usando su software, con el objetivo de comparar sus resultados con los obtenidos en este estudio bajo las mismas condiciones de mecanizado. Para evitar influenciar en los resultados, no se participó en el proceso de obtención del programa de control numérico con los paquetes de CAM comerciales. De esta

manera, este trabajo fue realizado por un técnico experto en cada paquete de CAM. Así sus resultados pudieron ser considerados como óptimos.

Las condiciones y materiales proporcionados a cada experto fueron los mismos:

- (a) Un archivo STL con la geometría que se debía mecanizar. Este archivo fue exactamente el mismo que se usó para evaluar el método presentado en este trabajo.
- (b) Rugosidad máxima: 20 μm .
- (c) La trayectoria de la herramienta era la misma desde el interior al exterior y viceversa.
- (d) Cada experto debía obtener el programa de control numérico con una sola trayectoria y una herramienta de punta esférica de diámetro igual a 3 mm.
- (e) Las condiciones de mecanizado (avance y velocidad de corte) se definieron previamente para que fuesen las mismas, aunque no eran relevantes en este estudio.
- (f) Solamente se permitió utilizar la interpolación lineal, así que la lista de coordenadas (x, y, z) estaba precedida por la interpolación G01.

Los parámetros que se compararon fueron la longitud de la trayectoria de la herramienta y el número exacto de puntos interpolados. Otros estudios (Quinsat Y., et al., 2008) utilizan la rugosidad como método para comparar resultados, pero se consideró que la longitud de la trayectoria de la herramienta indicaba claramente el tiempo necesario de mecanizado. Además el número de puntos de interpolación está relacionado con el tiempo de procesado del control numérico (Talón et al., 2013).

La longitud de la trayectoria de la herramienta se obtuvo mediante la ecuación (8) utilizando todas las coordenadas de la trayectoria en una hoja de cálculo.

$$l = \sum_{i=2}^n ((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

La Tabla 4 se obtuvo aplicando la ecuación anterior. Esta tabla comparaba las longitudes de las trayectorias de la herramienta y el número de puntos obtenidos con cada paquete comercial de CAM, y, en último lugar, el método presentado en este trabajo.

Como la distancia entre puntos era muy pequeña, el uso de la ecuación (8) proporciona una buena aproximación para la longitud de la trayectoria de la herramienta. El tiempo de mecanizado se obtiene dividiendo la longitud total entre la velocidad de avance. Como consecuencia, la longitud de trayectoria de herramienta más corta se describe en menos tiempo.

El número de puntos influencia el tiempo que necesita la máquina de control numérico para leer toda la información. Si este número es muy alto, el buffer de la función look-ahead se llenará y la velocidad de procesamiento será más lenta. Por este motivo, las trayectorias de la herramienta con un bajo número de puntos son más rápidas.

	Longitud de la trayectoria de la herramienta (mm)	Número de puntos
CAM A	45675	43088
CAM B	37797	34567
CAM C	68728	148005
Nuevo algoritmo	31524	36412

Tabla 4. Comparación de las longitudes de las trayectorias de la herramienta y número de puntos.

Como se ha indicado anteriormente, el método seguido por cada paquete de CAM comercial no se comparó con la rutina presentada en este trabajo, ya que estos programas comerciales están orientados a propósitos generales. Esto quiere decir que los pasos que seguirán para obtener los mismos resultados serán muy similares a los pasos de este algoritmo, pero en este caso, esos pasos se han automatizado para los tipos de superficies presentadas en este trabajo. El método de mecanizado presentado en este artículo se desarrolló y posteriormente se aplicó a la fabricación de un sillín de bicicleta que se verificó con objeto de verificar la validez de este método.

Este algoritmo puede aplicarse también a la fabricación de engranajes como se indica en la Fig. 10. Mediante su aplicación es posible obtener las trayectorias para mecanizar el perfil existente entre dos dientes partiendo de una preforma inicial

pudiéndose obtener, al igual que en el caso del sillín, un buen acabado superficial y un correcto mecanizado de las evolventes de los dientes. Una vez mecanizado el hueco entre dos dientes se debe girar la preforma para mecanizar el hueco siguiente y así sucesivamente hasta fresar todo el engranaje.

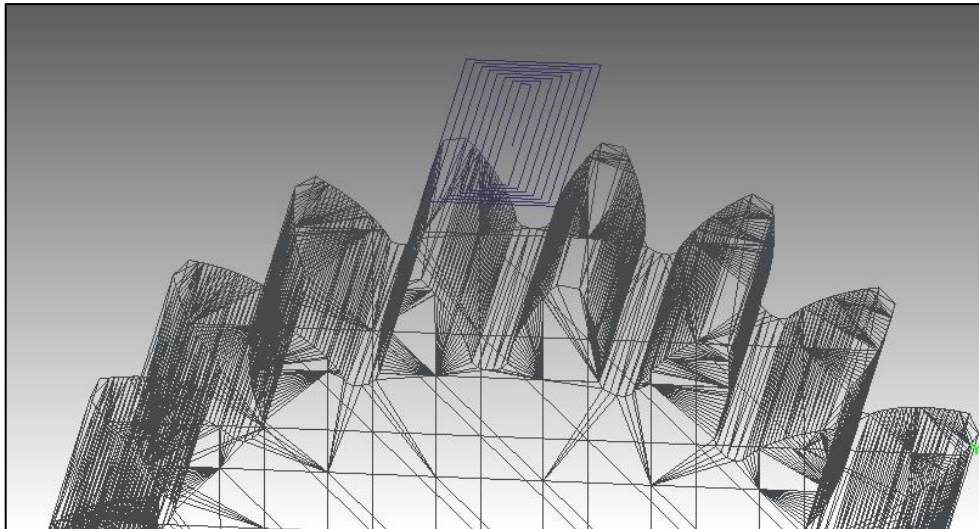


Fig. 10. Aplicación del algoritmo en la fabricación de engranaje.

6.3.3. Presentación de la publicación “Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”

Las publicaciones presentadas anteriormente se han enmarcado en el ámbito de la fabricación del engranaje. En primer lugar se ha generado o digitalizado el perfil que se va a fabricar y se han seleccionado los puntos más significativos con objeto de reducir el tiempo de procesado y el tiempo de mecanizado. Posteriormente se han estudiado las trayectorias que debe recorrer la fresa en el tallado y se ha desarrollado un método para optimizar el proceso de mecanizado.

En la publicación presentada en este apartado se ha abordado el control de calidad del producto fabricado usando una MMC. El software comercial usado para verificación de engranajes en MMC está basado en palpado continuo y es de programación cerrada. En este trabajo se presenta una aplicación que permite al usuario personalizar el proceso de verificación de engranajes usando MMCs de palpado punto a punto. Se presentan los principios matemáticos y geométricos para desarrollar una aplicación para medición de engranajes y describe su implementación usando software de propósito general (open source). Para ello, el software de la MMC es apoyado por una aplicación que calcula las posiciones del palpador y las direcciones de medición. La comunicación entre la aplicación de código abierto y el software la MMC se establece mediante archivos ASCII. Al finalizar este proceso, la aplicación muestra los resultados de medición. Aunque en este trabajo se ha utilizado para la verificación de engranajes rectos, en trabajos futuros es posible ampliar esta herramienta a diversos tipos de ruedas dentadas.

Los puntos que componen el perfil de un engranaje pueden calcularse usando diferentes métodos. En este trabajo el método elegido se basó en elegir la misma distancia entre puntos consecutivos a lo largo del perfil del diente, que es una evolvente.

El trazado de puntos comienza en el diámetro mínimo de medición y termina en el diámetro máximo de medición (Fig. 11). Se añaden tres puntos adicionales:

- 1) La intersección entre el círculo primitivo y el flanco del diente, si no estaba incluido en los puntos previamente calculados.

2) El punto del flanco del diente que se intersecciona con el addendum. Este punto es necesario para evitar colisiones de la trayectoria del palpador con el engranaje.

3) El punto del flanco del diente cruzado por el addendum más dos veces la distancia de seguridad. Este punto evita colisiones cuando el diente es bordeado para empezar a medir el lado simétrico del perfil del diente.

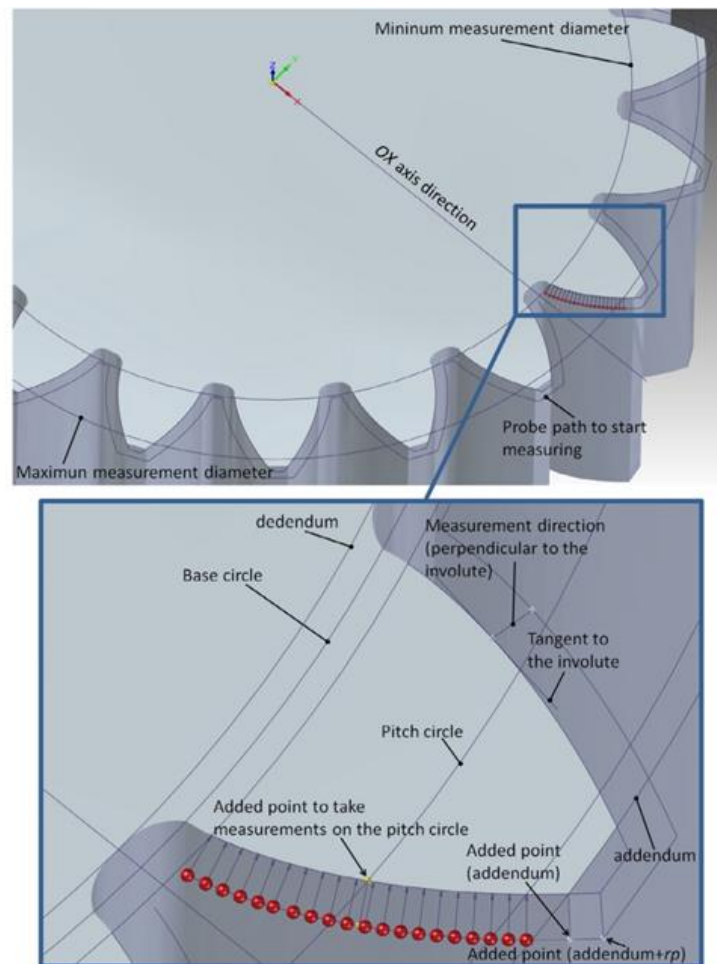


Fig. 11 Selección de los puntos de control alrededor de un diente.

El método descrito para el cálculo de los puntos está basado en las ecuaciones de la evolvente, y su definición puede encontrarse en Litvin, F. L. et al., (2004). El objetivo no es obtener el error cordal mínimo, sino tomar medidas en longitudes equidistantes de arcos. Por lo tanto, de la ecuación de la evolvente, (9), la longitud del arco se calcula con (10)

$$x = r_b * \cos \alpha + \alpha * r_b * \sin \alpha \quad (9)$$

$$y = r_b * \sin \alpha - \alpha * r_b * \cos \alpha$$

$$\int_A^B \sqrt{d^2x + d^2y} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sqrt{(r_b \alpha \cos \alpha)^2 + (r_b \alpha \sin \alpha)^2} = r_b \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha d\alpha = \frac{1}{2} r_b (\alpha_2^2 - \alpha_1^2) \quad (10)$$

Esta ecuación hace posible obtener puntos equidistantemente separados (Fig. 12) para verificar el perfil del engranaje.

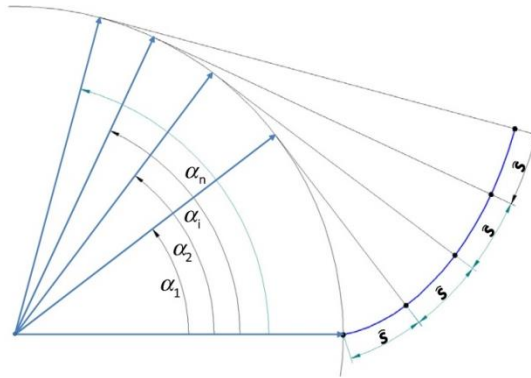


Fig. 12. Aproximación de la trayectoria del palpador a la evolvente usando arcos de la misma longitud.

Para calcular los ángulos de la ecuación paramétrica de la evolvente, es necesario determinar los ángulos iniciales y finales en función de los radios de verificación. Si se denomina r_i al radio inicial de verificación de la evolvente (mayor que el radio base y el radio de dedendum), y r_e al radio extremo para ser verificado (menor que el adendum), estos radios pueden obtenerse de la ecuación (10) tal como se indica:

$$\alpha_i = \sqrt{\left(\frac{r_i}{r_b}\right)^2} - 1 \quad \alpha_e = \sqrt{\left(\frac{r_e}{r_b}\right)^2} - 1 \quad (11)$$

La longitud del arco entre estos dos ángulos se puede obtener con los valores previos de la ecuación (10):

$$\bar{s} = \frac{1}{2} r_b (\alpha_e^2 - \alpha_i^2) = \frac{1}{4} d_b (\alpha_e^2 - \alpha_i^2) \quad (12)$$

Si n es el número de puntos de medición, la longitud de cada segmento de evolvente es:

$$\bar{s}_j = \frac{\bar{s}}{n-1} \quad (13)$$

La expresión (11) permite obtener la expresión recursiva (14) proporcionando el parámetro α para cada punto de medición:

$$\bar{s}_j = \frac{1}{2}r_b(\alpha_2^2 - \alpha_i^2) \rightarrow \alpha_2 = \sqrt{\frac{2\bar{s}_j}{r_b} + \alpha_i^2} \quad (14)$$

$$\bar{s}_j = \frac{1}{2}r_b(\alpha_3^2 - \alpha_2^2) \rightarrow \alpha_3 = \sqrt{\frac{2\bar{s}_j}{r_b} + \alpha_2^2}$$

Este método permite obtener recursivamente los puntos (x, y) que componen el perfil de la evolvente del diente conociendo el parámetro α_i , el radio del círculo base r_b y usando la ecuación (9).

Los puntos que se han obtenido no son válidos para la medición. Es necesario tener en cuenta el radio del palpador junto con la distancia de seguridad requerida. Por lo tanto es necesario calcular la posición del centro del palpador. Para simplificar el proceso, r_p se define como el radio del palpador más la distancia de seguridad (Fig.13).

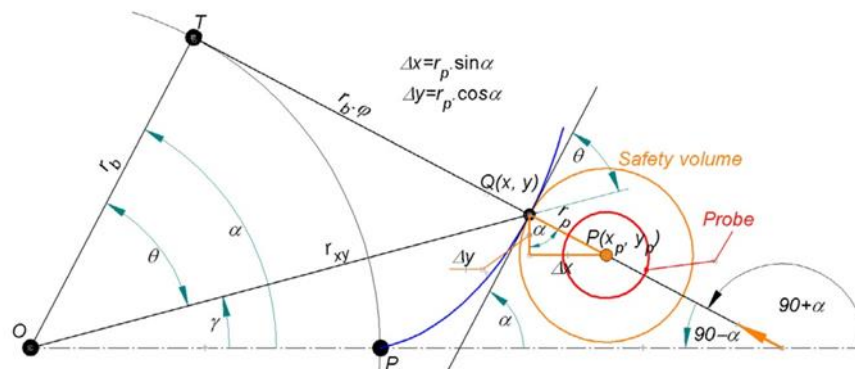


Fig. 13. Corrección de la posición en el plano XY para la verificación.

Adicionalmente, la dirección de medición es dada por los ángulos relacionados con los ejes de la línea perpendicular a la evolvente. Es suficiente si se conoce el ángulo con el eje OX, ya que el eje OZ siempre es 90° y el ángulo OY es el ángulo complementario (La suma de los cuadrados de los cosenos directores es 1).

Según la Fig. 13 y teniendo en cuenta las propiedades geométricas del círculo de la evolvente, las coordenadas corregidas son:

$$x_p = x + r_p \sin \alpha \quad (15)$$

$$y_p = y + r_p \cos \alpha$$

La dirección de medición es dada por el ángulo $90^\circ + \alpha$ con el eje OX. Hay que considerar que la intersección del ángulo OX con el inicio de la evolvente a partir del círculo base no es la orientación más común. En este artículo, el eje OX cruza el hueco interdental. Por lo tanto es necesario realizar una rotación del sistema de coordenadas referencia en la MMC.

La implementación del proceso de verificación tiene tres fases diferentes, según la Fig. 14.

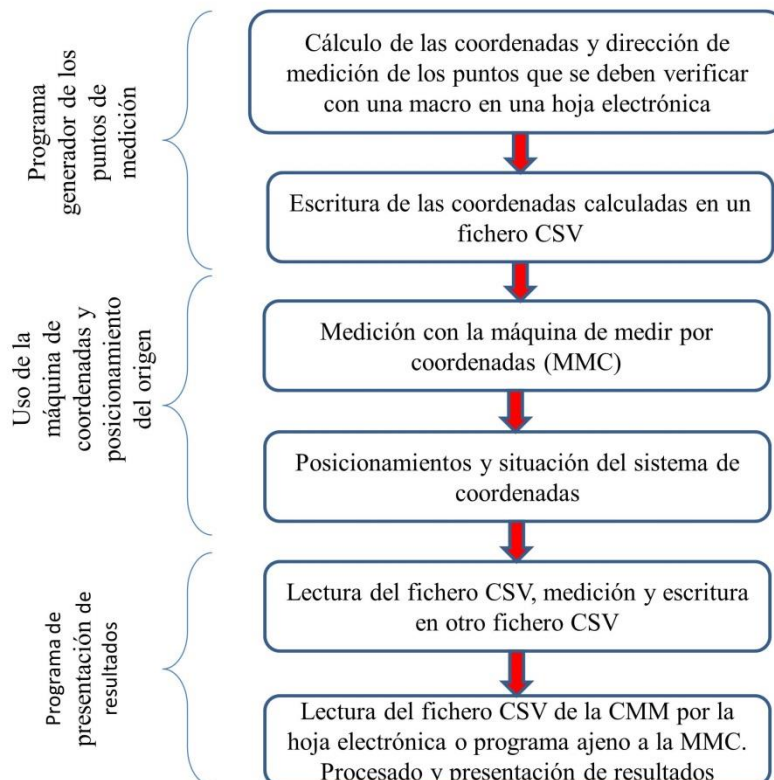


Fig. 14 Esquema seguido en la verificación del engranaje.

Generación de los puntos de medición

Esta fase se basa en las ecuaciones presentadas anteriormente, introduciéndose en una hoja de cálculo usando su lenguaje de programación nativo (Fig. 15).

	A	B	C	D	E
1	GEAR DATA		VERIFY	Verification description	
2	Module m	5			α , rad
3	Correction factor k	0.63			0.3325
4	Number of teeth z	18			-0.1007
5	Pressure angle α	20	degrees		0.3325
6	Initial diameter of involute measurement d_i	85		0 is d_i less than d_f or d_b ? (0 = 'correct')	0.4593
7	Final diameter of involute measurement d_e	104		0 is d_e greater than d_c ? (0 = 'correct')	0.5446
8	Number of measurement points n	6	2.1230	mm is the arc length	0.5580
9	Axial height of involute measurement z_a	-5			0.6417
10	Name of the CSV file to be generated	MSZ18_01_03_14			-0.7157
11	Axial safety height z_s	10			0.7615
12	Initial height to define the OZ axis z_i	-12			0.7904
13	Measuring length to define the OZ axis l_a	8			-0.7904
14	Diameter of reference cylinder d_r	-50		<0 inner cylinder vs. >0 external cylinder	-0.7615
15	Radius or positioning distance r_p	1.5		The probe radius must be smaller	-0.7157
16	Number of coordinate system n_c	1001			-0.6417
17	Number of probe n_p	1			-0.5580
18	Generate CSV file				-0.5446
19	RESULTS FOR THE CSV MEASUREMENT FILE				-0.4593
20	Number of the coordinate system n_c	1001			-0.3325
21	Probe number n_p	1			-0.1007
22	Module m	5			0.4496
23	Correction factor k	0.63			0.6816
24	Number of teeth z	18			0.8084
25	Pressure angle α	20			0.8936
26	Pitch diameter d	96.3			0.9071
27	Addendum diameter d_a	106.3			0.9508
28	Decendum diameter d_f	83.8			1.0647
29	Base diameter d_b	84.57233587			1.1105
30	Tooth height h	11.25			1.1195
31	Initial diameter of involute measurement d_i	85			-0.4413
32	Final diameter of involute measurement d_e	104			-0.4124
33	Axial safety height z_s	10			-0.3666
34	Axial height of involute measurement z_a	-5			-0.2926
35	Initial height to define the OZ axis z_i	-12			-0.2089
36	Measuring length to define the OZ axis l_a	8			-0.1955
37	Diameter of reference cylinder d_r	-50			-0.1102
38	Radius or positioning distance r_p	1.5			0.0166
39	Number of measurement points n	6			0.2484
40					0.7988

Fig. 15 Datos de entrada.

Los datos se exportan a un archivo CSV, incluyendo la posición del palpador x , y , dirección de medición, tipo de punto, número de dientes y coordenadas nominales de la evolvente. Este archivo se lee por el software de la MMC, tras desarrollar el correspondiente programa de lectura.

Medición con la MMC

Los bloques esenciales del programa de la MMC se observan en el flowchart de la Fig. 16.

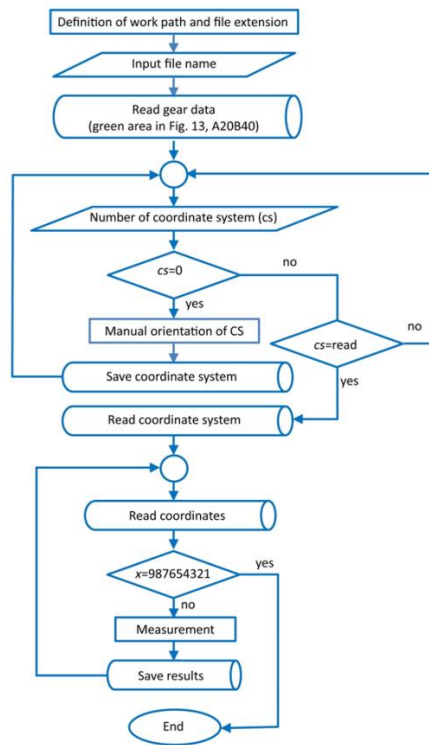


Fig. 16 Flowchart del programa de la MMC.

Los puntos de posicionamiento del palpador y la dirección de medición se leen del archivo CSV para medir los puntos del perfil del engranaje. Los puntos medidos se guardan en un nuevo archivo CSV. El proceso de medición se muestra en la Fig. 17.

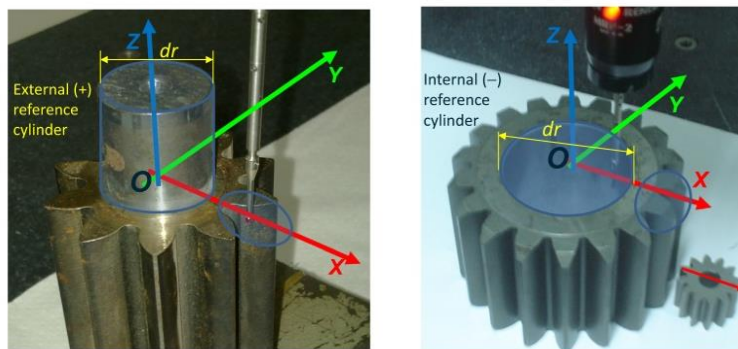


Fig. 17. Tres engranajes situados en el área de medición de la MMC.

Análisis de los resultados

El archivo de medición obtenido en la fase anterior es procesado por una nueva hoja de cálculo que aplica cuatro macros para distribuir la información en tres diferentes pestañas de la hoja de cálculo. (Fig. 18).



Fig. 18 Procesado del archivo de medición.

Cada botón de la macro compara el archivo con los puntos iniciales con el archivo con los puntos medidos. Como ejemplo, en la Fig. 18 se muestra la verificación del perfil del diente. En este caso se selecciona el diente que se desea verificar y se muestra la diferencia entre el perfil medido y el perfil nominal.

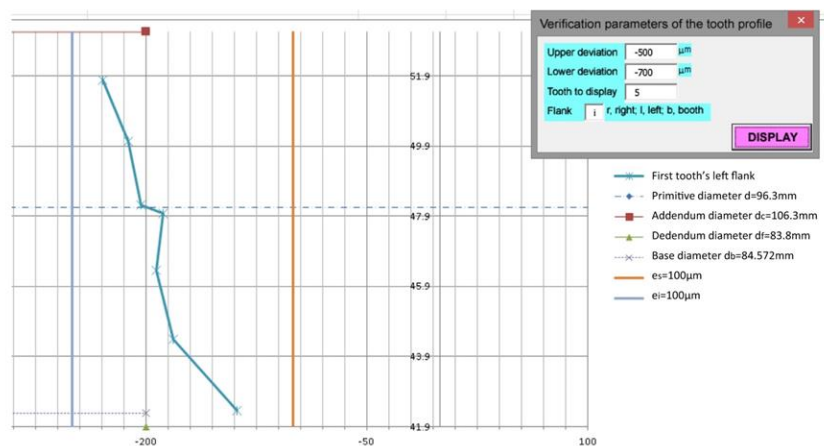


Fig. 19. Representación de la verificación del perfil del diente de un engranaje.

6.3.4. Presentación de la publicación “Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”

En las publicaciones anteriores se han desarrollado métodos de diseño, fabricación y verificación de engranajes rectos. Sin embargo, existen además una gran variedad de tipos de engranajes que se han concebido con objeto de adaptarse a necesidades específicas en la industria. En este apartado se desea ampliar el campo de conocimiento en las técnicas de tallado de engranajes no circulares desarrollando un proceso para la mecanización de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo.

Los engranajes no circulares se utilizan actualmente en numerosas aplicaciones tecnológicas: para mejorar la versatilidad y simplicidad de diversos procesos mecánicos (caudalímetros, bicicletas, motores de combustión interna, etc.), para unificar velocidades en las líneas de ensamblaje e incluso en investigación.

Tradicionalmente, la fabricación de estos engranajes se realiza mediante procedimientos mecánicos de arranque de viruta: fresado diente a diente o por generación. Esto exige controlar las variables geométricas y cinemáticas del proceso.

En esta publicación se presenta un método para fabricar engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo. Se desarrolla el modelo matemático, y finalmente se implementa este método en una máquina de electroerosión por hilo (Wire Electrical Discharge Machining, WEDM) obteniendo dos parejas de modelos de engranajes elípticos mediante dicho proceso.

Como paso inicial se desarrolla un algoritmo para organizar el proceso como se muestra en la Fig. 20:

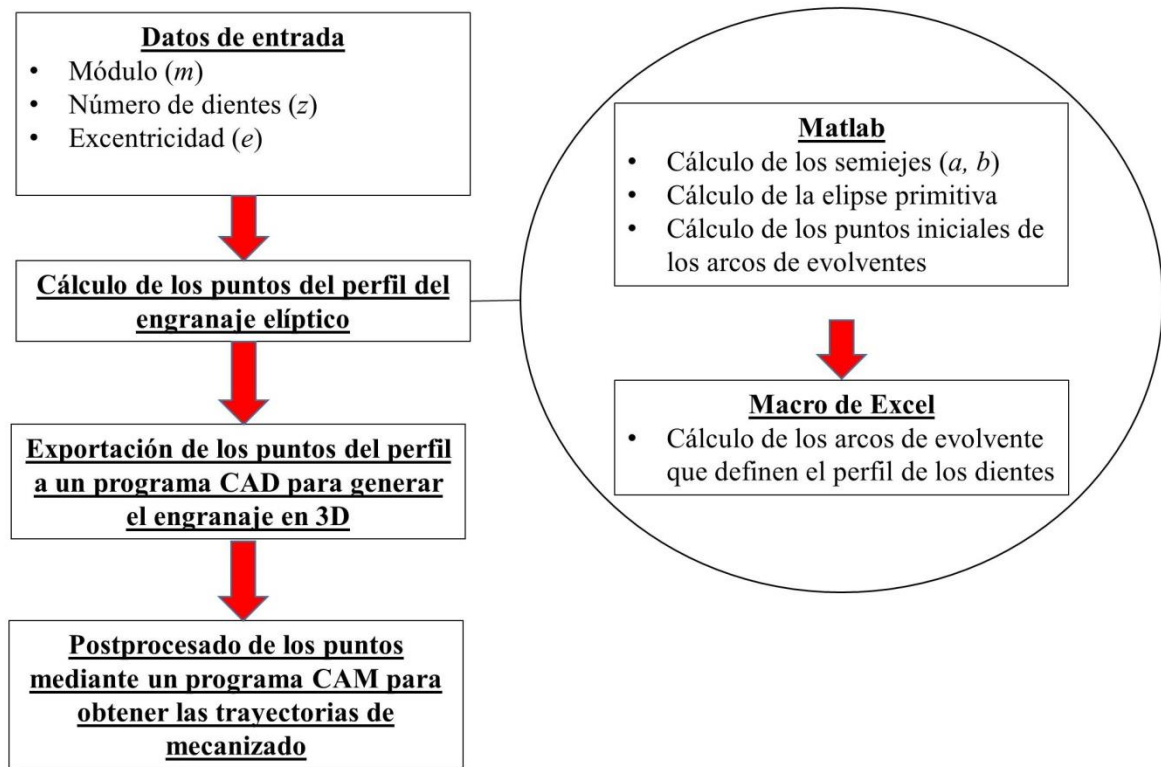


Fig. 20. Algoritmo para el diseño y fabricación.

Para obtener los puntos del perfil del engranaje, el procedimiento que se utiliza es por aproximación de los dientes como si de un engranaje circular se tratara, pero considerando la curvatura local en la elipse (Litvin et al., 2009).

En primer lugar es necesario calcular la longitud de la elipse evaluando la integral:

$$l = 4 \int_0^a \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (9)$$

La resolución de esta ecuación lleva a una integral elíptica de segunda especie. Evaluándola con programa de cálculo técnico e igualándola al valor del perímetro de la elipse, es posible resolverla y obtener el valor de los semiejes a y b .

El algoritmo para obtener los semiejes en un engranaje elíptico se muestra en la Fig. 21:

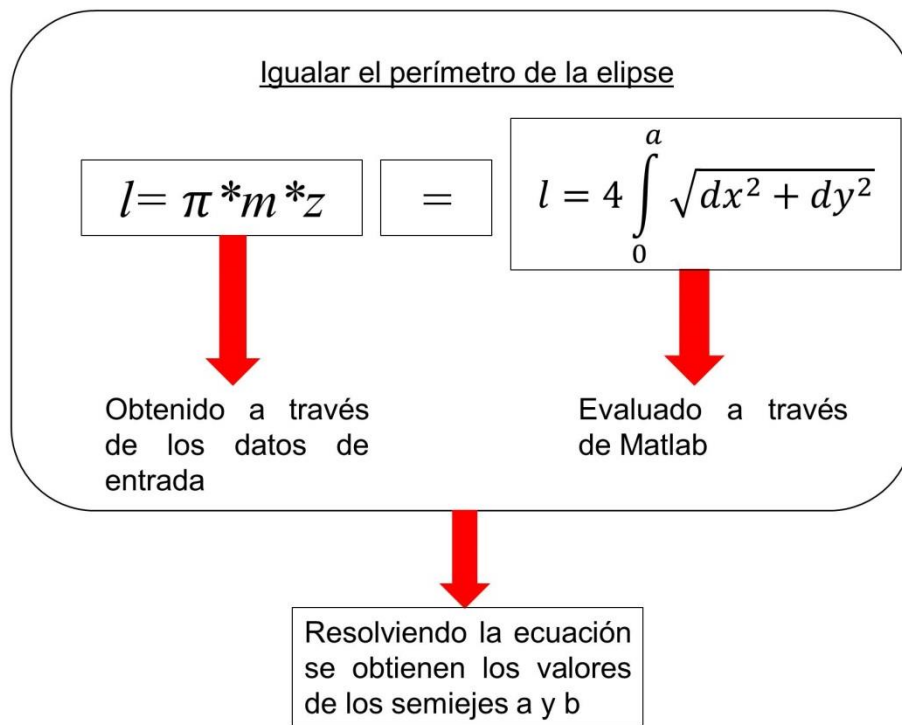


Fig. 21. Algoritmo para hallar los valores de los semiejes a y b en una elipse.

El siguiente paso es realizar la distribución de los dientes a lo largo de la elipse. Para ello se toma un punto inicial de la elipse primitiva (Fig. 22), y a partir de él se realiza la distribución de los dientes partiendo de un programa de cálculo técnico y finalizando con una hoja de cálculo (Fig. 23).

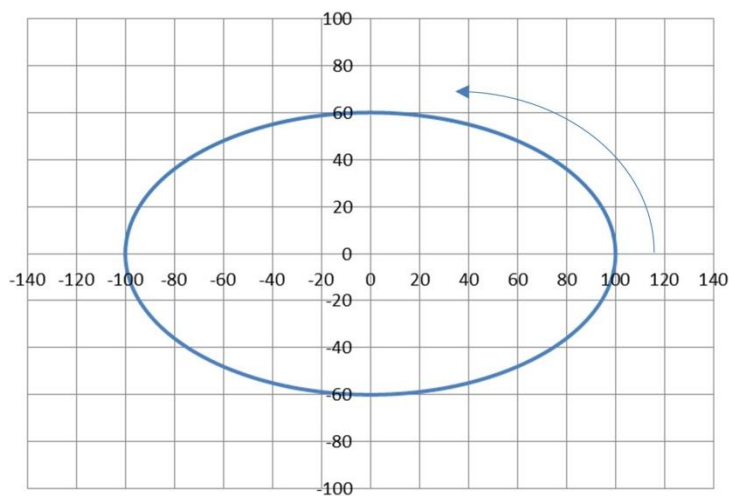


Fig. 22. Elipse primitiva.

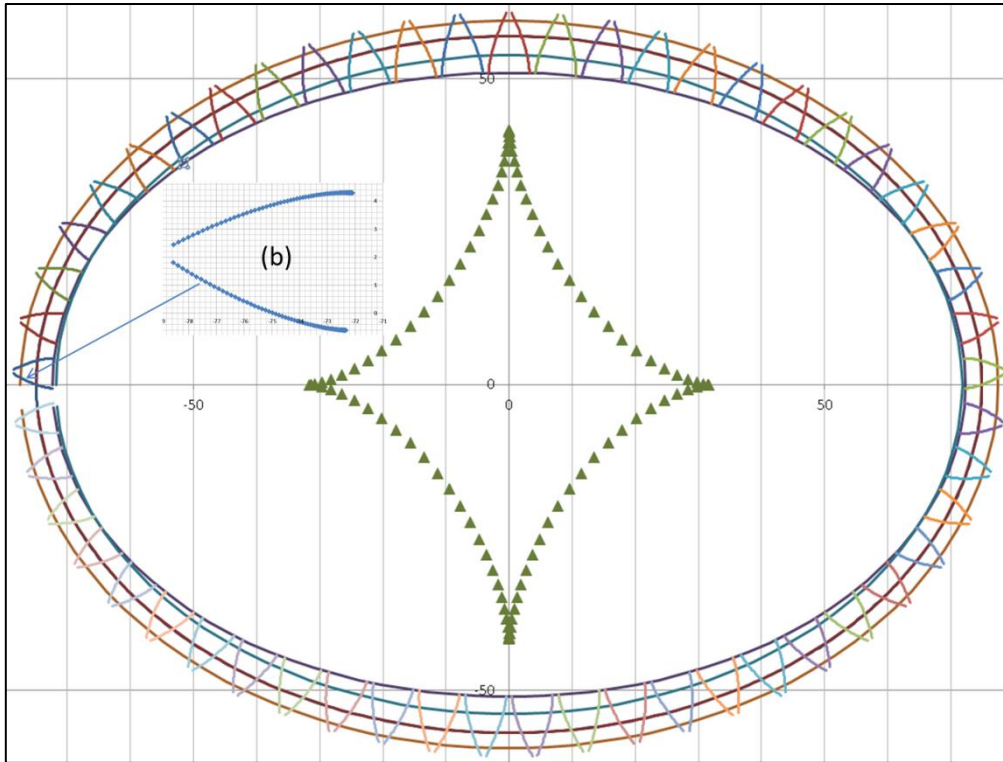


Fig. 23. Distribución de los dientes en un engranaje elíptico.

Una vez que todas estas curvas se exportan a un programa CAD, se realizan las correspondientes extrusiones y redondeos para obtener el modelo 3D del engranaje (Figs. 24 y 25)

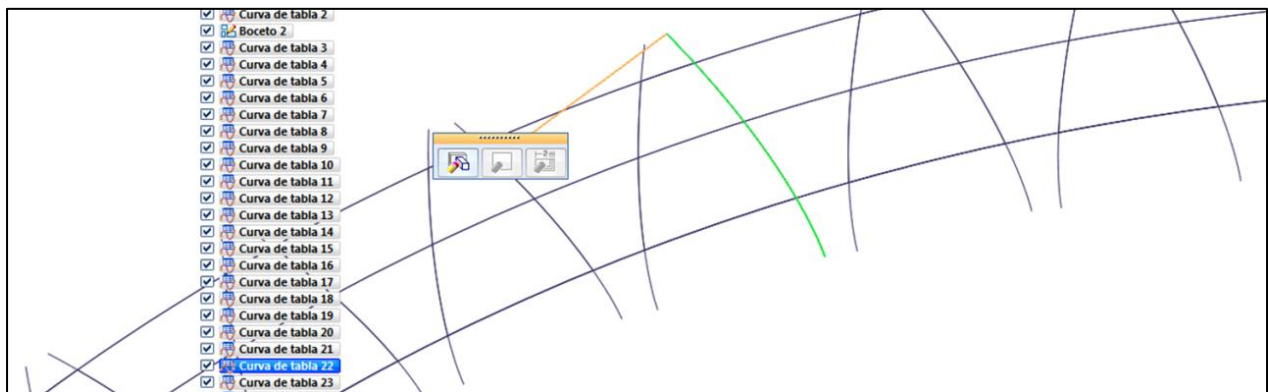


Fig. 24. Los puntos calculados con la hoja de cálculo se importan en CAD.

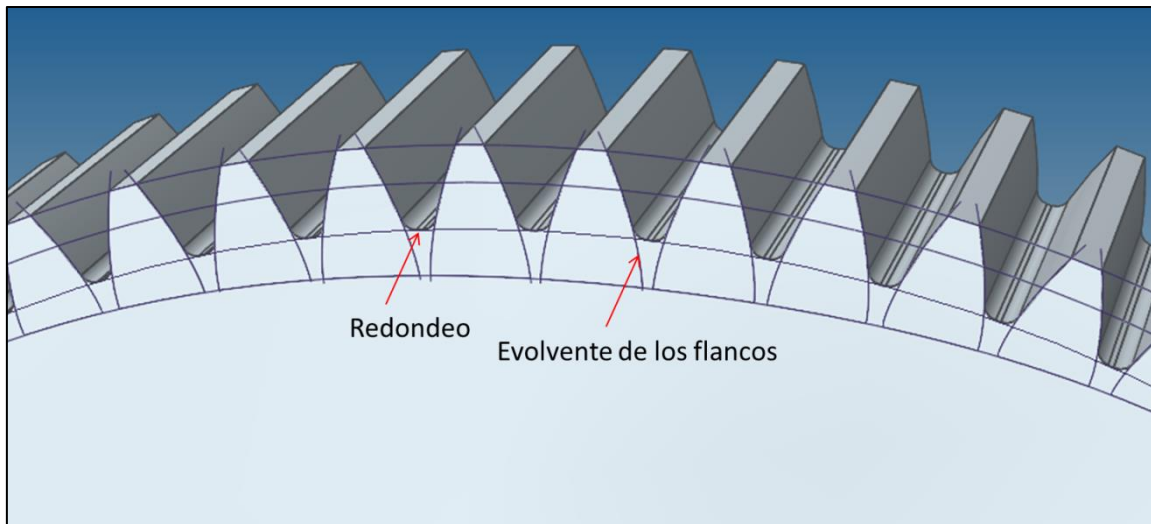


Fig. 25. Extrusiones y redondeos.

Todas estas operaciones se podrían haber realizado también por completo con hoja de cálculo o con un programa de cálculo técnico, calculando la posición de los puntos de redondeo para cada diente.

A continuación se decidió realizar la fabricación de una pareja de engranajes mediante electroerosión por hilo. De esta forma se podría verificar el modelo matemático y se podría evaluar si los engranajes engranaban correctamente. La continuidad entre dedendum, adendum y los puntos de los flancos que corresponden a un perfil específico de diente proporcionaron las trayectorias del hilo de la electroerosionadora. A estos puntos se les aplicó una corrección del radio del hilo más un gap. En este trabajo se usó el programa de postprocesado CAM para fabricar la pareja de engranajes con una excentricidad de 0.75 y 80 dientes (Fig. 26). Finalmente, en la Fig. 27 se muestran las parejas de engranajes elípticos fabricados mediante este método.

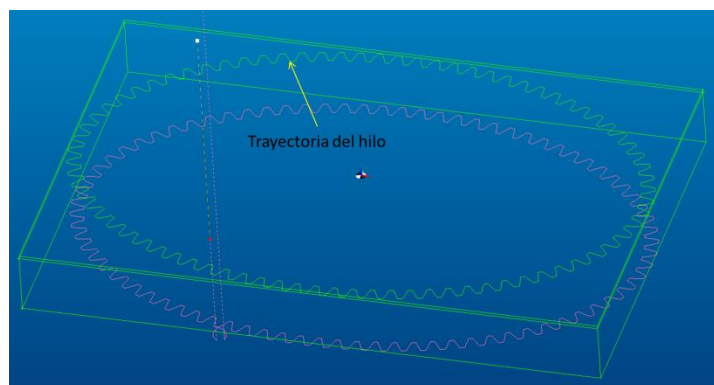


Fig. 26. Puntos postprocesado en un programa de CAM.



(a)



(b)

Fig. 27. Engranajes elípticos fabricados engranando (a) y (b).

7. TRABAJOS PUBLICADOS

Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points

J. L. Huertas Talón · R. Gella Marín · C. García-Hernández ·
L. Berges-Muro · C. López-Gómez · J. J. Marín Zurdo ·
J. C. Cisneros Ortega

Received: 1 January 2013 / Accepted: 15 April 2013
© Springer-Verlag London 2013

Abstract A large number of coordinate points is available after digitizing a profile, a surface, or generating the points of the function that define the surface or the profile (if an equation to generate these points is available). These coordinate points are grouped according to the strategy followed for the digitization or the generation. But not all the coordinate points are equally important: More coordinate points are needed in the zones where the curvature is larger, in contrast to the zones where the curvature is smaller. A new selection method of coordinate points is presented in this study. It is based on the maximum allowed chord error. This method simplifies the selection of the important coordinate points for the shape reconstruction with a computer-aided design program or for the computer numerical control (CNC) mechanizing, using either less information, smaller number of points, or NC program lines. To accomplish this objective, any programming language can be applied. An Excel macro and MATLAB have been used in this study. This is interesting both in high-speed CNC machines and in old equipment. The first ones have “look ahead” benefits, because the number of blocks in the NC program are read in advance. Therefore, if a smaller number of lines are needed for the same required precision, the process speed will be higher. The use of old machines will also be improved by the smaller number of lines to process. It must be noted that this process is as fast as the slowest of its elements.

Keywords CMM · Laser · Interpolation · Trajectory generation · High speed · Milling

J. L. H. Talón (✉) · R. G. Marín · C. García-Hernández ·
L. Berges-Muro · C. López-Gómez · J. J. M. Zurdo
Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación,
de la Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain
e-mail: jhuertas@unizar.es

J. C. C. Ortega
Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla,
Puebla, Mexico

1 Introduction

There are several methods to digitize a profile or a surface following a way of points, including:

- (a) Using an attached to its head.
- (b) Using a coordinate measuring machine [1]. This process is similar to the previous one, but more accurate.
- (c) Using a laser in the coordinate measuring machine instead of the mechanical probe [2].
- (d) Using a laser tracker mechanism [3].
- (e) A camera-based system [4].
- (f) Exclusively built profile-measuring devices [5].

In this sense, a previous study [6] includes a comparative of different digitation techniques, showing their advantages and disadvantages, in order to obtain the maximum efficacy.

There are also a number of techniques to evaluate the points that must be sent to the NC machine to mechanize the geometry. Several possibilities applied to a side involute of a gear are shown below.

- (a) Obtaining equidistant points in terms of the arc length. That is, all the arcs must have the same length (Fig. 1). This method is used to obtain the verification points in a conventional measuring system of a gear involute [7], as shown in Fig. 2.
The position of the center of the probe of a CMM after scanning a gear for its verification is shown below (Fig. 2). It can be observed that the distance measured along the probing line is the same (except for the rough changes of direction).
- (b) Applying the same chordal error [8]. This method is interesting for manufacturing purposes, as illustrated in Fig. 3.
- (c) Applying the same chord length (Fig. 4). It is similar to the first method and can substitute it when there is not much curvature difference. It was not used here.

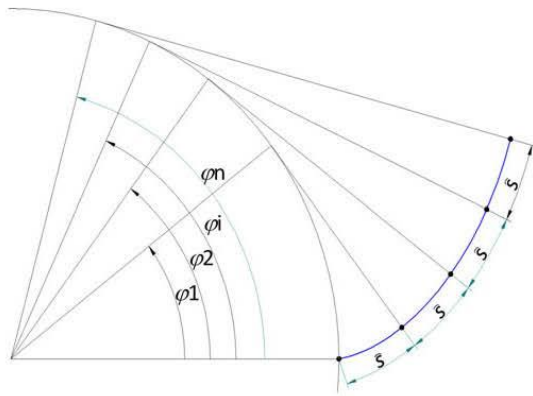


Fig. 1 Same arch length

(d) Using explicit or parametric equations [9] (Fig. 5 and 6) to obtain the points that simplify the trajectory that a NC machine must follow. It is not advisable because it needs a very small increment of the parameter or the independent variable used to obtain an acceptable precision. However, it is a very common method because of its simplicity, but it has the drawback that in those zones where the curvature is large, a lot of precision is lost. The opposite also happens here, in zones where the curvature is small, there is an excess of precision. In Fig. 7a, parametric equation is represented as a polynomial quotient [10].

In every case, when the number of the scanned points is very high, filtering is convenient in order to exclude the points with less input information for the identification of the digitized form. The points presenting more input information are those placed in zones with a larger curvature, and those with less input information are the points placed in the zones with smaller curvature. An aerodynamic profile [11] is

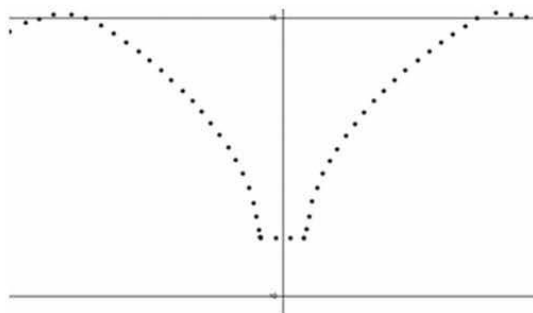


Fig. 2 Position of the center of the probe, after scanning a gear

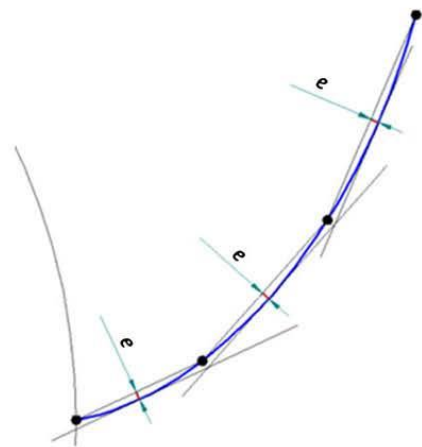


Fig. 3 Same chordal error

displayed (Fig. 8), showing the importance of the curvature in the point selection.

An algorithm is described here in order to use only the most significant points to define a curve. The advantages of this method are the simplification of the rebuilding process and the speed increase in the computer system processing, as well as in the numeric control that will perform the mechanizing.

To adjust the previously shown curves (Figs. 5, 6, 7, and 8), when their equations are known, several methods can be applied. When the points have been generated by any of these methods, including the use of a scanner, those points are imported to computer-aided design (CAD) software for their treatment. In both cases, it is usual to adjust the curve with known equation [12] or the scanned points [13] to a non-uniform rational B-spline (NURBS).

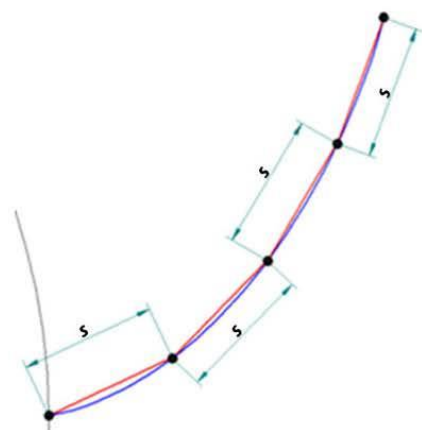


Fig. 4 Same chord length

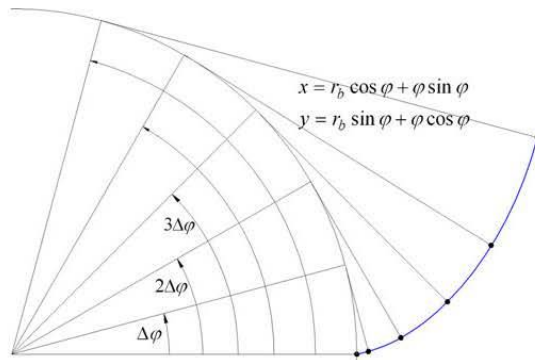


Fig. 5 Circle involute with equal increments of the φ parameter

2 Initial considerations

During the development of the experiences mechanizing aero model propellers and aerodynamic profiles [14], measuring gears, and scanning surfaces, it has been observed that it would be interesting having an algorithm [15, 16] to select the quantity and quality of the points obtained by scanning with a CMM or with an artificial vision system. With this algorithm, fewer points would be sent to the NC machine (especially in older controls) or to machines that do not present “look ahead” features; even using machines with the option of NURBS mechanizing, adequate strategies to maintain the tool path in the programmed profile are required [17]. In these cases, the difficulty level is increased in curves with shorter radiuses, due to the increment in the normal component of acceleration.

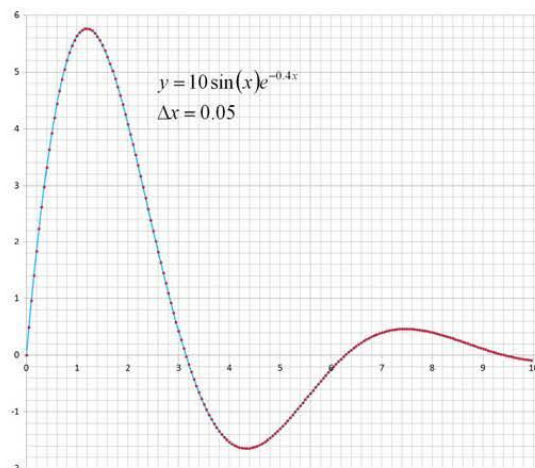


Fig. 6 Approximation of an explicit equation

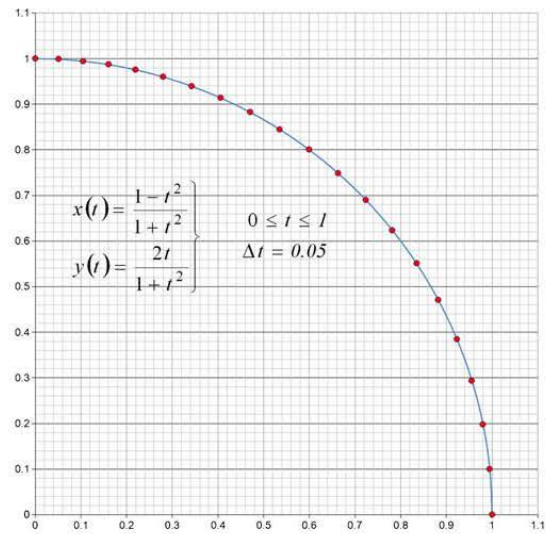


Fig. 7 Approximation of a parametric equation (circle) as a polynomial quotient

According to Fig. 8, aerodynamic profile, we observe that, near the leading edge, more points will be needed than at the trailing edge. The reason is that the curvature is larger at the leading edge compared to the trailing edge. The same conclusion can be deduced by analyzing Figs. 1, 2, 3, 4, and 5, which correspond to a gear profile. Figure 6 shows an explicit function and Fig. 7 shows a parametric equation as a two polynomials quotient.

In Fig. 9a, a simulation of possible scanning points has been drawn performing a constant variation in the x -axis. In Fig. 9b, points have been recorded every 0.002 mm using continuous probing. It is obvious that not all points will be needed to define the profile with the required precision.

It can be observed that in the case of Fig. 9a, a 0.01 mm step is too wide for the zone near the leading edge, while in the rest, it is too narrow. That means that in a continuous scanning a small step must be used.

To avoid unnecessary points and select the most significant ones, i.e., those in the greatest curvature zones, we developed and started applying an algorithm [18] several years ago. Recent contributions in the field of interpolation methods, which can be considered more efficient than the use of NURBS in high-speed and high-precision micromilling [19], make that algorithm interesting again because it can become a method to control selected points within an error margin.

Figure 10 shows two circumferences with two polygonal approximations. The more faces the polygon has, the more similar it will be to the circumference. This fact is typically used in CAD/computer-aided manufacturing (CAM) software to show the accuracy of the curve representation [20].

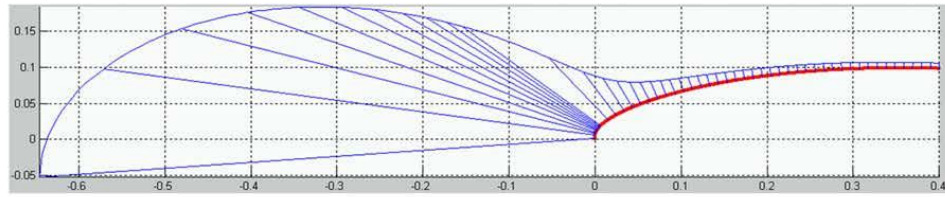


Fig. 8 Points near the leading edge zones provide more information

In this sense, what can be done with the obtained points? As it will be described below, they can be filtered with an algorithm that uses the cosine [21] of two vectors. This algorithm, implemented with Excel or MATLAB, makes possible to obtain a smaller number of points that will be easier to handle in NC mechanizing. As it has been described before, only the points containing more information for the curvature will be used, thus decreasing the mechanizing time or the time required to import all the points to CAD software.

3 Mathematical principle

The relation between the number of segments of the polygon that approaches the circumference and the error in Fig. 10 can be drawn from Fig. 11, where the chord error, e , is represented.

The chord error is related to the circumference radius with the expression:

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{r - e}{r} \Rightarrow e = \left(1 - \cos \frac{\beta}{2}\right)r \tag{1}$$

It was obtained from the OAB triangle in Fig. 11. The angle between the polygon sides is related to the angle between the radii by the following expression:

$$\beta + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{2} = \pi \Rightarrow \alpha = \pi - \beta \tag{2}$$

As a result:

$$\cos \alpha = \cos(\pi - \beta) = -\cos \beta = 1 - 2\cos^2 \frac{\beta}{2} \tag{3}$$

The chord error is related to the cosine of the angle α , which can be obtained from the angle between the chords or the polygon sides that approach the circumference. This first angle is α_1 .

$$\cos \alpha_1 = 1 - 2\left(1 - \frac{e}{r}\right)^2 \tag{4}$$

It is remarkable that if the chord error increases, the absolute value of cosine (α_1) decreases. (In this case, it ranges between -1 and 0). Therefore, a higher precision implies a lower value of the cosine of the angle between two faces, or a higher absolute value. It must be also noted that in order to obtain a low-chord error, α must be near π radians.

If the polygon sides are transformed into vectors (Fig. 12), the angle between the sides is defined by the scalar product of its vectors. This angle is α_2 :

$$\cos \alpha_2 = \frac{\mathbf{v}_{12} \cdot \mathbf{v}_{23}}{|\mathbf{v}_{12}| \cdot |\mathbf{v}_{23}|} \tag{5}$$

As the points in the trajectory are close enough to approximately coincide the curvature radius in both points, every angle α is larger than 90° , and therefore, its cosine is negative. The extreme situation happens when the points

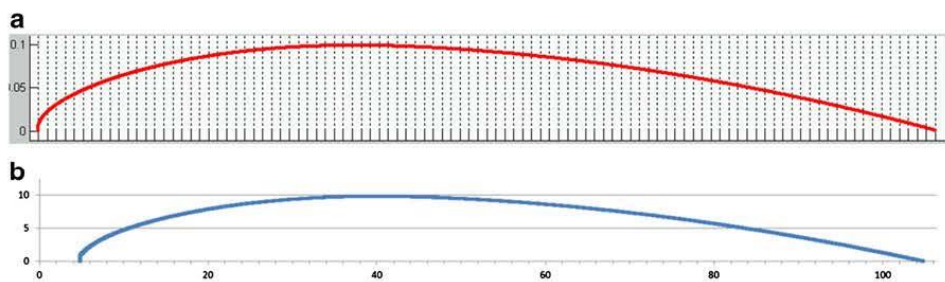
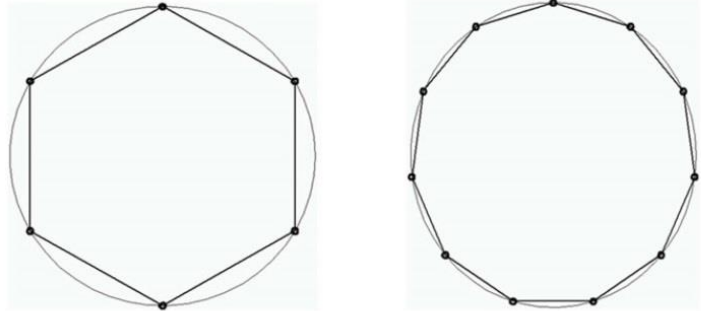


Fig. 9 Scanning points in an aerodynamic profile: a Upper chamber, interval $\{0, 1\}$ with 0.01 mm steps. b Every 0.002 mm of the scanning probe trajectory

Fig. 10 The polygon on the right provides a better circumference approach



are aligned. In this case, the cosine is -1 , what means that α is 180° .

As shown in Fig. 12, the points delimiting the vectors can correspond to the scanned points. Observing Figs. 13 and 14, if the scanned points are close enough, we can consider that they belong to the same circumference, which is determined by those three points. The center of the circumference coincides with the curvature center, and its radius is the curvature radius in the surroundings of the points. Therefore, we obtain the circumferences defined by the points (1, 2, 3), (2, 3, 4), and so on.

In this way, it is possible to write an algorithm that studies the points (1, 2, 3), which belong to the circumference of radius r . This radius can be obtained because three points of the circumference are known.

The angle α_1 calculated by (4) corresponds to the chord error e . If angle α_2 is larger, it is because the real value of the chord error is smaller than the expected one. In this case:

$$\alpha_2 > \alpha_1 \Rightarrow \cos(\alpha_2) \tag{6}$$

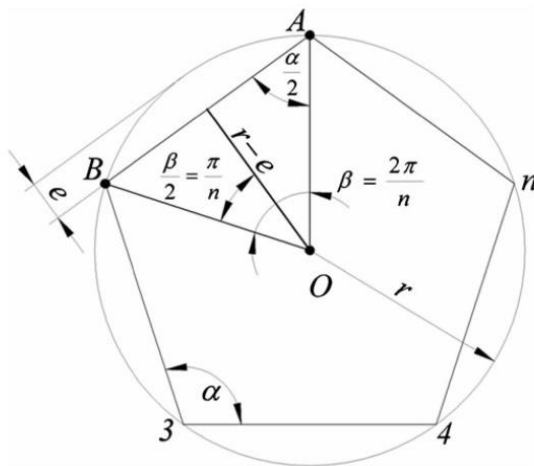


Fig. 11 Mathematical principle

If the cosine evaluated by the expression (5) is higher than a value determined by (4), we can discard the intermediate point 2. If this point is not discarded, the points 2, 3, and 4 are verified. If point 2 is discarded, there are three possible choices for the algorithm to continue:

- (a) Repeat the above process with points 1, 3, and 4. The point that can now be discarded is point 3.
- (b) If point 3 is not discarded, apply the algorithm with points 3, 4, and 5. The point that can now be discarded is point 4.
- (c) Use the first method, but in this case the deleted point disappears from the series. That is, point 3 becomes point 2; point 4 becomes point 3 and so on.

After several verifications, the best choice was the third one, especially after using an Excel macro where the row containing the coordinates of the discarded point is deleted. If the number of points is high, MATLAB is a better option, and for that it is enough to delete the corresponding element in the vector that contains all the elements.

All that has been mentioned above allows making the algorithm recursive and simplifies moving forward

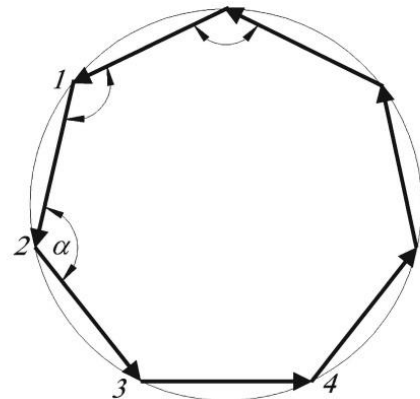


Fig. 12 Vectors delimited by scanning points

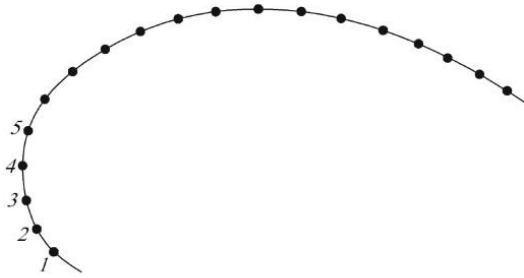


Fig. 13 Sequence of scanned points

without checking if the element has been deleted or not. This task is done by Excel, deleting each unnecessary row, or by MATLAB, deleting the array element which stores the coordinate points.

The algorithm is valid either in 2D or in 3D trajectories:

In the 2D case, only two coordinates are used. The three points determine the circumference without any other condition than the equation that defines the circumference. The unknown variables are the center coordinates and the radius.

In the 3D case, there are four unknown factors: the center coordinates (x_c , y_c , and z_c) and the radius. The fourth condition is that the center belongs to the plane determined by the three considered points when they are not aligned.

It has also been considered the case where the points are aligned and therefore the cosine is not -1 . In this case, point 2 is rejected without running the algorithm. The algorithm is described in the following flowchart (Fig. 15).

4 Practical cases

A series of practical examples are shown below. The procedure can be used to make a CAD representation with the minimum number of points for a given resolution or to perform the mechanizing with an acceptable chordal error. Three 2D and one 3D examples of NC milling are shown in this paper:

- (a) A damped function.
- (b) Archimedes spiral.
- (c) Corrected involute. Spur gear.
- (d) Bike seat surface.

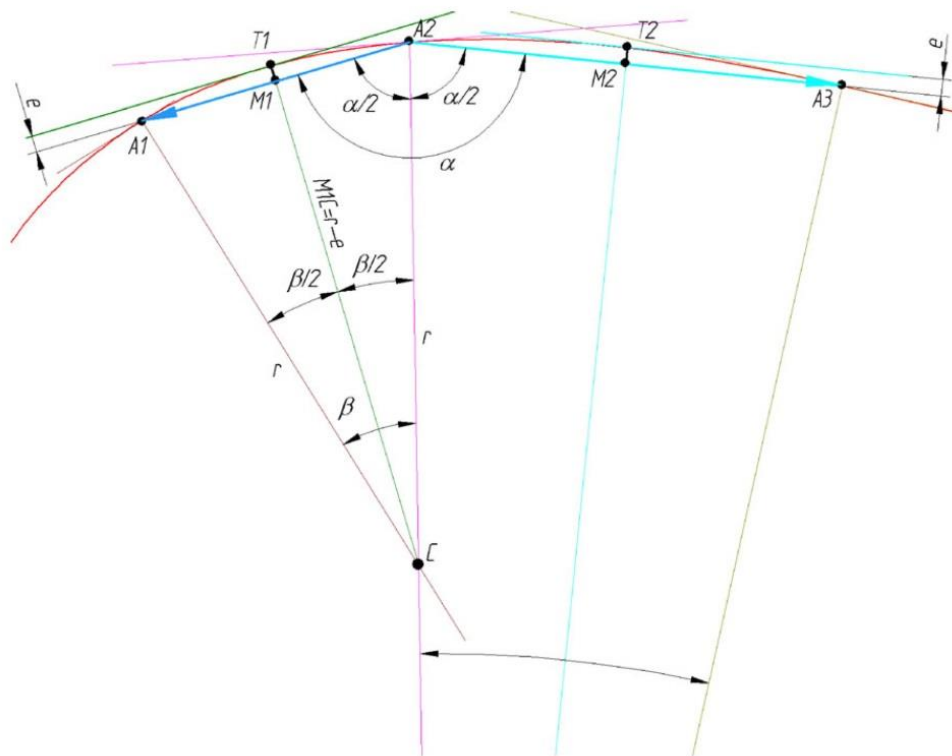


Fig. 14 Small chordal error, e , due to the proximity between consecutive points

Fig. 15 Flowchart of the one-point removal algorithm

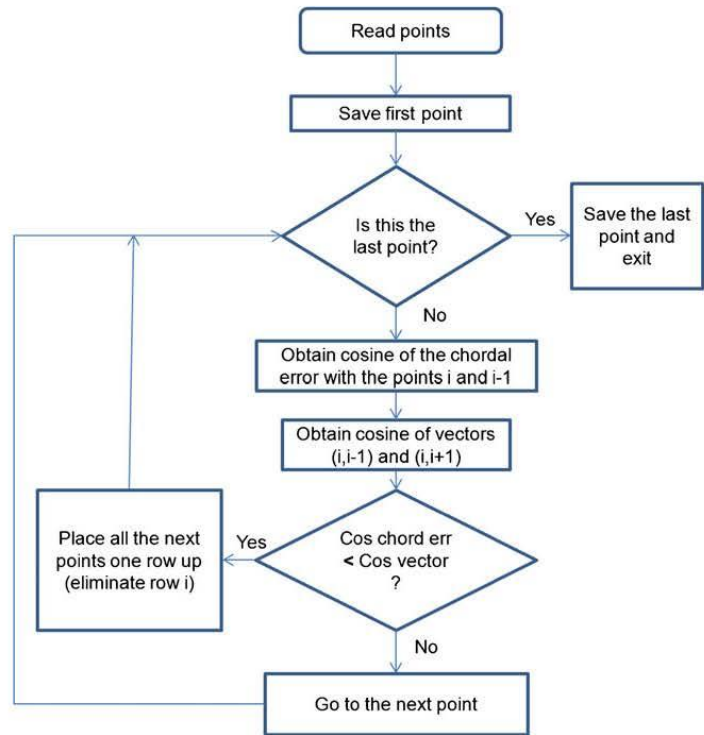


Fig. 16 Representation of the function $y=50*\sin(x/4)*\exp(0.05*x)$. The 800,001 points are represented in *blue* and the 144 points are represented in *red* with a chordal error of $1 \mu\text{m}$

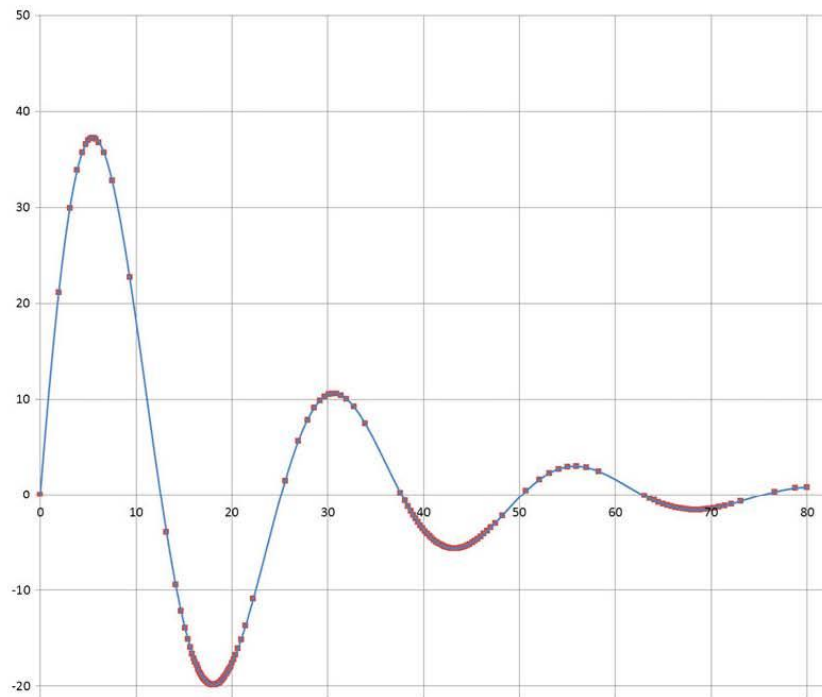


Table 1 Comparison between the number of lines and the mechanizing time according to the programmed number of points to follow the damped function and importation to a CAD program

Feed (mm/min)	Time (s)/real feed		Time reductions with the applied method
	Chordal error: 1 μm (144 NC lines) $\Delta x=0.0001$ mm (800,001 NC lines)		
8,000	4/7,500	45/667	41
4,000	8/3,750	45/667	37
2,000	15/2,000	44/682	29
Time required to import all the poits to the CAD software (Solid Edge ST2)			
Time/Kb	Less than 3 s/149	More than 13 min/48,025	More than 13 min

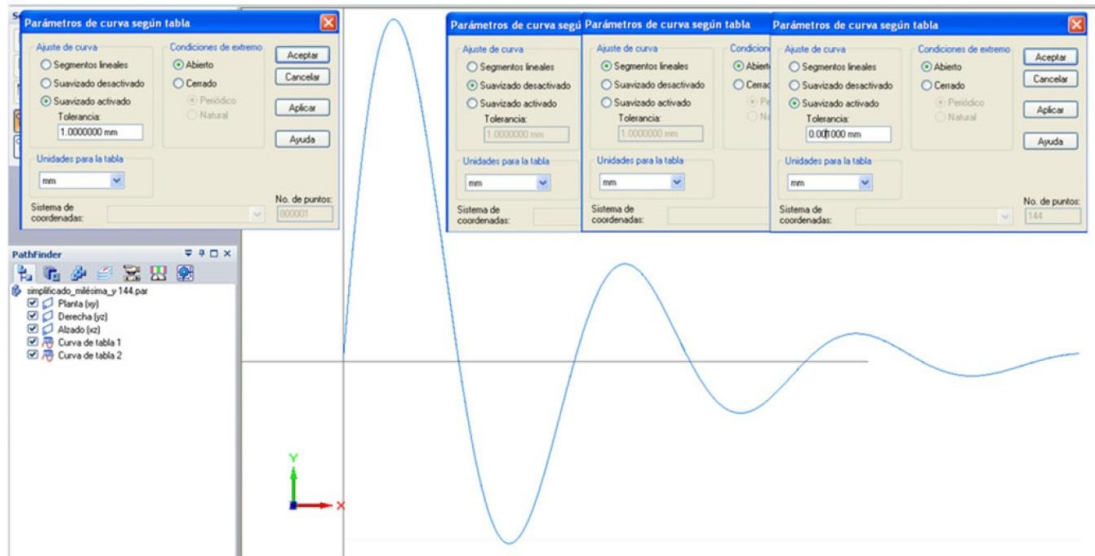
a**b****Fig. 17** **a** Profile of the damped function and CAD importation. **b** Result of the milling in a polyoxymethylene (POM) block

Table 2 Comparison between the number of lines and the mechanizing time according to the programmed number of points to follow the spiral

Feed (mm/min)	Time (s)/real feed		Time reductions with the applied method
	Chordal error: 1 μm (210 NC lines)	Arch of 0.05 mm (10,000 NC lines)	
8,000	4/7,500	45/667	41
4,000	8/3,750	45/667	37
2,000	15/2,000	44/682	29
Time required to import all the points to the CAD software (Solid Edge ST2)			
Time/Kb	Less than 1 s/208	More than 10 s/848	More than 9 s

The main advantage of the proposed method, to reduce the number of points to export to a CAD or NC software, was applied to the previous examples, with Solid Edge ST2 (parametric CAD) and the FANUC Robodrill machine, using the FANUC 31i control, which has an acceleration of 2g.

4.1 Damped function

A damped function in the interval between 0 and 80 mm was used in order to test the algorithm under extreme conditions, because it mixes highly curved zones with almost straight ones:

$$y = 50 \sin\left(\frac{x}{4}\right) e^{-0.05x} \tag{7}$$

If increments of Δx=0.0001 are performed, 800,001 points are needed. In a binary file that records both coordinates with double precision, 8 bytes are needed for each number. Therefore, the file size is 1,242 kb (as shown in Windows Explorer). The same function with 0.001 mm arc error by MATLAB needs 144 points (Fig. 16). In this case, the file size, is just 4 kb. The data has been exported for its representation in Excel 2010.

Table 1 shows the time comparison between using 144 and 800,001 NC program lines (all of them using the G1 function). Those lines do not include the contents of the header and the end of the NC program. This makes possible to store in the RAM the NC program in the first case, while in the second one it is necessary to use the hard drive, DNC, or LAN.

The function length in the interval 0 ≤ x ≤ 80 can be calculated in different ways:

- (a) By adding the distances between the 800,001 points, which are 800,000 lineal segments. It can be calculated using Excel or MATLAB:

$$l = \sum_{i=2}^{800,001} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} = 193.764 \text{ mm}$$

- (b) By adding the distances between the 144 points left after using this algorithm (a small error can be noted in this case):

$$l = \sum_{i=2}^{144} \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} = 193.706 \text{ mm}$$

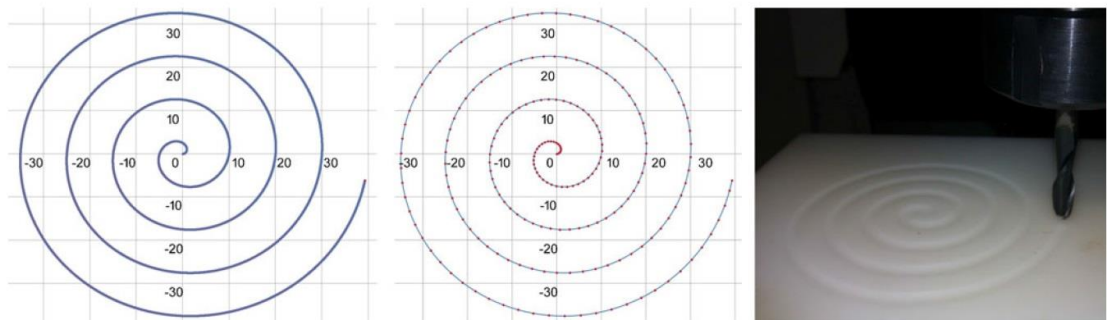


Fig. 18 Comparison between spirals with an arc length of 0.05 mm, a chord error of 1 μm and the mechanizing with a spherical tool tip

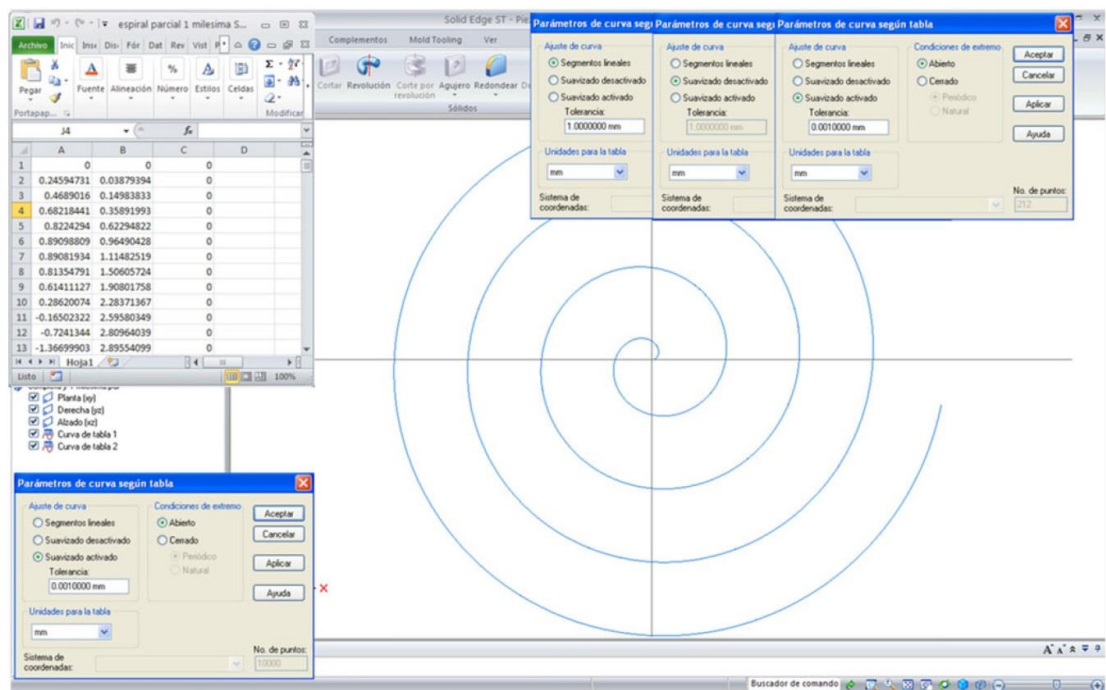


Fig. 19 Spiral imported to CAD software (Solid Edge)

(c) By integrating (this exact value is equal to the first option results):

$$\begin{aligned}
 l &= \int_0^{80} \sqrt{(dy)^2 + (dx)^2} \\
 &= \int_0^{80} \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(25 \cos\left(\frac{x}{4}\right) - 5 \sin\left(\frac{x}{4}\right) \right)^2 e^{\left(-\frac{x}{10}\right)} dx} \\
 &= 193.764 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Figure 17 shows the mechanizing of the function trajectory with a ball-nose milling tool and the two set of imported CAD points superimposed. In this last case, when the reduction to 144 points is used, the lineal segments approximation (switching the smoothness off) is optimal. If the smoothness is switched on, the tolerance must be reduced. This is not needed in the 800,001 points case. In order to summarize, the two options providing the optimal overlapping are both shown in the same Fig. 17.

Springer

4.2 Archimedes spiral

This case was made using MATLAB. The spiral points were obtained using a 0.05 mm arc length, the spiral step was

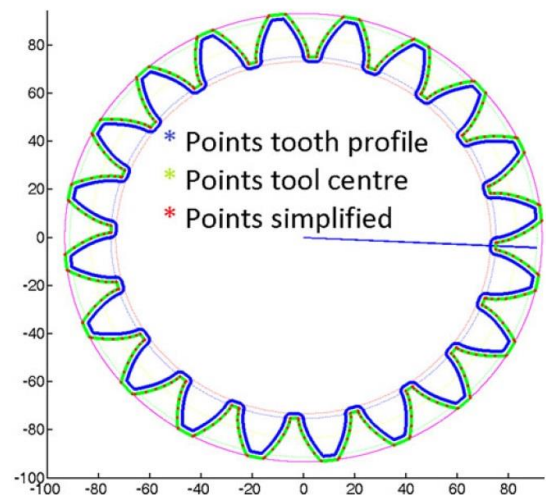


Fig. 20 Spur gear boundary displayed in an Excel spreadsheet

Table 3 Comparison between the number of lines and the mechanizing time according to the programmed number of points to follow the boundary of the spur gear

Feed (mm/min)	Time (s)/real feed		Time reductions with the applied method
	Chordal error: 1 μm (400 NC lines)	Arch of 0.01 mm (94181 líneas NC)	
8,000	21/3,500–4,500	97/700–800	76
4,000	22/2,500–3,800	97/700–800	75
2,000	35/2,000	97/700–800	62
Time required to import all the points to the CAD software (Solid Edge ST2)			
Time/Kb	Less than 1 s/224	More than 90 s/6,256	More than 1 min 30 s

10 mm and the total spiral length was 500 mm. Next table shows the results obtained in a FANUC Robodril mill machine (Table 2). The smoothing feature was enabled, because if it is off, the difference is even more pronounced. Using older NC milling machines, results were more divergent, so the proposed method is the optimal.

Figure 18 shows the Archimedes spiral with a 0.05 mm arc length. It can be observed that the representation points are accumulated very closely (left). This figure shows the same spiral (center), but with the points

selected by the algorithm in order to reach a chord error smaller than 1 μm . Finally, on the right, it is shown the mechanizing of the spiral on a POM block using a spherical tool tip.

Figure 19 shows the data uploading with Solid Edge. The obtained conclusions are similar to the previously obtained in the damped function. Activating the smoothing option and using a tolerance of 0.001 mm, especially with the 212 points, the matching is perfect. The Excel file has just one sheet with the (x, y, and z) point coordinates.

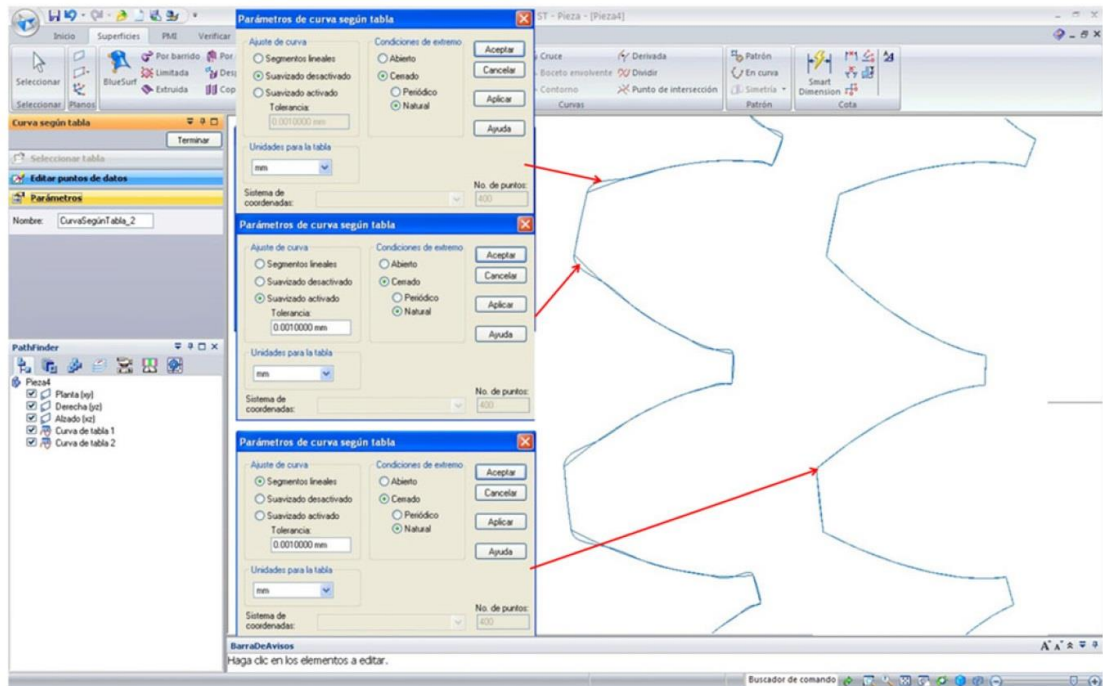
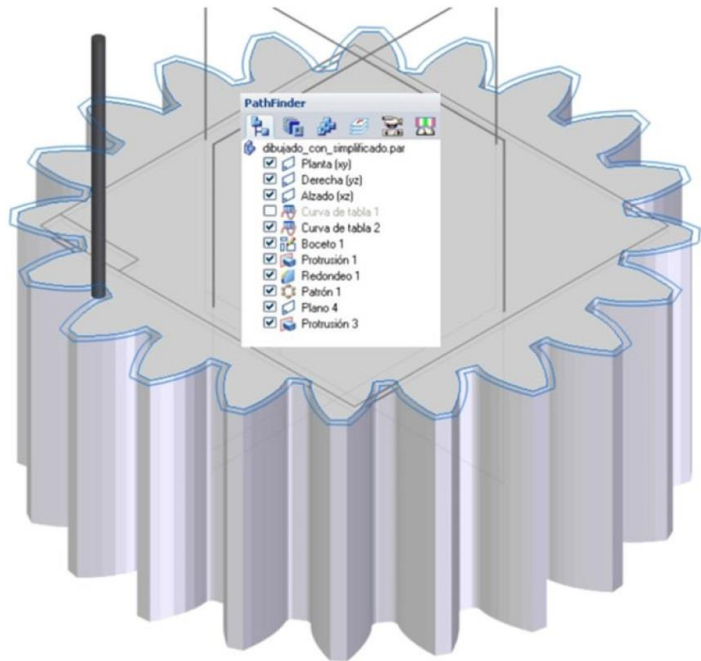


Fig. 21 Toolpath imported to the CAD software (Solid Edge)

Fig. 22 Gear design with the imported points



4.3 Spur gear boundary

This example shows the parametric equation of the circle involute (shown in Fig. 5 above). A spur gear with module 8, 20 teeth, and a correction factor of 0.5 has been used. Only a tooth flank will be manufactured and, applying symmetry, a complete tooth is obtained. Finally, with 19 rotated copies, the 20 teeth gear is completed. The whole procedure is detailed in a previous paper [8] and is now used to obtain the boundary with arc length increments smaller than 0.01 mm. All the arc increments have the same length, simulating a measure with a CMM in scanning mode.

The arc length of the circle involute is defined by the following expression:

$$\begin{aligned}
 s &= \int_A^B \sqrt{d^2x + d^2y} \\
 &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} \sqrt{(r_b \phi \cos \phi d\phi)^2 + (r_b \phi \sin \phi d\phi)^2} = r_b \int_{\phi_1}^{\phi_2} \phi d\phi \\
 &= \frac{1}{2} r_b (\phi_2^2 - \phi_1^2)
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

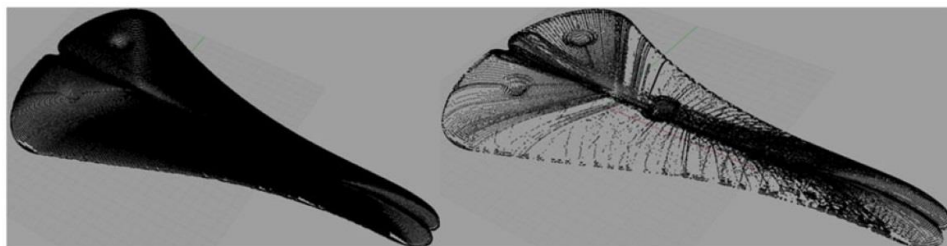


Fig. 23 High- and low-density surfaces with the same chordal error

Knowing the arc length, $s=0.01$ mm, and the first value of the angle in the equation, $\varphi_1=0$, the remaining values are obtained recursively. The points have been obtained by MATLAB and a simplification process has been applied for a precision of 0.001 mm. With it, Fig. 20 has been obtained.

The file with the coordinates of these points can be imported into Excel or MATLAB to obtain the numeric control programs to be sent to the milling machine. As in previous examples, the mechanizing of the initial simplified points and their import to Solid Edge have been performed. After that, a boundary milling with a 4 mm cylindrical tool was done (Table 3).

Figure 21 shows the data imported from the Excel spreadsheet to the CAD software to be milled, including in this figure the three smoothing options. Figure 22 shows the spur gear and the milling tool applied in the manufacturing process. The original boundary is obtained displacing the toolpath to the inside a distance equal to the tool radius.

4.4 Bike seat surface (3D example)

Figure 23 (left) shows a bike seat surface, in which a total of 230,911 points have been generated by CAM software. That number is equal to the total NC program lines (except the ones in the beginning and the end of the NC program, where the x , y , and z coordinates are defined). If we use a chordal error of 0.01 mm, the needed number of points decreases to 74,268 (roughly one third of the original number of points). For a programmed feed of 2,000 mm/min and using the smoothing feature, there is a mechanizing time saving of about 2.5 min. Without the smoothing feature, the original required time decreases in about a 50 %. That is, using a NC machine without high-speed features, it takes around a 50 % of the time mechanizing a surface (with manifest advantages in the case of needing an RS232 serial transmission for direct numeric control).

5 Conclusions

This paper shows a method to minimize the number of points needed to represent or mechanize 2D or 3D elements. If we just represent the elements, the resources needed to handle the points to be displayed on screen decrease. If we mechanize the elements, there is an important reduction in the required time when the real feed approaches the programmed one. The fact of simply increasing the feed when the number of points has not been optimized does not implicate a time reduction, over a certain value, and it could even “crash” the NC machine.

From the mentioned results, the following conclusions can be extracted:

- In zones where the curvature is small, the number of points defining it virtually coincides with the number of points obtained after applying the algorithm, even if we increase the accuracy (step reduction) of the scanning.
- The number of points of the definition, for a given cosine accuracy, increases in zones of higher curvature if we reduce the scanning step.
- From a reduction value of the scanning step, the number of points converges to a given cosine precision.
- This procedure can be considered valid for a scanning with a CMM or laser tracker, as shown in Fig. 9.

6 Future development

This algorithm can be implemented in a continuous measuring device without any additional software; therefore, the scanning step can be self-adapted to the curvature. As a result, the required time of these devices (CMM, laser tracker/tracer) can be improved when a point to point scanning is used.

The algorithm can be used to find imperfections by detecting rough changes in the curvature. Then, the points in the rough change of curvature can be discarded, as seen in Fig. 9.

Using the algorithm to obtain the mechanizing points of a known function is also possible. As a result, it is not necessary calculating the first and the second derivatives of the function.

Finally, it can be interesting to add this algorithm to commercial CAD programs. This would make possible to delimit the importation of the scanned points, delimited to an optimal number, according to the required accuracy.

Acknowledgments This work is part of the project “*El conocimiento como motor de la fabricación mecánica*”, supported by the Spanish Ministry of Culture and Sport and the European Social Fund. Our thanks go to fellows of the Integrated College of Technical Training “Corona de Aragón” from Zaragoza (Spain), Francisco Valdivia Calvo and Juan José Garde Barace, for their assistance in the preparation of parts and field work.

References

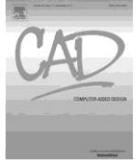
1. Cho M-W, Seo T-I (2002) Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on CAD/CAM/CAI integration. *Int J Adv Manuf Technol* 19:607–617
2. Shiou F-J, Pfeifer T (2002) Strategies and processes to measure the dimensional geometry of sheet metal parts for exact laser cutting. *Int J Adv Manuf Technol* 19:106–116
3. Zhao C, Zehnder R, Burge JH (2005) Measuring the radius of curvature of a spherical mirror with an interferometer and a laser tracker. *Optical Engineering*. doi:10.1117/1.2047594

4. Hu E, Zhu Y (2013) 3D online measurement of spare parts with variable speed by using line-scan non-contact method. *Optik- Int. J. Light Electron Opt.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.04.017>
5. Kang J-G, Han S (2002) Measurement and evaluation of form deviation error of disk cam with an exclusively built profile-measuring machine. *Int J Press Vessel Pip* 79(4):251–262
6. Barbero BR, Ureta ES (2011) Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design* 43:188–206
7. Goch G (2003) Gear Metrology. *CIRP Ann Manuf Technol* 52(2):659–695
8. Huertas Talón JL, Cisneros Ortega JC, Cisneros Ortega L, Ros Sancho E, Faci Olmos E (2010) Manufacture of a spur tooth gear in Ti–6Al–4V alloy by electrical discharge. *Comp Aided Des* 42(3):221–230
9. Ziatdinov R, Yoshida N, Kim T-W (2012) Analytic parametric equations of log-aesthetic curves in terms of incomplete gamma functions. *Comp Aided Geo Des* 29(2):129–140
10. Piegl L, Tiller W (1997) *The NURBS book, chapter one*. Springer, New York. ISBN 978-3-540-61545-3
11. E.N. Jacobs, K.E. Ward, R.M. Pinkerton (1993) The characteristics of 78 related airfoil sections form tests in the variable-density wind tunnel. Report no 460. NACA
12. Gofuku S-I, Tamura S, Maekawa T (2010) Point-tangent/point-normal B-spline curve interpolation by geometric algorithms. *Computer-Aided Design* 42–4:350–359
13. Xie W-C, Zou X-F, Yang J-D, Yang J-B (2012) Iteration and optimization scheme for the reconstruction of 3D surfaces based on non-uniform rational B-splines. *Computer-Aided Design* 44(11):1127–1140
14. Huertas Talón JL, Torres Leza F, Floren Gómez F, Hernández Ruiz V (2006) Obtaining a program of mechanizing of an aerodynamic profile using MatLab. *Int J Adv Manuf Technol* 31:556–566
15. Budak I, Sokovic M, Barisic B (2011) Accuracy improvement of point data reduction with sampling-based methods by fuzzy logic-based decision-making. *Measurement* 44:1188–1200
16. Ma X, Cripps RJ (2011) Shape preserving data reduction for 3D surface points. *Comp Aided Des* 43:902–909
17. Zhang K, Yuan C-M, Gao X-S, Hongbo L (2012) A greedy algorithm for federate planning of CNC machines along curved tool paths with confined jerk. *Robot Comp Int Manuf* 28:472–483
18. J. L. Huertas Talón, C. López Gómez (2007) Simple algorithm to select significant points after a scan of a profile or a surface. *Interempresas*. June 22
19. Vijayaraghavan A, Sodemann A, Aaron Hoover J, Mayor R, Domfeld D (2010) Trajectory generation in high-speed, high-precision micromilling using subdivision curves. *Int J Mach Tool Manuf* 50:394–403
20. Solid Edge ST2, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. <http://www.plm.automation.siemens.com>. Access 9 Apr 2013.
21. Corley HW, Rosenberger J, Yeh W-C, Sung TK (2006) The cosine simplex algorithm. *Int J Adv Manuf Technol* 27:1047–1050



Contents lists available at ScienceDirect

Computer-Aided Design

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cad

Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool[☆]

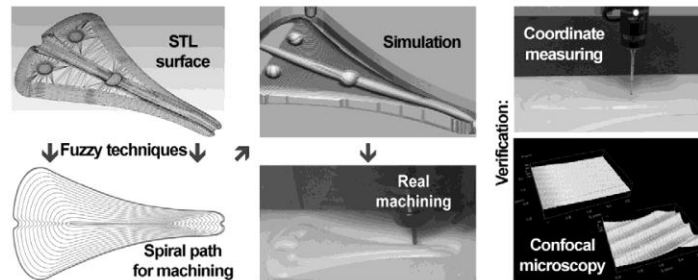
J.L. Huertas-Talón, C. García-Hernández^{*}, L. Berges-Muro, R. Gella-Marín

Department of Design and Manufacturing Engineering, University of Zaragoza - Campus Río Ebro, C/ María de Luna, 3 - 50018 - Zaragoza, Spain

HIGHLIGHTS

- Machining STL surfaces, without a volume inside, is useful and it can be optimized.
- To optimize this process we use the piece contour, defining 2D spiral paths.
- With non-deterministic techniques, the third coordinate of the tool-path is obtained.
- This method was simulated and applied to a workpiece, with positive results.
- Its precision was tested using confocal microscopy and coordinate-measuring machine.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Received 19 July 2013
Accepted 22 January 2014

Keywords:
Tool-path
Milling
Non-deterministic techniques
Spherical tool
STL surface

ABSTRACT

For milling an arbitrary surface, several models exist in which the tool must be moved close and away from the workpiece with its consequential problems caused by the contact between the tool and the mechanized material. One of these problems is the undesirable mechanizing marks on the surface, which can be avoided with the use of tangential tool-paths, causing another disadvantage: the additional time-consumption. Spiral tool-paths eliminate these problems and allow for continuous machining of the part without approach or withdrawal.

Deterministic models for obtaining the tool positions referred to the part need to apply complex mathematical operations. For this reason, the idea of using non-deterministic techniques, with a controlled tolerance margin, allows to avoid those mathematical and geometrical operations. It also makes possible to reduce the processing times with no loss of dimensional quality and a good superficial finishing, which was confirmed with a coordinate measuring machine and with confocal microscopy, respectively.

Finally, the effectiveness of the described method was assessed comparing its results with the performance of three of the most relevant CAM software commercially available. The obtained results are shown at the end of this paper.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Preparation of tool-paths for sculptured surfaces is still being an interesting research aspect, since obtaining the interval between consecutive milling passes attending to the surface curvature [1],

[☆] This paper has been recommended for acceptance by Xiuzi Ye.

^{*} Corresponding author.

E-mail address: garcia-hernandez.cesar@unizar.es (C. García-Hernández).

which can be defined in several ways, such as segmenting using polygons [2], being triangles the most commonly used. This is how differential geometry is replaced by analytic geometry of line and plane.

Deciding the optimal path for milling is still a problem in which research keeps being useful [3]. Previous researchers have dealt with the more convenient cutting direction for sculptured parts [4], paying attention to the surface roughness and required milling time. Nevertheless, among all the possible milling strategies (zigzag, z-level, parallel plan, iso-planar, etc.), spiral paths seem to be the most commonly used ones [5]. The reason for this is, basically, that this kind of paths leaves no machining marks on the surface.

The definition of milling tool-paths for finishing free form surfaces can be also decided according to several curve models, e.g. *B*-splines. This curve model can be applied in fields like the shoe manufacturing, for example using *B*-splines to compensate radiuses in the machining of shoe lasts [6], or to make the shoe sole attending to 3D CAD profile curves, scaling for different sizes [7]. Therefore, linear interpolation trajectories (G01) should not be forgotten, as they keep providing good results, combined with smoothing features included in numeric control devices [8] and a correct subdivision of the curves used to define the tool-path. Although it is possible to generate a 2D spiral trajectory with biarcs and splines [9], in this case G01 has been applied because it fits properly to 3D tool-paths and smoothing functions in numeric control devices, thus obtaining continuous trajectories.

Productivity can also be enhanced when continuous arcs are applied to define the tool-path as described in the previous research [10], being necessary to define parallel sections to interpolate those arcs, while in 3D it is necessary to indicate the interpolation plane, making this method slower.

For studying the error in the milling results with a spherical tool tip [11], as a result of roughness and dimensional tolerance, the surface representation must be taken into account. This representation can be considered using NURBS [12] or STL [13]. In this research article, STL surfaces were applied.

After deciding the surface representation, the milling strategy is chosen according to quality and time parameters. For example, Lu et al. [14] obtained spiral tool-paths from conventional trajectories, although they applied a process of incremental sheet forming (ISF) instead of milling. Other researchers [15] have optimized tool-paths, using response surface method for single point ISF. Similarly, spiral tool-paths for machining sculptured surfaces have also been obtained by conformal map approach [16].

Considering a maximum Δz is equivalent to use the *z* coordinate as a fuzzy parameter [17]. In this paper, Δz is treated as a variable to reduce processing times.

To calculate any coordinate (*x*, *y* or *z*) of the tool-path position in the space, geometric-analytical methods are usually applied, using fuzzy techniques only for the analysis of cutting parameters related to the part finishing, such as roughness [18]. Furthermore, Lo [19] studied the effect of feed rate, cutting speed and depth as roughness causes. Non-deterministic techniques have also been successfully applied to change cutting conditions [20] during the machining process or, on the contrary, to adapt this process to its specific conditions, predicting its final features [21]. In a similar way, these techniques have been combined with the Taguchi method and genetic algorithms [22].

The presented method makes possible to develop spiral trajectories, where coordinates *x* and *y* are obtained from the part boundary. This part's surface is given in STL format, making possible to export and import from virtually any commercial 3D CAD. To obtain the third coordinate, *z*, an approximation based on non-deterministic techniques is used with a margin of tolerance.

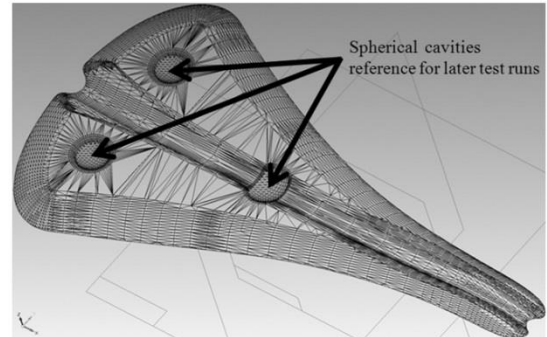


Fig. 1. STL surface example.

2. Method

With STL surfaces, which do not enclose a volume and whose whole exterior faces have director vectors with a positive *z* component, Fig. 1, their load is carried out from a binary format file [13]. In order to optimize the process time and the amount of information in memory, a method based on vectors is used [23] to save the data in memory.

In order to optimize the machining phase, a series of operations have to be carried out:

1. obtaining the contour;
2. obtaining the 2D tool-path and its spiral transformation;
3. application of algorithms to smooth the profile;
4. projection of 2D tool-path points on the surface;
5. calculation of the final *x*, *y*, *x* path with non-deterministic techniques.

2.1. Obtaining the surface contour

This process is of extreme importance, as it contains the basis of later development such as the calculation of the tool-paths and the final cut, if necessary, to free the machined part from the initial billet.

Mainly, although other variants exist, this is based on the fact that one side of the edge belongs only to one triangle, while the interior sides belong to two or more triangles, Fig. 2. To obtain this, an algorithm has been implemented to simplify the final polyline.

Finally, as a starting point of the obtained polyline, we choose the most significant point of the ends of the segments that form the polyline, which can be:

- the point of the coordinate *x* furthest to the left;
- the closest point to a determined direction, given by a unitary vector $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$;
- any criteria that allow obtaining a single point.

In our particular case we have chosen the point with the component *x* or abscissa of least value (the furthest to the left when facing a milling machine).

The final part of this phase is the management, from the chosen initial point, of all the points according to the chosen tool-path direction.

2.2. Obtaining the spiral tool-path

The algorithm for carrying out the contour runs for milling, starts from the exterior profile or contour of the surface which is considered to be the first profile. The object is to calculate the following profiles for the material to be removed from the exterior

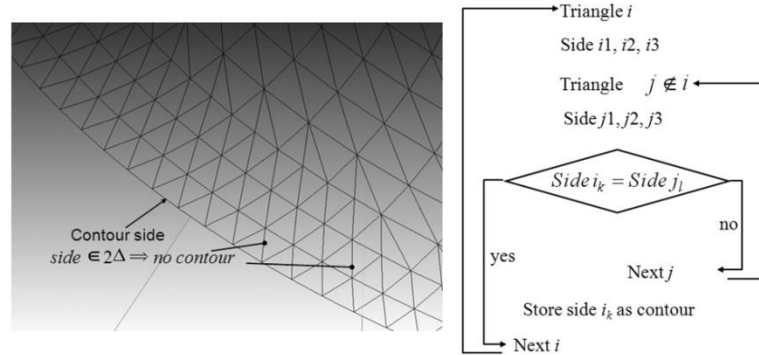


Fig. 2. Condition of one side to be the contour.

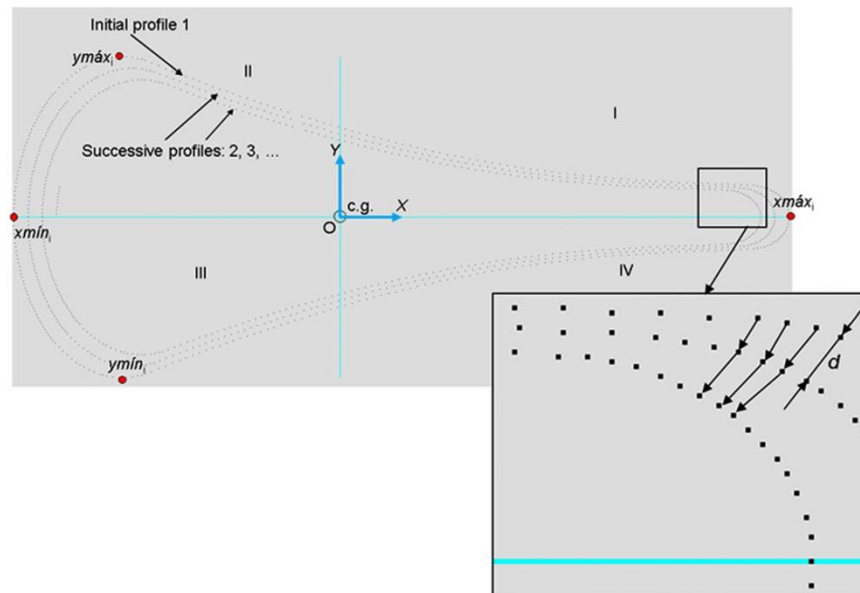


Fig. 3. Obtaining profiles prior to the spiral.

to the interior (though later, rearrangement is possible to change the machining order).

Initially, the machining runs are “parallel” profiles which are obtained as shown in Fig. 3, displacing each point a certain amount towards the interior of the profile in the direction of axis OX and another in the direction of axis OY , the same as if a scale was carried out but variable in each direction. The entry datum is the distance d between homologous points but measured in a certain direction which depends on the position of the point.

The position of the point is classified by quadrants originated by a system of coordinates. This system of coordinates can be chosen in function of various parameters. The origin has been taken as the gravity centre of the series of initial points.

$$x_{cg} = \frac{\sum \frac{x_{i-1} + x_i}{2} l_i}{\sum l_i} \quad y_{cg} = \frac{\sum \frac{y_{i-1} + y_i}{2} l_i}{\sum l_i} \quad (1)$$

This system of coordinates classifies the plane in four quadrants (I, II, III and IV). To classify each point, its difference is simply carried

out with respect to the gravity centre. At each point a displacement is applied (the coordinates are actually multiplied by a scale). The distances of this point to each coordinated axis are taken into account. For example:

- if the point is in the first quadrant, the scales in the direction OX and OY , in function of some certain runs, p_x and p_y in each direction, which will be looked at later, are:

$$\left. \begin{aligned} e_x &= \left(1 - \frac{p_x}{x_{\max} - x_{c.g.}} \right) \\ e_y &= \left(1 - \frac{p_y}{y_{\max} - y_{c.g.}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

With this, it is possible to calculate the coordinates of the transformed point in the chosen system of universal coordinates.

$$\left. \begin{aligned} x_p &= (x_i - x_{cg}) \cdot e_x + x_{cg} \\ y_p &= (y_i - y_{cg}) \cdot e_y + y_{cg} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

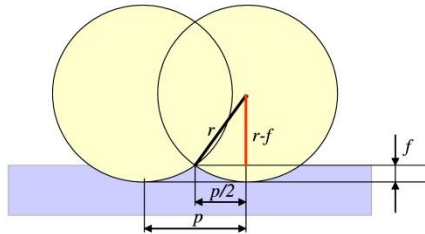


Fig. 4. Pitch calculation.

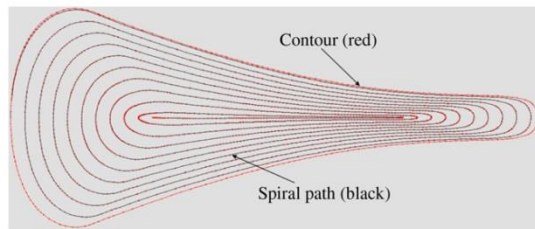


Fig. 5. Spiral 2D tool-path.

On this occasion, the runs in x and y , p_x and p_y take the same value, given by the expression obtained in Fig. 4 in function of the radius of the spherical tool and the roughness crest f if, supposedly, milling was in the horizontal plane. Other cases (concave and convex surfaces) can be consulted [24].

$$r^2 = (r-f)^2 + \left(\frac{p}{2}\right)^2 \Rightarrow p = 2\sqrt{r^2 - (r-f)^2}. \quad (4)$$

The process is repeated for each new profile, but, taking the maximum coordinates that correspond to the previous profile as maximum values to enter into (2).

Finally, worth noting is that the points which change quadrant with respect to the first of the line of points of the initial contour, cannot change due to the previous transformation. Therefore, a filter is used if the point changes to another quadrant; this filter reduces to zero the coordinate that causes this change.

In order to transform the previous points into a spiral, the process consists of working with the equivalent points of a profile of those obtained previously and the following profile. This is done considering that initially all the profiles have the same number of points. A formula is used for this purpose which brings the points of a profile closer to those of the following profile: the first point is the next to profile $p-1$, and the last point next to profile p .

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i,p-1} + (x_{i,p} - x_{i,p-1}) \cdot \frac{i}{n} \\ y_i &= y_{i,p-1} + (y_{i,p} - y_{i,p-1}) \cdot \frac{i}{n} \end{aligned} \quad (5)$$

where, i is the current point of profile, p is the current profile, and n is the number of profile points.

Fig. 5 shows the results obtained. In this figure, a high value has been taken in expression (4) for the height of the roughness crest, f , to obtain few profiles and so be able to illustrate the process. The contour forms part of the tool path to calculate the first or last cut, according to whether start-up is made from the outside inwards or vice versa.

2.3. Algorithms to smooth the profile

The use of processes of smoothing is not new and has been used in different fields [25]. These algorithms have a dual purpose. On



Fig. 6. Smoothing a profile.

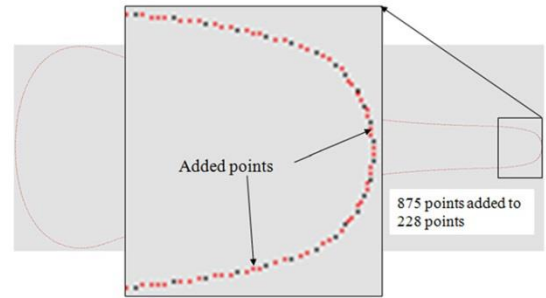


Fig. 7. Additional points to increase precision.

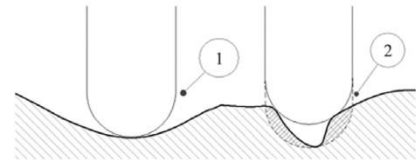


Fig. 8. Tool radius and surface curvature for a section.

the one hand, should the profile be too abrupt, it is smoothed over, Fig. 6. The criteria can be very varied: to carry out the average of next points or to optimize trajectories to a minimum number of points [26], among other possibilities.

Once smoothing has been carried out according to the precision of the STL lattice, the addition of more points may be required. This is done depending on a step or interpolation precision (distance between two consecutive points), in the direction of the spiral orbit from one point to the next. Therefore, one or more intermediate points can be added between two points, Fig. 7. Some authors described the application of adaptive tool-paths [27] with excellent results in the surface finish; but in our case the tool-path follows a more uniform direction, so less acceleration milling is required to obtain precise results.

Again, the algorithms for smoothing can be applied to this new spiral path with added points.

2.4. Projection of the spiral path points onto the surface

The previously obtained spiral path 2D points are transformed into the 3D path by projecting the 2D points onto the STL surface, but also taking tool size into consideration.

Tool size is extremely important. Fewer runs can be made using large diameter tools, see expression (4). But the inconvenience is that the smallest curvature radius possible on the surface is that of the tool tip radius, as unmachined hollows can remain, Fig. 8.

For this choice between the tool radius and that of the surface curvature, the coordinate z of the tool contact point with the surface must be determined. This point is not necessarily the projection of the coordinates (x, y) on the surface. This is due to the fact that the surface curvature can cause the tool to make contact with another upper z coordinate, Fig. 8 right.

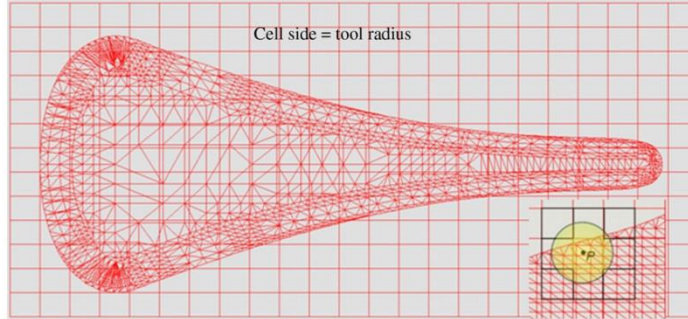


Fig. 9. Zone classification by means of a grid.

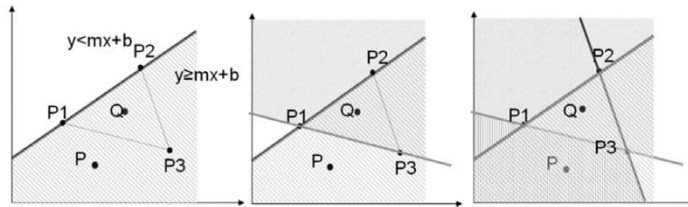


Fig. 10. Situation of a point with regard to a triangle.

The projection on the STL surface can be made once the triangle containing the coordinates (x, y) is known. In order to locate the triangle where the tool is situated, classification is carried out by zones, Fig. 9, to speed up the result of the algorithm as, once the point (x, y) is assigned to a zone, it is only necessary to work with the triangles of that zone and find the triangle containing the projection of the point (x, y) .

According to the directions of the axes x and y , the number of grids is:

$$n_x = \text{roundness}_{\text{upper}} \left[\frac{\text{maximum}_x - \text{minimum}_x}{\text{radius}_{\text{tool}}} \right] \quad (6a)$$

$$n_y = \text{roundness}_{\text{upper}} \left[\frac{\text{maximum}_y - \text{minimum}_y}{\text{radius}_{\text{tool}}} \right].$$

To locate the zone where the tool point (x, y) is situated, we apply:

$$\text{zone}_x = \text{whole part} \left(\frac{x - \text{minimum}_x}{\text{radius}_{\text{tool}}} \right) \quad (6b)$$

$$\text{zone}_y = \text{whole part} \left(\frac{y - \text{minimum}_y}{\text{radius}_{\text{tool}}} \right).$$

Within the zone, a search is made to find the triangle that contains the tool tip:

A triangle consists of three points (vertices) which, when grouped into two, form three straights (sides). Each side of the triangle is viewed to see whether the point we want to check and the opposite vertex are on the same half-plane, this means sharing the same sign when we substitute the coordinates of the points in the normal line equation.

$$\text{half_plane} = \text{sign} \left(\frac{ax_Q + by_Q + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right) = \text{sign} (ax_Q + by_Q + c). \quad (7)$$

Fig. 10 shows that both points P and Q comply with this condition for the first side ($P1P2$) but, on checking the following side ($P1P3$), P is outside the triangle.

To obtain the projection of a point onto a particular triangle, best results are obtained using the normal plane equation, as the plane director vector containing the triangle is known.

$$x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma = q \quad (8)$$

where, Fig. 11, α , β and γ are the angles of the director vector of the plane of each coordinate axis and q , the distance of the origin of the coordinates of the plane. The director cosines are data of the STL file.

The value of parameter q is obtained by substituting the coordinates of a vertex, for example, the first (according to the matrix used).

$$q = x_0 \cos \alpha + y_0 \cos \beta + z_0 \cos \gamma. \quad (9)$$

The coordinate z of the projection point can now be obtained, Fig. 12:

$$z_P = \frac{x_0 \cos \alpha + y_0 \cos \beta + z_0 \cos \gamma - x_S \cos \alpha - y_S \cos \beta}{\cos \gamma}. \quad (10)$$

It can be seen that, when the plane is vertical, $\cos \gamma = 0$, there is no projection.

2.5. Calculation of the final tool-path x, y, z using non-deterministic techniques

To calculate the 3D tool-path, the 2D path of Fig. 5 is projected onto the surface, Fig. 13, but, taking into account the three conditioners, Fig. 14:

- (a) close to the contour of the surface, position z lower than the tool, is the point where it is tangential to the surface (point of intersection with the surface);
- (b) the initial position z of each pair of x, y coordinates is the upper part of the billet block;
- (c) the final position z of each pair of x, y coordinates is that which holds the tool in tangential contact with the surface.

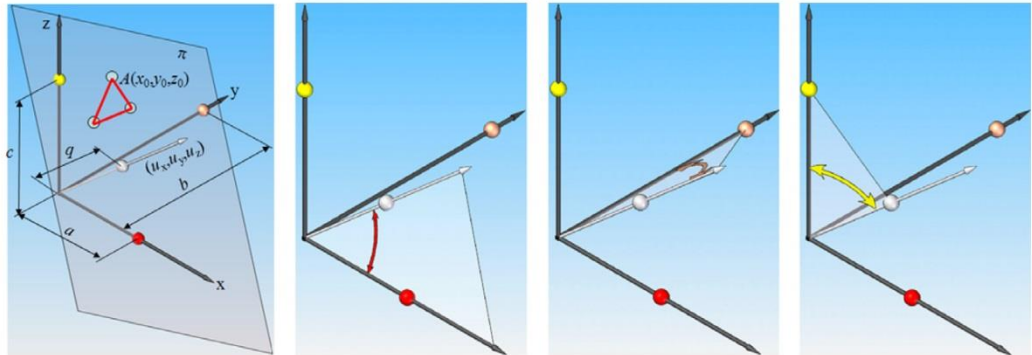


Fig. 11. Angle of the director vector of the plane that contains an STL triangle with coordinate axis.

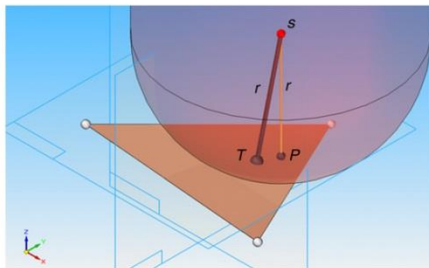


Fig. 12. Coordinates of tool tip centre S. Tangent point T.

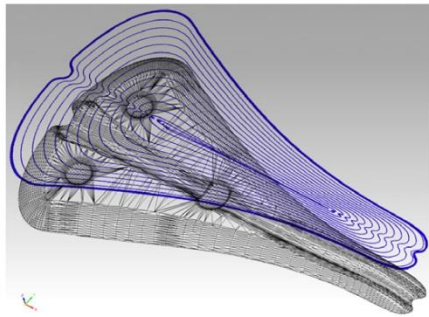


Fig. 13. XY route for projection on the STL surface.

The previous projection is not carried out using any mathematical calculation. Only the condition “the tool touches the surface” is used, and which is analysed following the application of a tool descent function from position (b) in Fig. 14.

The descent can be carried out in several ways [14], but in this case a lineal function with a maximum of ten steps has been chosen. Once contact is made between the tool and the surface, the

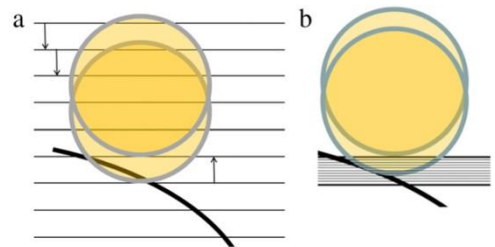


Fig. 15. Successive approaches. (a) Tool descends making contact with the surface and returns to the previous step. (b) The tool descends again but with smaller step sizes. This process continues until the increase is less than the required value. The tool always remains in the previous position.

tool returns to the previous step and the process is repeated with a reduction in the step size.

This process ceases (Fig. 15) when the step size is less than a predetermined value of tolerance and the final value of the vertical tool position is the third coordinate z.

Fig. 16 shows the flowchart of the method applied in Fig. 15. This method always starts from the same coordinate z, so it is not necessary to use the Eq. (10). However it is also possible to start from the position given by Eq. (10) and raise the position following the same routine until the intersection with the triangles disappears, descending again with a smaller increment.

The variation of the membership function for the descending stage (b) of Fig. 16 can be observed in the following figure (Fig. 17). The tolerance of this function decreases when there is a collision with any triangle in the influence area of the tool tip. The number of tolerance variations is not very high: three changes are typically enough, e.g. 1, 0.1, and 0.01 mm. If the acceptable tolerance increases these values could change slightly, e.g. 1, 0.1, and 0.02 mm, i.e. 0.01 mm more than in the previous case. In the first case the maximum theoretical distance between the nominal and the milling surfaces is 0.01 mm vs. the 0.02 mm of the second case, in which the required time decreases (obviously, mechanical tolerances should also be considered).

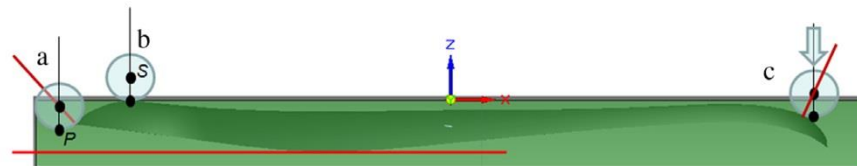


Fig. 14. Limit positions of the tool on the OZ axis.

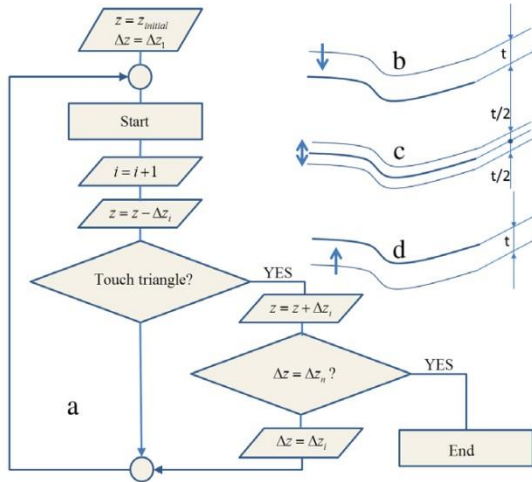


Fig. 16. Flowchart of the tool descending stage (b), where “t” is the tolerance, which can be up (b), centred (c) or down (d).

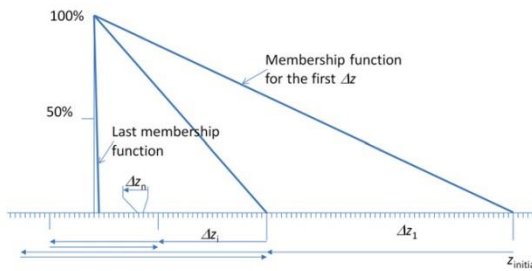


Fig. 17. Evolution of several membership functions with the tolerance.

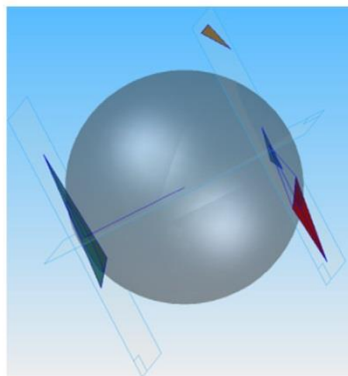


Fig. 18. Relative positions of the tool tip sphere and the triangles that compose the STL surface.

To correct the tool position given in (10) several cases of tool interference with the surface [11] have been studied. Fig. 18 shows the case that can happen. As mentioned before, this can be solved either in a deterministic way [11] or by correcting the displacement of the tool by means of successive approaches within a certain tolerance.

Study case A, Fig. 19: if any one of the three triangle vertices is contained within the sphere, an intersection of the tool tip with

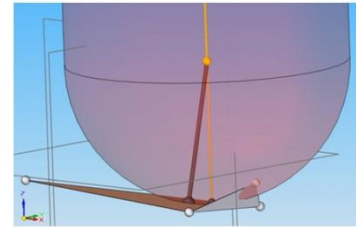


Fig. 19. Case A.

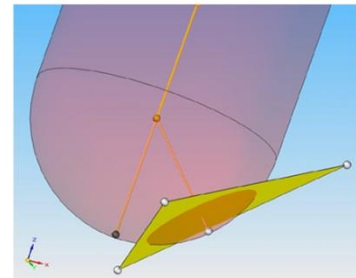


Fig. 20. Case B.

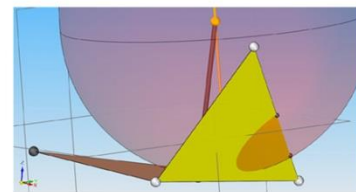


Fig. 21. Case C.

the surface occurs. That is, in this situation, the distance from the vertex to the sphere centre is less than the tool tip radius. This distance is checked for each of the j vertices ($j = 0, 1, 2$) of each triangle $-i-$ under study in the tool tip influence zone (see Fig. 9). If the distance then $d = \sqrt{(x_c - x_{ij})^2 + (y_c - y_{ij})^2 + (z_c - z_{ij})^2} < r$ the tool tip position must be corrected.

Study case B, Fig. 20: if the projection of the sphere centre on the plane (less perpendicular distance) is within of the triangle, an intersection occurs. Should this point fall outside the triangle there may be an intersection, as in cases A and C. In fact, the only real case could be B under certain conditions.

Study case C, Fig. 21: if any of the sides of the triangle cross the sphere and its points of intersection, M and N , are contained on this side. It should then be checked to see if these two points are between the vertices of the side. If only one point is inside, we are faced with case A.

3. Results: comparison with three commercial cam packages

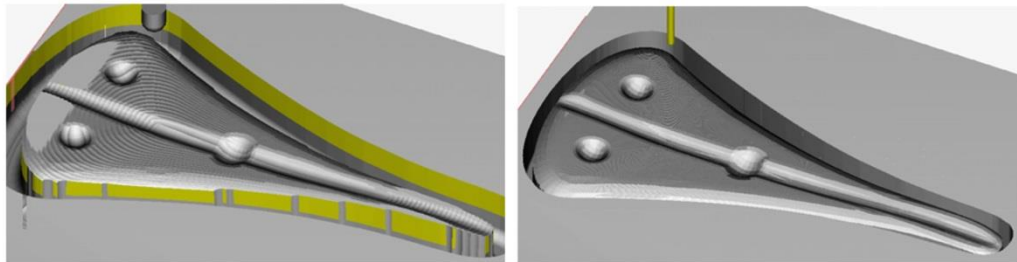
So et al. [28] compared their method with commercial CAD–CAM software in order to check the results of the proposed algorithm. In a similar way, three experts on different commercial CAM packages were contacted to apply the spiral tool-path using their software, so it was possible to compare their results with those obtained in this study, under the same machining conditions (roughness, feed rate and speed).

To avoid influencing the results, we did not participate in the process of obtaining the NC program with the commercial CAM

Table 1

Empty cells are filled to apply the addition (11) correctly.

X	-57.870	Y	-46.796	Z	5.074	X	-57.870	Y	-46.796	Z	5.074
X	-57.995			Z	5.304	X	-57.995	Y	-46.796	Z	5.304
X	-58.120			Z	5.497	X	-58.120	Y	-46.796	Z	5.497
X	-59.815	Y	-47.546	Z	5.598	X	-59.815	Y	-47.546	Z	5.598

**Fig. 22.** Machining with “WinUnisoft” simulator for the two crest heights. (Left: roughing with 10 mm tool tip. Right: finishing with 3 mm tool tip and 0.02 mm crest height.)**Table 2**

Comparison of tool-path lengths and numbers of points.

	Tool-path length (mm)	Number of points
CAM A	45 675	43 088
CAM B	37 797	34 567
CAM C	68 728	148 005
New algorithm	31 524	36 412

packages. Thus, this task was performed by a technical expert on each CAM package, so their results could be considered optimal.

The conditions and materials given to each expert were exactly the same, as listed below:

- STL file with the geometry to be machined. This file was exactly the same that was used to test our method, as shown in this paper;
- maximum roughness: 20 μm ;
- the followed tool-path is the same from the inside to the outside and vice versa;
- each expert had to obtain the NC program of just one complete path with a spherical tool tip with diameter = 3 mm;
- the machining conditions (advance and cut-speed) were also defined by us in order to be the same as we used, although they are not really relevant in this study;
- lineal interpolation was the only one to be used, so the list of coordinates (x, y, z) was preceded by G01.

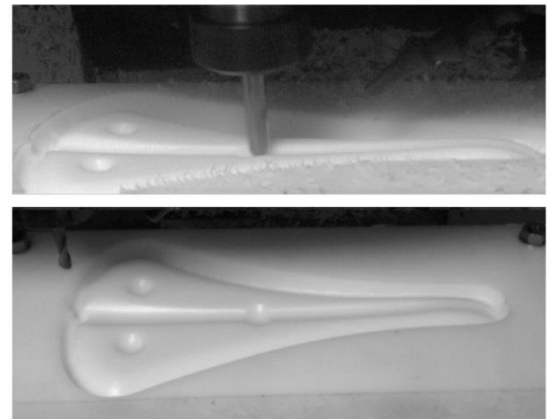
The compared parameters are the tool-path length and the exact number of interpolation points. The followed method is explained below. Other studies [29] use roughness as a parameter to compare results, but we considered that the tool-path length clearly indicated the required machining time and the number of interpolation points is related to the processing time of the NC [26].

The tool-path length has been obtained using the following Eq. (11), taking all the coordinates from an Excel spreadsheet.

$$l = \sum_{i=2}^n \left((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

The interpolation points in which a coordinate has been omitted because it was equal to the previous one have been completed, so the previous summation (11) could be correctly applied, as shown in Table 1.

Table 2 has been obtained applying the previous addition. This table compares the tool-path lengths and the number of points

**Fig. 23.** Roughing process (tool tip diameter = 10 mm) and machined piece (cycle saddle) before finishing (tool diameter = 3 mm).

obtained using each commercial CAM package and, in the last arrow, using our method.

As the distance between points is very small, the applied addition (11) gives a good approximation to the tool-path length and the machining time can be obtained dividing the total length by the advance speed. For that reason, the shorter tool-path will be described in less time.

The number of points influences the time needed by the NC machine to read all the information. If this number is too high in a tool-path, the buffer of the look-ahead function will be full and the processing speed will be lower [26]. This is why tool-paths with lower number of points are faster.

As said before, the followed method by each commercial CAM package and the routine presented in this paper has not been compared, because commercial CAM packages are oriented to general purposes. This means that the steps that must be followed, to achieve the same result, will be very similar to this algorithm steps; but in this case, those steps have been automated for the type of surfaces used in this paper. This is why, it is only needed to load the STL file. In the case of commercial CAM software, the developer can provide the customized macro, if required, to perform the same operation in just one step.



Fig. 24. Verifying the piece with a coordinate-measuring machine.

4. Conclusions

With the algorithms presented it is possible to mill STL surfaces, Figs. 22 and 23, providing that they comply with certain conditions, thereby obtaining regular profiles and with a quality of finish very close to that required.

The dimensional results (Fig. 24) are within the programmed margin of error for this piece (0.05 mm), providing enough quality for manufacturing different custom-made objects, such as the cycle saddle shown in this example or different types of ergonomic components, among other applications.

The measurement path was obtained from the points used in the milling process of the workpiece, but increasing their separation, i.e., decreasing the number of points (Fig. 25). The points were collected in a spreadsheet and, after that, exported to CAD to compare them with the nominal surface. In order to evaluate the results, the surface was cut into longitudinal and transversal sections.

The spherical cavities were used to position the horizontal plane of reference and to orientate the coordinate axes, as shown in Fig. 25. A longitudinal nominal profile is represented in Fig. 26, which also includes its measured profile, obtained by a linear interpolation of the measurement spiral points. The deviation in the measured points has always been smaller than the chosen tolerance value of 0.05 mm.

As shown in Table 2, the presented algorithm generates tool-paths with a length that makes possible to improve the machining time compared with commercial CAM packages.

Finally, the surface roughness was measured using confocal microscopy, obtaining the results shown in Fig. 27. These results displayed a maximum roughness below the programmed value, 20 μm in this case, in both the wide and the narrow areas of the piece.

Acknowledgements

The present work corresponds to a part of the innovation project titled "Knowledge as a development engine in mechanical manufacturing", financed by the Education Ministry of Spain and the European Social Fund.

Surface measurements (Fig. 27) have been performed at the Surfaces and Coatings Characterization Service at CEQMA (CSIC–Universidad de Zaragoza).

Our thanks go to fellows of the Integrated College of Technical Training "Corona de Aragón" from Zaragoza (Spain), Francisco Valdivia Calvo and Juan José Garde Barace, for their assistance in the preparation of parts and field work.

We are grateful to the English teacher Richard J. Stephenson, for the English correction.

This paper could not be the same without the help of three anonymous experts of leader CAM companies. Thank you very much for making possible the comparison for the third part of this paper.

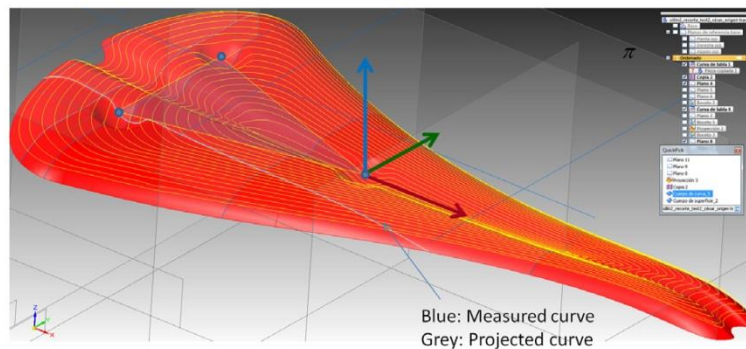


Fig. 25. Measurement process.

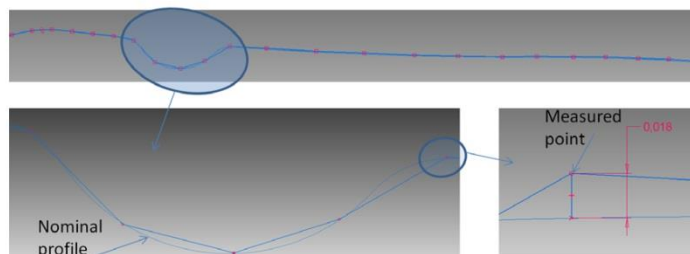


Fig. 26. Longitudinal section that shows the measured profile vs. the nominal.

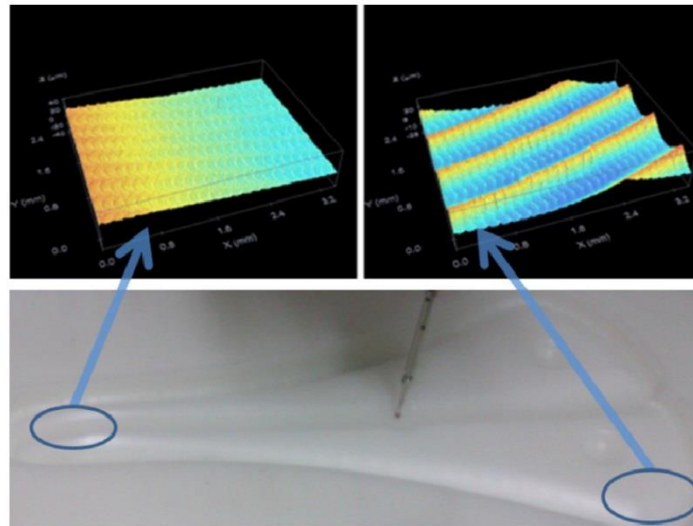


Fig. 27. Images of the piece surface obtained with confocal microscopy. (Left: narrow area. Right: wide area.)

References

- [1] Chen T, Ye PQ. A tool path generation strategy for sculptured surfaces machining. *J Mater Process Technol* 2002;127:369–73.
- [2] Chen T, Shi Z. A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. *J Mater Process Technol* 2008;208:259–63.
- [3] Hsieh H-T, Chu C-H. Improving optimization of tool path planning in 5-axis flank milling using advanced PSO algorithms. *Robot Comput -Integr Manuf* 2013;29:3–11.
- [4] Quinsat Y, Sabourin L. Optimal selection of machining direction for three-axis milling of sculptured parts. *Int J Adv Manuf Technol* 2007;33:684–92.
- [5] Held M, Spielberger C. A smooth spiral tool path for high speed machining of 2D pockets. *Comput-Aided Des* 2009;41:539–50.
- [6] Hu J, Shen H, Zeng S, Wang Y. B-spline tool offset of a free-form curve in the shoe last high-speed machining CNC system. *Int J Adv Manuf Technol* 2006;30:864–9.
- [7] Lee RT, Cheng WS. A multizone scaling method for CAD in shoe sole design. *Int J Adv Manuf Technol* 2002;19:313–7.
- [8] Vijayaraghavan A, Sodemann A, Hoover A, Mayor JR, Dornfeld D. Trajectory generation in high-speed, high-precision micromilling using subdivision curves. *Int J Mach Tools Manuf* 2010;50:394–403.
- [9] Banerjee A, Feng H-Y, Bordatchev EV. Process planning for Floor machining of 2 1/2 D pockets based on a morphed spiral tool path pattern. *Comput. Ind. Eng.* 2012;63:971–9.
- [10] Boujelbene M, Moisan A, Tounsi N, Brenier B. Productivity enhancement in dies and molds manufacturing by the use of C(1) continuous tool path. *Int J Mach Tools Manuf* 2004;44:101–7.
- [11] Kayal P. Offset error analysis of ball-end mill for cutter-path generation from point-based surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 2008;36:1133–44.
- [12] Chen ZC, Fu Q. A practical approach to generating steepest ascent tool-paths for three-axis finish milling of compound NURBS surfaces. *Comput-Aided Des* 2007;39:964–74.
- [13] Szilvasi-Nagy M, Matyasi G. Analysis of STL files. *Math. Comput. Modelling* 2003;38:945–60.
- [14] Lu B, Chen J, Ou H, Cao J. Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process. *J Mater Process Technol* 2013;213:1221–33.
- [15] Azaouzi M, Lebaal N. Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method. *Simul. Modell. Pract. Theory* 2012;24:49–58.
- [16] Sun Y-W, Guo D-M, Jia Z-Y. Spiral cutting operation strategy for machining of sculptured surfaces by conformal map approach. *J Mater Process Technol* 2006;180:74–82.
- [17] Popov K, Petkov P. Layer based micro-machining—new approach for tool-path generation. *CIRP J Manuf Sci Technol* 2011;4:370–5.
- [18] Dweiri F, Al-Jarrah M, Al-Wedyan H. Fuzzy surface roughness modeling of CNC down milling of Almic-79. *J Mater Process Technol* 2003;133:266–75.
- [19] Lo S-P. An adaptive-network based fuzzy inference system for prediction of workpiece surface roughness in end milling. *J Mater Process Technol* 2003;142:665–75.
- [20] Ip RWL, Lau HCW, Chan FTS. An economical sculptured surface machining approach using fuzzy models and ball-nosed cutters. *J Mater Process Technol* 2000;138:579–85.
- [21] Iqbal A, He N, Li L, Dar NU. A fuzzy expert system for optimizing parameters and predicting performance measures in hard-milling process. *Expert Syst. Appl.* 2007;32:1020–7.
- [22] Hoa W-H, Tsai J-T, Lin B-T, Chou J-H. Adaptive network-based fuzzy inference system for prediction of surface roughness in end milling process using hybrid Taguchi-genetic learning algorithm. *Expert Syst. Appl.* 2009;36:3216–22.
- [23] Petzold R, Zeilhofer H-F, Kalendera WA. Rapid prototyping technology in medicine—basics and applications. *Comput. Med. Imaging Graph.* 1999;23:277–84.
- [24] Choi Y-K, Banerjee A. Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces. *Int J Mach Tools Manuf* 2007;47:689–96.
- [25] McMaster RB. The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization. *Cartographica* 1989;26:101–21.
- [26] Huertas Talón JL, Gella Marín R, García-Hernández C, et al. Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points. *Int J Adv Manuf Technol* 2013;69(1–4):361–74.
- [27] Vijayaraghavan A, Hoover AM, Hartnett J, Dornfeld DA. Improving endmilling surface finish by workpiece rotation and adaptive toolpath spacing. *Int J Mach Tools Manuf* 2009;49:89–98.
- [28] So BS, Jung YH, Kurress TR, Hwang SM. 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization. *J Mater Process Technol* 2007;187–188:2–5.
- [29] Quinsat Y, Sabourin L, Lartigue C. Surface topography in ball end milling process: description of a 3D surface roughness parameter. *J Mater Process Technol* 2008;195:135–43.



Contents lists available at ScienceDirect

Measurement

journal homepage: www.elsevier.com/locate/measurement

Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software



C. García-Hernández*, R. Gella-Marín, J.L. Huertas-Talón, L. Berges-Muro

Department of Design and Manufacturing Engineering, University of Zaragoza – Campus Río Ebro, C/María de Luna, 3 – 50018 Zaragoza, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 August 2014
 Received in revised form 1 February 2016
 Accepted 10 February 2016
 Available online 17 February 2016

Keywords:

Gear measurement
 Spreadsheet
 Coordinate measuring machine (CMM)
 General-purpose software
 Manufacturing engineering education

ABSTRACT

Conventional methods to verify gears are based on manual measurement instruments, such as vernier caliper gauges, gear pitch micrometers, profilometers, among others. The use of these instruments is widely described in technical literature, while in the actual industrial arena the coordinate measurement machines (CMM) are commonly used to obtain, with the appropriate software, all the parameters including the tooth profile.

Commercial software for measuring gears with a CMM is usually based on continuous touch of teeth's flanks. In the educational centres is still common to find single-point probing point to point touch machines. To transform them into continuous touch machines, new software and accessories are required and costs can be excessive for instructional purposes.

This paper presents the geometrical and mathematical principles to develop a software application for measuring gears and describes its implementation using general-purpose spreadsheet software. For this purpose, the conventionally used software of the CMM is supported by a spreadsheet that calculates the probe positions and direction of measurement. The communication between the spreadsheet and the CMM software is established by ASCII files. At the end of this process, the spreadsheet displays the measurement results, thanks to its graphical and computing power, making possible to improve the learning process of students or training professionals.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Preparing useful learning environments in the field of manufacturing is usually a difficult task. This problem is commonly solved using in the classes industrial equipment or the machines available for researching. As this kind of equipment is generally very expensive, it is only possible to have one machine of a kind available and, if specific software is required, it can only work with that machine connected. This can be quite complex in many cases, especially

when several modules have to be purchased, because being able to use specific functions can be significantly more expensive.

Lecturers can use different strategies to facilitate the learning process of the techniques related to the manufacturing sector, such as using learning environments [1]. These environments are used for distant education, but they can also be used in face-to-face classes, taking advantage of their design focused on multiple users.

In those cases in which real equipment is not available for any reason, including its size, prize or placement, virtual machines can be useful for educational purposes. Published examples include online virtual simulators to explain complex technological processes, integrating

* Corresponding author. Tel.: +34 876555182.

E-mail address: garcia-herandez.cesar@unizar.es (C. García-Hernández).

Nomenclature			
r_p	probe radius plus safety distance. Distance between center probe and flank	n	number of measuring points
x, y	involute coordinate	s_j	length of each involute segment arch
r_b	base circle radius	α_2, α_3	successive angles α of measuring
α	angle between the base circle radius and OX axis	x_p, y_p	center probe coordinates
r_i	initial value of radius of measuring	r_{xy}	involute polar radius
r_e	end value of radius of measuring	$\Delta x, \Delta y$	coordinates correction
α_i	initial or first value of angle α of measuring	θ	angle between base circle radius and involute polar radius
α_e	end value of angle α of measuring	γ	angle between OX axis and involute polar radius
s	length involute arch between α_i and α_e		
d_b	base diameter radius		

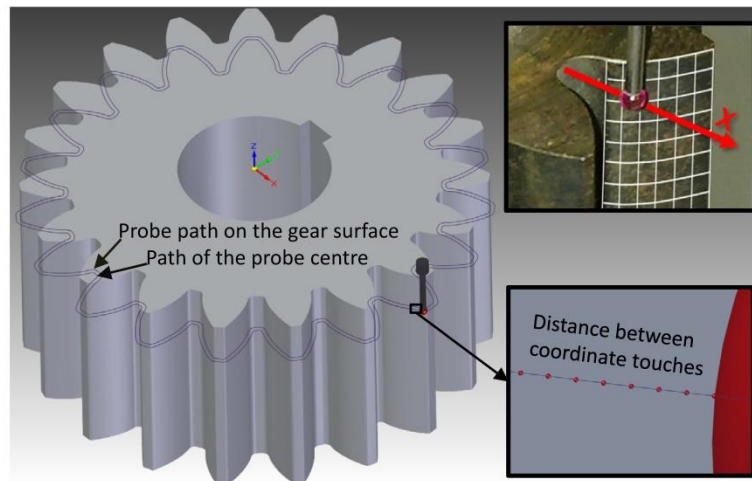


Fig. 1. Gear measurement using a CMM (left: profile measurement; right: flank surface measurement).

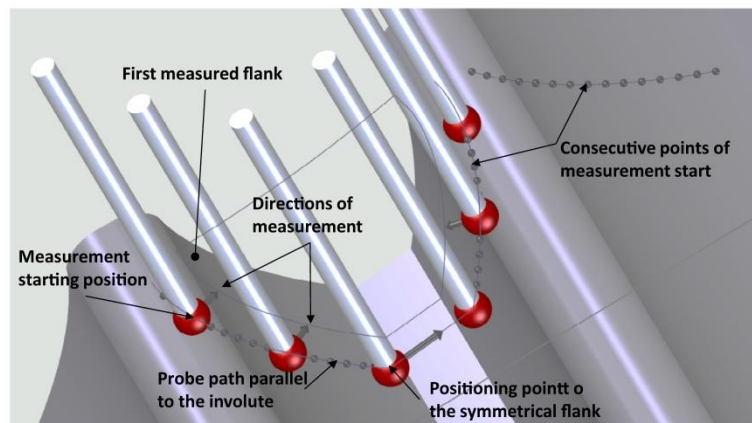


Fig. 2. Control points along the involute path and measurement direction.

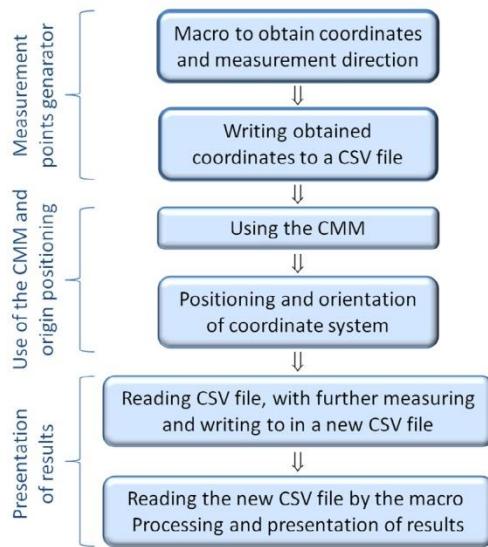


Fig. 3. Gear verification process.

virtual experiments, based on modelling and mathematical simulation [2], to optimize the learning process in engineering courses.

Machines like CMMs have not a standard programming language (similar to the ISO code for numerical control machines), although dimensional measuring interface standard (DMIS) code is commonly used [3], but not all the machines have it integrated as their native code. In those cases, the DMIS code is transformed into the CMM's code [4]. If all the manufacturers would apply a universal programming language, it would be possible to use virtual simulators [5] in the classroom, making training modules available for educational purposes with only one real machine. An alternative option could be to use the offline programming software that each manufacturer develops [4], that can be used to simulate the measuring process, but costs are usually very high for instructional purposes.

Gear measuring software for CMM is provided as additional modules available to be purchased, increasing the total costs of the required software, if they have to be included as a part of the learning process. In educational laboratories for measurement, the number of machines is limited to one in many cases and having gear measurement software becomes a requirement. This software can be applied in practical sessions with students or training professionals, so they can learn using real software that is applied in industry, although conventional measurement practices are also applied.

Different methods can be applied to determine the dimensional parameters of a gear, including the conventional ones [6], such as using different kinds of micrometers. Although these are classical methods, innovative contributions are still possible [7]. Other possible methods include laser interferometry [8], specific measuring machines [9] and artificial vision advances in the field of optical verification [10].

General purpose CMMs, with the appropriate software [11], can be considered one of the most versatile methods for verifying a gear profile (Fig. 1) and even all the flank, although currently optical methods can be applied to avoid the probe requirement, increasing the measuring speed [12].

The educational process in Manufacturing Engineering requires the development of practical sessions with student, which can be purposed attending to different educational methods [13]. In this case, attending to the importance of the gear verification, the ADDIE [14,15] methodology was applied. Details of the practical application of this methodology in the engineering education are described in previous work [16].

The software applied in this study makes possible to verify bevel gears (and it could also be applied to other types) using a CMM without continuous touch. Commercial software, e.g.: "Mitutoyo™ Gearpak®" and "Zeiss™ Gear Pro®", to verify gears usually require this feature (continuous touch), which can be too expensive to be used for educational purposes.

2. General approach

The general geometry of the bevel gear and the parameters to be verified were considered according to the required standards [17,18] and to develop the software to verify gears, two different ways were also considered. A first approach could be based on implementing an algorithm based on the native software of the CMM used. A second approach was based on the use of general software to calculate coordinates. The required condition was to apply a point to point touch machine, as shown in Fig. 2.

After trying both options, a general purpose spreadsheet was chosen, so the verification process of the gear could follow this diagram (Fig. 3).

3. Previous mathematical model

The flank points in a gear can be calculated applying different alternatives [19]. In this case the method was based on choosing the same distance between consecutive points along the profile of the tooth (involute).

The length of each involute arch is calculated from the probe-centre locations number. If the required arch length must be increased, the number of points must be reduced and vice versa. The trace of points starts in the minimum measurement diameter and ends in the maximum measurement diameter (Fig. 4) and three additional points are included:

- (1) The intersection between the pitch circle and the tooth flank, if it was not included in the previously calculated points.
- (2) The flank point crossed by the addendum. This point is needed, as well as the following one, to avoid collisions of the probe trajectory with the gear.
- (3) The flank point crossed by the addendum plus two times the safety distance. This point avoids collisions when the tooth is bordered in order to start the symmetric flank.

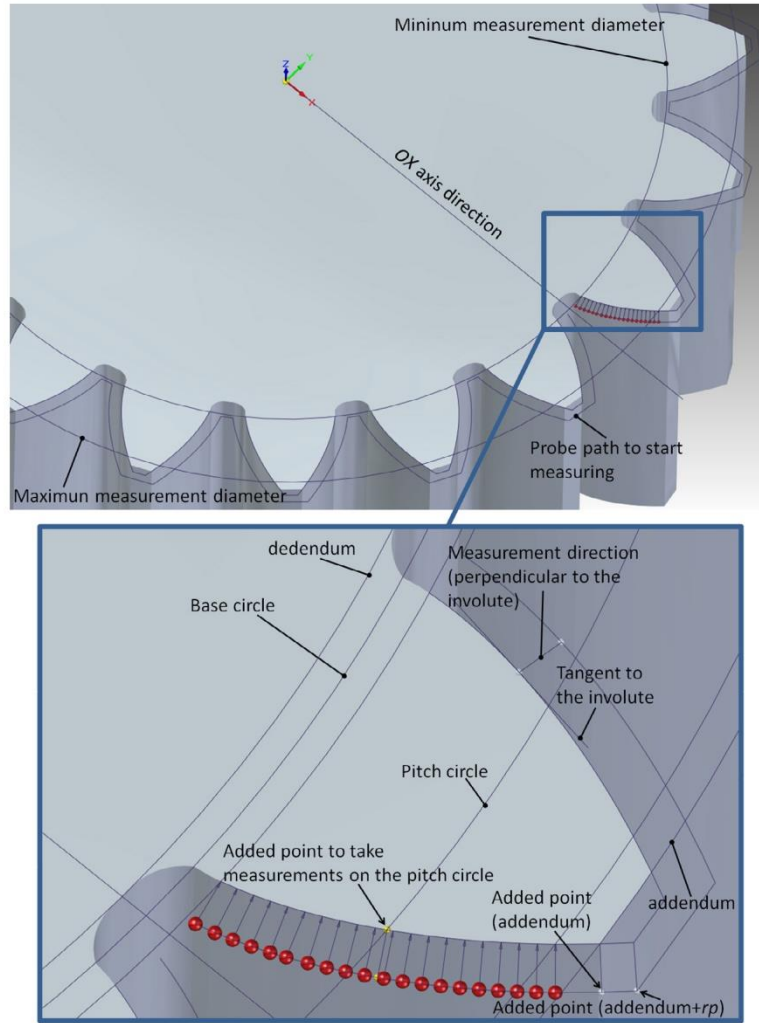


Fig. 4. Selection of the control points around a tooth.

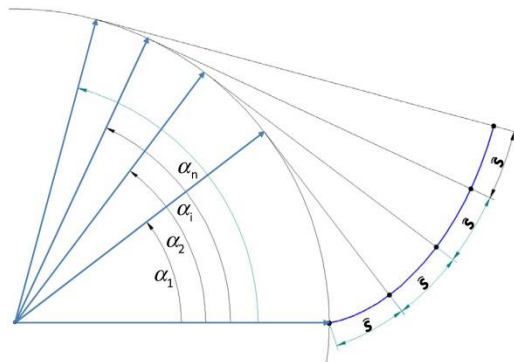


Fig. 5. Approximation of the probe path to the involute (same arch lengths).

The measuring points on the involute and the measurement direction are obtained following a similar method to a previously described one [20], but in this case, r_p is not the probe radius, but the safety distance. This avoids collisions between the probe and the profile of the tooth.

The described method is based on the involute equations and their definition can be found in a previous reference [21]. The procedure to find the points is described in [22], for an equal arch length, as shown in [19].

Now, the intention is not to obtain the minimum chordal error, but to take measures at identical arch lengths. Thus, from the involute Eq. (1), its arch length is given by (2):

$$\begin{aligned} x &= r_b \cdot \cos \alpha + \alpha \cdot r_b \cdot \sin \alpha \\ y &= r_b \cdot \sin \alpha - \alpha \cdot r_b \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

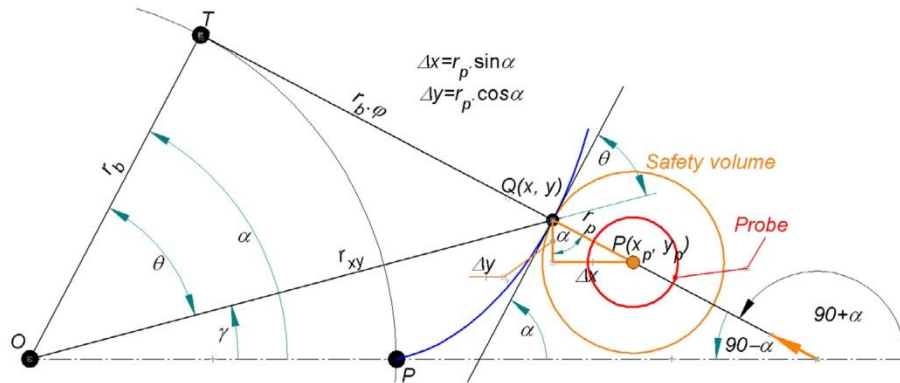


Fig. 6. Correction of the position in the plane XY for verification.

A	B	C	D	E
GEAR DATA				
1	Module m	5	α	rad
2	Correction factor k	0.63		
3	Number of teeth z	18		0.1007
4	Pressure angle α	20 degrees		0.3325
5	Initial diameter of involute measurement di	85	0 Is di less than df or db? (0 = 'correct')	0.4593
6	Final diameter of involute measurement de	104	0 Is de greater than dc? (0 = 'correct')	0.5446
7	Number of measurement points n	6	2.1230 mm is the arc length	0.5580
8	Axial height of involute measurement za	-5		0.6417
9	Name of the CSV file to be generated	MSZ18_01_03_14		0.7157
10	Axial safety height zs	10		0.7615
11	Initial height to define the OZ axis zi	-12		0.7904
12	Measuring length to define the OZ axis lz	8		-0.7904
13	Diameter of reference cylinder dr	-50	<0 inner cylinder vs. >0 external cylinder	-0.7615
14	Radius or positioning distance rp	1.5	The probe radius must be smaller	-0.7157
15	Number of coordinate system nc	1001	IMPORTANT	-0.6417
16	Number of probe np	1	This worksheet represents values in which the polar radius of the involute is greater or equal to the initial involute radius, and less or equal to the final involute radius, that is, between the initial and final diameters. Therefore, the gear is not drawn from the dedendum to the addendum. If all the gear should be drawn, the initial measurement diameter can be equal to the dedendum diameter or to the base diameter (the greatest) and the final diameter equal to the addendum.	-0.5580
17	Generate CSV file			
18	RESULTS FOR THE CSV MEASUREMENT FILE			
19	Number of the coordinate system nc	1001		-0.4593
20	Probe number np	1		-0.3325
21	Module m	5		0.4498
22	Correction factor k	0.63		0.8918
23	Number of teeth z	18		0.8936
24	Pressure angle α	20		0.9071
25	Pitch diameter d	96.3		0.9908
26	Addendum diameter da	106.3		1.0647
27	Dedendum diameter df	83.3		1.1105
28	Base diameter db	84.57233587		1.1395
29	Tooth height h	11.25		-0.4413
30	Initial diameter of involute measurement di	85		-0.4124
31	Final diameter of involute measurement de	104		-0.3666
32	Axial safety height zs	10		-0.2926
33	Axial height of involute measurement za	-5		-0.2089
34	Initial height to define the OZ axis zi	-12		-0.1955
35	Measuring length to define the OZ axis lz	8		-0.1102
36	Diameter of reference cylinder dr	-50		0.0166
37	Radius or positioning distance rp	1.5		0.2484
38	Number of measurement points n	6		0.7988
39				
40				
41				
42				
43				
44				
45				
46				
47				
48				
49				
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63				
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				
81				
82				
83				
84				
85				
86				
87				
88				
89				
90				
91				
92				
93				
94				
95				
96				
97				
98				
99				
100				

Fig. 7. Data input.

$$\int_A^B \sqrt{d^2x + d^2y} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sqrt{(r_b \alpha \cos \alpha d\alpha)^2 + (r_b \alpha \sin \alpha d\alpha)^2} = r_b \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \alpha d\alpha = \frac{1}{2} r_b (\alpha_2^2 - \alpha_1^2) \quad (2)$$

This equation makes possible to obtain points regularly separated (Fig. 5), in order to verify the gear profile.

To calculate the angles of the parametrical involute equation, it is necessary to determine the initial and final angles, according to the verification radius. Being r_i the initial verification radius of the involute (greater than the base and the dedendum radii) and r_e the extreme radius to be verified (lower than the addendum). This means that the initial and the extreme radii in the involute equation can be obtained from (2), as follows:

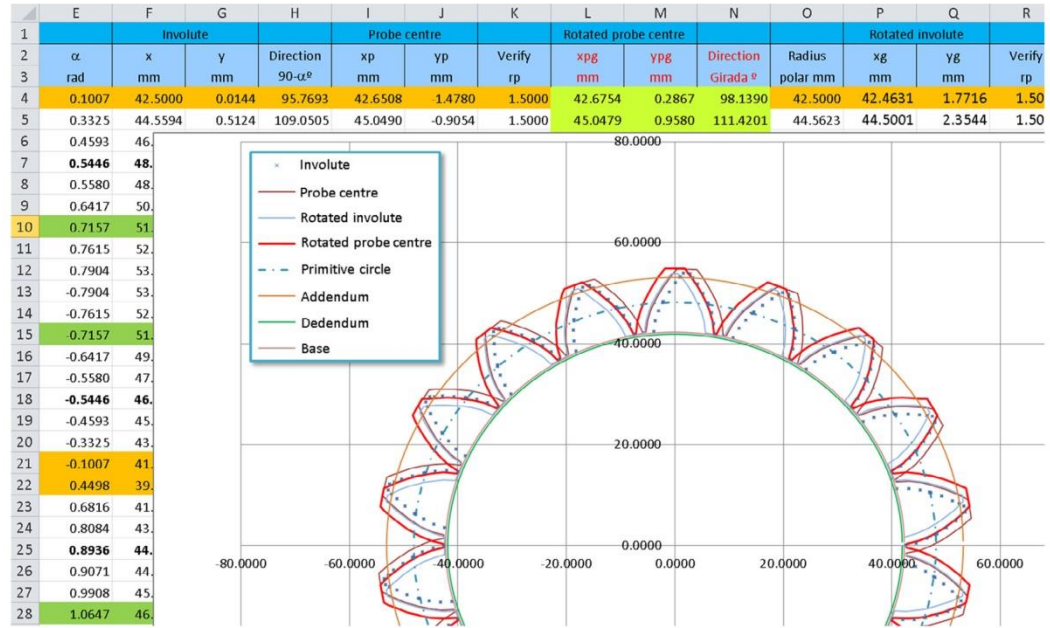


Fig. 8. Screenshot with the positioning points of the probe and the measurement direction.

	A	B	C	D
50	Complementary calculations	Additional results	Units	Code used for additional results
51	Verify if the diameter is greater than d_i	0		=SI(B6<B29;"Lower than the inside diameter";)
52	Verify if the diameter is lower than d_b	0		=SI(B6<B30;"Lower than the base diameter";)
53	Check both conditions	0		=SI(B51<>B52;"Lower than d_b or d_i ";)
54	Initial measurement angle of involute α_i	0.100693303	Radians	=(B32/B30)^2-1^(1/2)
55	Final measurement angle of involute α_e	0.715683423	Radians	=(B33/B30)^2-1^(1/2)
56	Involute length between α_i and α_e	10.61517328	mm	=B30*(B55^2-B54^2)/4
57	Segment length of measurement arch	2.123034656	mm	=B56/(B8-1)
58	Angle with pitch circle (φ)	0.498674221	Radians	=ACOS((B4*COS(PI()*B5/180))/(B4+2*B3))
59	Parameter angle in the primitive diameter (α)	0.544582282	Radians	=(((B4+2*B3)/(B4*COS(B5*PI()/180)))^2-1)^(1/2)
60	Angle between segments α y φ (γ)	0.045908061	Radians	=B59-B58
61	Rotation angle of coordinate system (ϕ)	0.041358402	Radians	=PI()/2*B4)-B60
62	Symmetry angle (ψ)	0.133174523	Radians	=PI()/B4/2+B60
63	Position angle of addendum	0.761464547	Radians	=(B28/B30)^2-1^(1/2)
64	Positioning angle of dedendum	0.790397853	Radians	=(B28-B39)/B30)^2-1^(1/2)

Fig. 9. Screenshot with other required calculations and the code used to obtain the additional results.

$$\alpha_i = \sqrt{\left(\frac{r_i}{r_b}\right)^2 - 1} \quad \alpha_e = \sqrt{\left(\frac{r_e}{r_b}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

The arch length within these angles can be obtained with the previous values in Eq. (2):

$$\bar{s} = \frac{1}{2} r_b (\alpha_e^2 - \alpha_i^2) = \frac{1}{4} d_b (\alpha_e^2 - \alpha_i^2) \quad (4)$$

If n is the number of measuring points, including the first and last ones, the length of each involute segment is:

$$\bar{s}_j = \frac{\bar{s}}{n-1} \quad (5)$$

The expression (3) allows obtaining the recursive expression (6), giving the parameter α for each measuring point:

$$\bar{s}_j = \frac{1}{2} r_b (\alpha_2^2 - \alpha_1^2) \Rightarrow \alpha_2 = \sqrt{\frac{2\bar{s}_j}{r_b} + \alpha_1^2}$$

$$\bar{s}_j = \frac{1}{2} r_b (\alpha_3^2 - \alpha_2^2) \Rightarrow \alpha_3 = \sqrt{\frac{2\bar{s}_j}{r_b} + \alpha_2^2} \quad (6)$$

This process is repeated in order to obtain the value before the last one (the last value is known, from previous

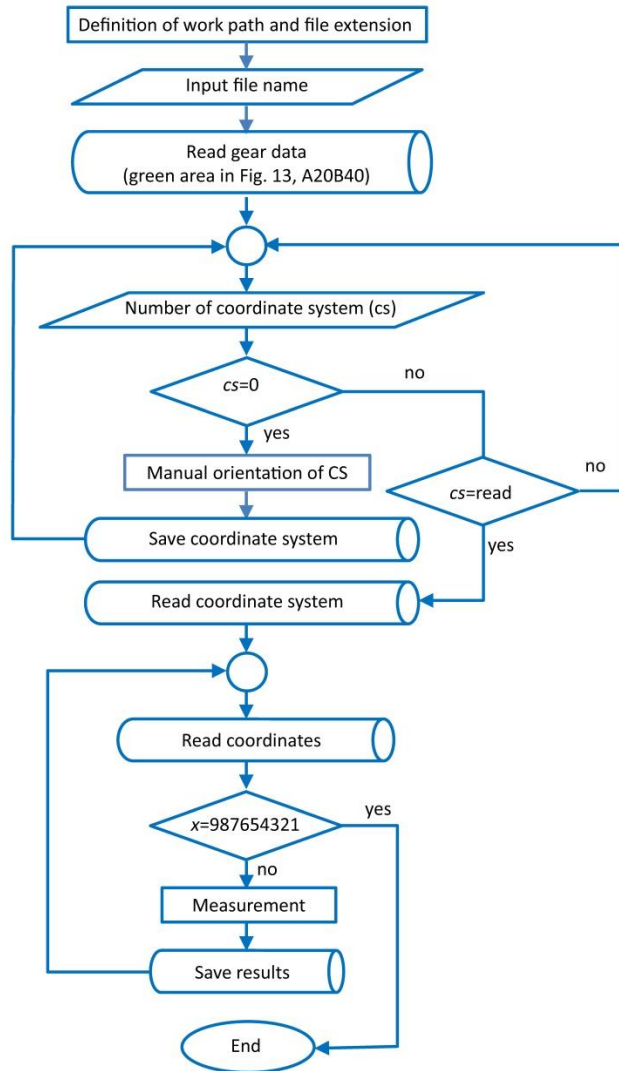


Fig. 10. Flowchart of the CMM program.

calculations). The preceding values can be entered into the involute Eq. (1), being r_b the base circle radius, to obtain coordinates (x, y) of each involute point.

The previously obtained point is not valid for measuring purposes. The probe radius must be taken into account with the required safety distance, so the centre position of the probe must be obtained.

To simplify the process, r_p is defined as the probe radius plus the safety distance, Fig. 6.

In addition, the measurement direction is given by the angles related to the axes of the line perpendicular to the involute. It is enough to know the angle with the OX axis, because the angle with the OZ axis is always 90° , while the angle with the OY axis is the

complementary angle (the sum of the squares of the director cosines is 1).

According to Fig. 6, and taking into account the geometrical properties of the circle involute, the corrected coordinates are:

$$x_p = x + r_p \sin \alpha \quad y_p = y - r_p \cos \alpha \quad (7)$$

The measurement direction is given by the angle $90^\circ + \alpha$ with the OX axis.

It should be considered the OX axis crossing the involute start from the base circle is not the most usual orientation. In this paper, the OX axis crosses the tooth hole. Thus, a rotation of the coordinate system must be done, as shown below.

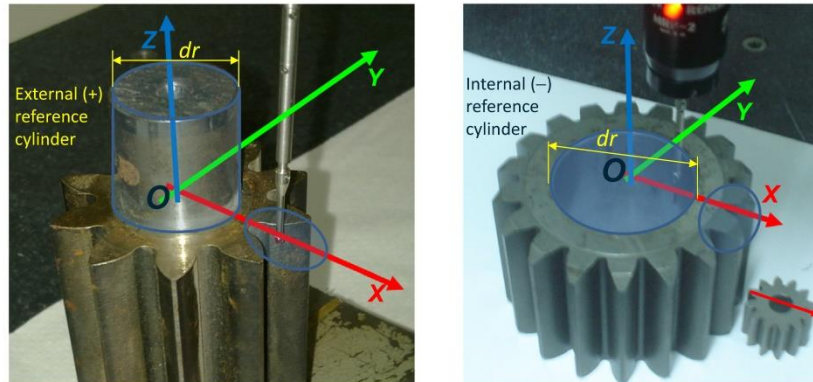


Fig. 11. Three gears placed on the measurement area of a CMM.

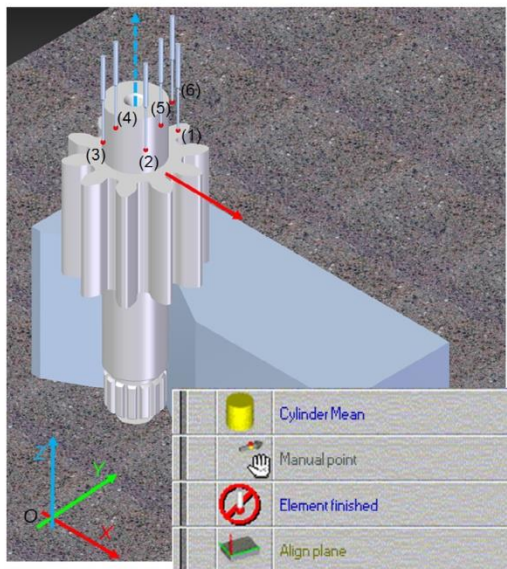


Fig. 12. Measurement of a cylinder to define the OZ axis.

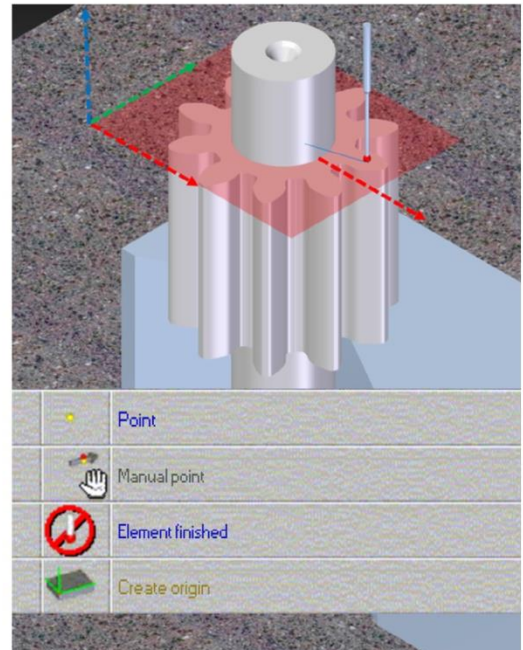


Fig. 13. Touching a point with the probe to define $z = 0$.

4. Implementation

The implementation process has three clearly different stages, according to Fig. 3.

4.1. Generation of the measuring points

This stage is based on previous equations, which are introduced to a spreadsheet, using its native programming language. The input data can be placed in column A, rows 2–17 (Fig. 7).

Some of these data have an added meaning, e.g., the diameter sign of the reference cylinder can be used to know if a hole or “inner cylinder” is measured, because in this case it would be negative.

These data are exported to a CSV file, as well as separately obtained data, such as the base diameter or the pitch diameter. All the values are included in a final file, in addition to the measuring results.

The spreadsheet includes complementary information, with an educational purpose, to display the results obtained with the macros (Fig. 8).

Some additional results are directly obtained with the spreadsheet, without macros. The applied expressions can be found in Fig. 9.

The data exported to the CSV file are the probe position x , y (columns L, M in Fig. 8), measurement direction (column N). Additional data include: kind of point, number

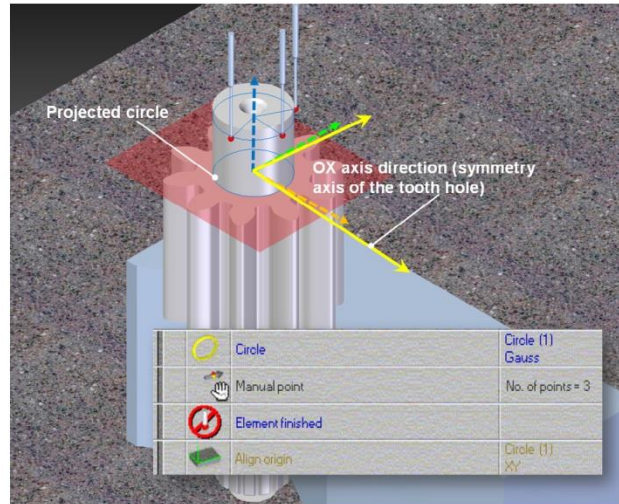


Fig. 14. Measurement of a circle to define the point (0, 0, 0).

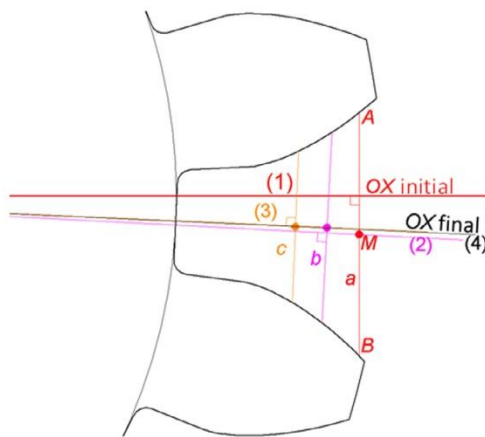


Fig. 15. Iterative process of OX axis orientation.

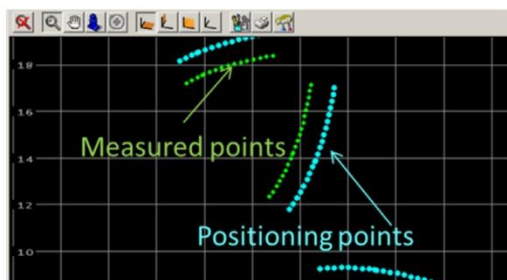


Fig. 16. Points displayed in the CMM software.

of teeth and nominal involute coordinates. Finally, the CSV file is generated. This file is read by the CMM software, after developing the required program. As an example,

the case of a Mitutoyo™ machine, using the measurement software Geopak®, is explained below.

4.2. Using the CMM

The essential blocks of the CMM program can be observed in the following flowchart (Fig. 10).

The obtained CSV was saved in the work folder. The CMM program requires a file name, in order to read the previously written data by means of the spreadsheet.

After reading the values, several previous steps are required, as in the measurement process of any other piece:

- Piece placement on the measurement area of the CMM. The symmetry axis of a tooth hole is placed approximately parallel to the OX axis. Fig. 11 shows three examples of gears to be measured. The gear on the left has is a part of a real pump, the central one was used for testing purposes by a real company and the last one was an example made by the authors [21].
- Alignment of the coordinate system. In this stage, the number of coordinate system is entered. If this value is 0, a manual alignment process is started, while for other value, the previously saved coordinate system is applied.

The common process of alignment of the coordinate system can be followed in Figs. 12–14 and, finally, the orientation of the OX axis (Fig. 15).

Segments a, b and c are intentionally too separated, in order to make clear the iterative process of alignment (Fig. 15). The distance of those segments to the origin is approximately equal to the pitch circle radius.

After the previous process, a series of movements is automatically followed, within the safety limits previously entered by means of the spreadsheet and read by the CMM program from the CSV file.

	A	B	C
1	Data		File end added
2	CSV file to be read:	M5Z18_01_03_2014	_measured.CSV
3			
4	Read measurement file		
5			
6	Verify tooth profile		
7			
8			
9	Tooth thickness in the pitch circle		
10			
11			
12			
13	Tooth step in the pitch circle		
14			
15			
16			
17			
18	Touch probe radius =	0.984107	
19			
20	RESULTS FOR THE CSV FILE c:\M5Z18_01_03_2014_medido.CSV		
21	Number of the coordinate system nc	1001	
22	Probe number np	1	
23	Module m	5	
24	Correction factor k	0.63	
25	Number of teeth z	18	
26	Pressure angle a	20	
27	Pitch diameter d	96.3	
28	Addendum diameter da	106.3	
29	Dedendum diameter df	83.8	
30	Base diameter db	84.57233587	
31	Tooth height h	11.25	
32	Initial diameter of involute measurement di	85	
33	Final diameter of involute measurement de	104	
34	Axial safety height zs	10	
35	Axial height of involute measurement za	-5	
36	Initial height to define the OZ axis zi	-12	
37	Measuring length to define the OZ axis lz	8	
38	Diameter of reference cylinder dr	-50	
39	Radius or positioning distance rp	1.5	
40	Number of measurement points n	6	

Fig. 17. Data for processing the measurement file.

- Finally, the probe positioning coordinates and the measurement direction are read from the CSV file in order to measure the points on the gear profile (Fig. 16). The measured points are saved in a new CSV file.

4.3. Analysis of results

The measurement file obtained in the previous stage is processed by a new spreadsheet, which applies four macros to distribute the information in three different worksheets of the spreadsheet.

The first worksheet contains:

- The name of the measurement file, entered in cell B2 (number 1, Fig. 17).
- Macro buttons to choose the analysis to apply (numbers 2-5, Fig. 17).
- Information from the measurement CSV file (number 6, Fig. 17).
- Tabs with the names of the worksheets which contain auxiliary results (number 7, Fig. 17).

- Probe radius, saved in the CSV file, and directly obtained from the CMM memory (cell B18, Fig. 17).

Each macro button (numbers 3-5, Fig. 17) compares the initial and the measurement files (read after pressing the button 2, Fig. 17). As an example, a tooth profile is obtained after deciding the specific tooth and its flank. Fig. 18 shows the difference between the measured profile and the nominal profile. The process starts obtaining, in the radial direction, the difference between the theoretical involute and the measured one.

5. Conclusions

The most important goal of this work is being able to use specific software for training and educational purposes. With the application of this software, students can learn gear related concepts (theory and practice) experimentally.

There are no additional costs with this proposal, if the CMM is already available in the educational centre, because it is only necessary to work with the available office software, which can even be freeware.

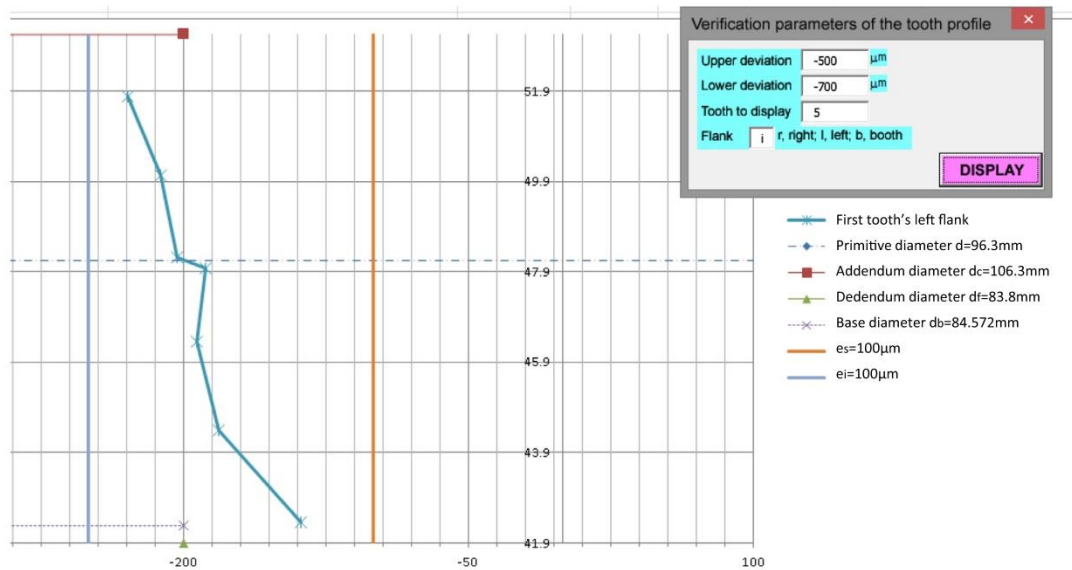


Fig. 18. Representation of the left profile (fifth tooth).

This application is based on two independent stages. A first stage consists of the appropriate definition of points to produce the CMM movement. Although this stage was developed for a specific machine, its algorithm could be applied to any automatized device. A second stage makes possible to process the previously obtained points, in order to verify the gear features. From the educational point of view, it is possible to apply data captured with any device used to obtain coordinates of points, e.g.: 3D scanners, CMMs or milling machines with continuous touch probes. Those data can even be mathematically processed, with the software developed, in order to obtain graphics related to typical errors. Thus, it is possible to work with a real CMM or using a virtual simulator.

There is also an option to apply this software in real industrial environments, with the possibility of adding specific modules to different kinds of gears. It is important to take into account that the data processing is not depending on the CMM model.

Further research

This method has already been integrated in face-to-face classes and it could also be integrated in distant learning. As the data processing is not depending on the availability of a CMM, the only requirement would be the treatment of spreadsheets. This makes possible to propose practical exercises to students, giving acquired data to be processed by them.

Acknowledgements

This work is part of the project “El conocimiento como motor de la fabricación mecánica” (“*Knowledge as a driving force for mechanical manufacturing*”), supported by the Spanish Ministry of Culture and Sport and the European

Social Fund. Our thanks go to fellows of the Integrated College of Technical Training “Corona de Aragón” from Zaragoza (Spain), Francisco Valdivia Calvo and Juan José Garde Barace, for their assistance in the preparation of parts and field work.

Our thanks go also to the companies Construcciones Mecánicas Echeverría and Talleres SEGI, for measuring several gears' profiles with two different machines, in order to compare the obtained results with the described software.

References

- [1] Can Saygin, Firat Kahraman, A Web-based programmable logic controller laboratory for manufacturing engineering education, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 24 (2004) 590–598.
- [2] Alexander Babich, Konstantinos Th Mavrommatis, Teaching of complex technological processes using simulations, *Int. J. Engng Ed.* 25 (2009) 209–220.
- [3] Bailey Squier. History of the DMIS Standard and The Dimensional Metrology Standards Consortium (DMSC, Inc.). <www.dmis-inc.org>.
- [4] MCOsmOS Software for 3D-CNC-Coordinate Measuring Machines. <www.mitutoyo.eu>.
- [5] Calin Neamt, Dan Hurgoiu, Sorin Popescu, Mihai Dragomir, Herbert Osanna, Training in coordinate measurement using 3D virtual instruments, *Measurement* 45 (2012) 2346–2358.
- [6] Carro de Vicente Portela, Javier. Curso de metrología dimensional. Ed. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. ISBN 84-600-1071-6. Madrid, 1978.
- [7] Qi Zhang, Jaihwa Kang, Qing Li, Sung Ki Lyu, The calculation and experiment for measurements over pins of the external helical gears with an odd number of teeth, *Int. J. Precision Eng. Manuf.* 13 (2012) 2203–2208.
- [8] Su-Ping Fang, Lei-jie Wang, Masaharu Komori, Aizoh Kubo, Design of laser interferometric system for measurement of gear tooth flank, *Optik* 122 (2011) 1301–1304.
- [9] G. Goch, Gear metrology, *Ann. CIRP* 52II (2003).
- [10] E.S. Gadelmawla, Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears, *Measurement* 44 (2011) 1669–1678.
- [11] C.H. Gao, K. Cheng, D. Webb, Investigation on sampling size optimisation in gear tooth surface measurement using a CMM, *Int J Adv Manuf Technol* 24 (2004) 599–606.
- [12] P. Maresca, E. Gómez, J. Caja, C. Barajas, M. Berzal, Use of coordinate measuring machines and digital optical machines for the geometric

- characterization of circumference arcs using the minimum zone method, *Measurement* 43 (2010) 822–836.
- [13] David Samper, Jorge Santolaria, Ana Cristina Majarena, Juan José Aguilar, Comprehensive simulation software for teaching camera calibration by a constructivist methodology, *Measurement* 43 (2010) 618–630.
- [14] Zehra Ozdilek, Edward Robeck, Operational priorities of instructional designers analyzed within the steps of the Addie instructional design model, *Procedia Soc. Behav. Sci.* 1 (2009) 2046–2050.
- [15] R.A. Reiser, J.V. Dempsey, Trends and Issues in Instructional Design and Technology, second ed., Pearson, 2007, pp. 11–12 (Chapter 2).
- [16] R.M. Gella-Marín, C. García-Hernández, J.L. Huertas-Talón, P. Kyratsis, Increasing laboratory capacity of a gear measurement practical session using freeware applications, *Int. J. Eng. Educ.* 32 (2016) 246–251.
- [17] Aenor. UNE 18066:1961. Engranajes rectos y helicoidales.
- [18] Aenor. UNE 18048:1983. Sistema ISO de precisión de ruedas dentadas y engranajes cilíndricos-rectos con dientes de perfil evolvente.
- [19] J.L. Huertas Talón, R. Gella Marín, C. García-Hernández, L. Berges-Muro, C. López-Gómez, J.J. Marín Zurdo, J.C. Cisneros Ortega, Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 69 (2013) 361–374.
- [20] Osamu Sato, Sonko Osawa, Yohan Kondo, Masaharu Komori, Toshiyuki Takatsuji, Calibration and uncertainty evaluation of single pitch deviation by multiple-measurement technique, *Precision Eng.* 34 (2010) 156–163.
- [21] Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes, *Gear geometry and applied theory*, Cambridge University Press, 2004.
- [22] José Luis Huertas Talón, Juan Carlos Cisneros Ortega, Carmelo López Gómez, Elena Ros Sancho, Elena Faci Olmos, Manufacture of a spur tooth gear in Ti-6Al-4V alloy by electrical discharge, *Comput. Aided Des.* 42 (2010) 221–230.

Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo

J. L. Huertas Talón¹, C. García-Hernández², R. M. Gella Marín³, L. Berges Muro⁴, F. Valdivia Calvo⁵, J.J. Garde Barace⁶

^{1,2,3,4} Dpto. de Ingeniería de Diseño y Fabricación. Universidad Zaragoza. jhuertas@umizar.es, cesarg@umizar.es, rgella@umizar.es

^{1,3,6} Centro Público Integrado de Formación Profesional "Corona de Aragón", fvaldiviaf@gmail.com, juanjose.garde@gmail.com

Los engranajes elípticos son utilizados en numerosas aplicaciones tecnológicas, para mejorar la versatilidad y simplicidad de diversos procesos mecánicos (caudalímetros, bicicletas, motores de combustión interna, etc.), para unificar velocidades en las líneas de ensamblaje e incluso en investigación.

Tradicionalmente se realiza la fabricación de los engranajes elípticos mediante procedimientos mecánicos de arranque de viruta: fresado diétre a diente o por generación. Esto exige controlar las variables geométricas y cinemáticas del proceso.

En este trabajo se presenta un método para fabricar engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo. Esto supone un procedimiento continuo y de no menor rendimiento que los métodos citados anteriormente. Se desarrolla el modelo matemático, se presentan simulaciones del proceso de electroerosión y finalmente se implementa este método en una máquina WEDM obteniendo dos parejas de modelos de engranajes elípticos mediante dicho proceso.

Para terminar, se realiza una reflexión, tomando como base referencias bibliográficas, sobre el acabado superficial y consecuencias del uso de la electroerosión frente a otros métodos de arranque de viruta que no llevan implícito el cambio de fase del material.

1. Introducción

La fabricación de engranajes no circulares, entre los que se incluyen los elípticos, tiene interés bajo diversos puntos de vista:

- La aplicación práctica, ya que se emplean en diversos mecanismos, como pueden ser los medidores de caudal [1] o, en la transmisión por cadena, los platos de bicicletas [2], incluso en correas dentadas de distribución de motores de explosión [3].
- En investigación, como una forma de desarrollo de diferentes tipos de engranajes que cumplan determinadas funciones de movimiento o como experimentación de métodos de tallado [4].
- Para transmitir movimiento de diferentes formas, [5] como recogen históricamente diversos museos.



Figura 1: Caudalímetro y modelos de engranajes ovales. Cortesía de SIMEF [1].

Asimismo, este campo ha merecido su atención en investigación. En [6] se realiza una revisión bibliográfica, repasa los métodos analíticos para la obtención de ecuaciones de las circunferencias primitivas y se revisan los métodos de obtención de estos engranajes y, especialmente, se realiza un análisis experimental de la relación de transmisión referente a velocidades y pares.

En el caso presentado, se van a utilizar para un ejemplo las coordenadas cartesianas y para el otro las coordenadas polares indicadas por Bloomfield [7] para la realización de sendas parejas de engranajes:

- Engranajes elípticos que giran alrededor del foco:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

Siendo a y b los semiejes mayor y menor, respectivamente, figura 2(a).

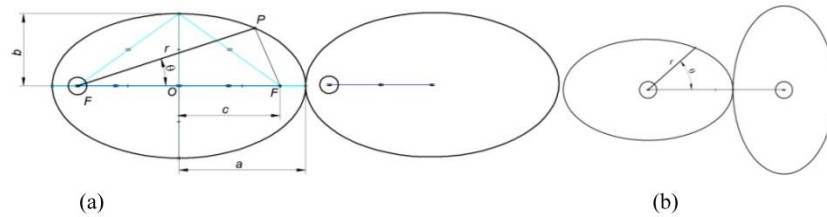


Figura 2: Posiciones extremas de engranajes elípticos (a) y ovals (b).

- Engranajes ovals girando alrededor del centro, figura 2(b):

$$r = \frac{2ab}{(a+b) - (a-b)\cos 2\theta} \quad (2)$$

2. Modelo matemático.

El procedimiento que se va a utilizar es por aproximación de los dientes como si de un engranaje circular se tratara, pero considerando la curvatura local en la elipse [8] y el óvalo. Para ello se hace preciso el cálculo del radio de curvatura de las expresiones (1) y (2), que en cartesianas y polares se expresa, respectivamente, por [9]:

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\left[r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 \right]^{3/2}}{r^2 + 2 \left(\frac{dr}{d\theta} \right)^2 - r \frac{d^2r}{d\theta^2}} \quad (4)$$

Para la ecuación (1) el radio de curvatura en cartesianas es:

$$\rho = \frac{\left[a^4 y^2 + b^4 x^2 \right]^{3/2}}{a^4 b^4} \quad (5)$$

Los valores extremos del radio de curvatura para $a=100$ y $b=60$, se pueden apreciar en la figura 3.

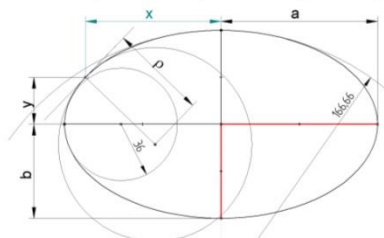


Figura 3: Radios de curvatura extremos de una elipse dada por la ecuación (1).

Para la ecuación (2) el radio de curvatura queda una expresión muy compleja, por lo que se utilizará MatLab con el código indicado en la figura 4:

```

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
1 - syms r x y a b e t
2 - r=2*a*b/(a+b)-(a-b)*cos(2*t)
3 - dr=diff(r,t)
4 - dr2=diff(dr,t)
5 - rc=((r^2+dr^2)^(3/2))/(r^2+2*dr^2-r*dr2)

```

Figura 4: Código para obtener el radio de curvatura del óvalo de ecuación (2).

Es importante hacer notar que la ecuación (2) presenta solamente dos puntos con pendiente nula (asemejándose más a una elipse) cuando $a \leq 2b$, para valores mayores del parámetro a aparecen seis puntos con pendiente nula, figura 5(a). En la figura 5(b) se representa el radio de curvatura máximo y mínimo para $a=100$ $b=60$

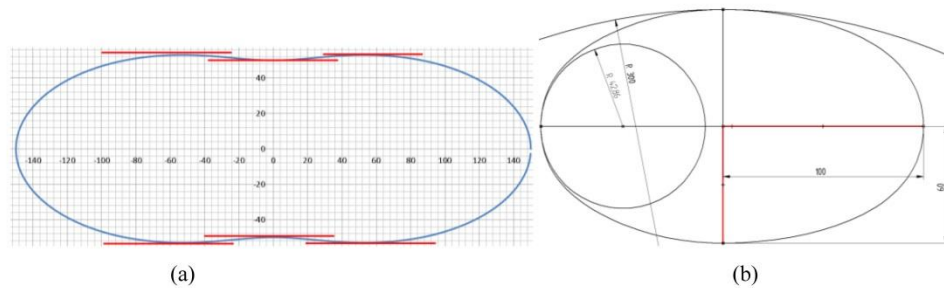


Figura 5: Óvalo con $a > 2b$ (a). Radio de curvatura para $a=100$ $b=60$ (b)

Se considera que en el punto de la intersección del eje de simetría del diente con la elipse o del óvalo, el radio constructivo de dicho diente es el radio de curvatura de la elipse correspondiente (para generar el diente, es la elipse o el óvalo base), figura 6.

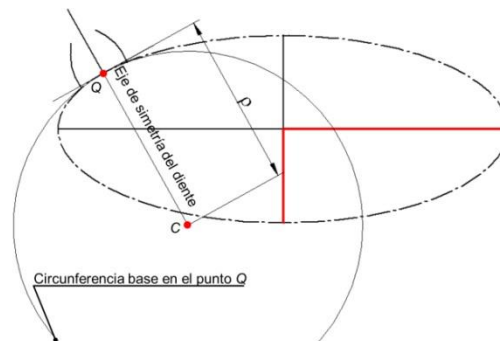


Figura 6: El diente corresponde al de una circunferencia de la misma curvatura.

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones adicionales:

- El espesor del diente medido en la elipse primitiva debe ser el mismo para todos los dientes, pues en otro caso no encajarían durante el engrane todos los huecos con los dientes. El acabado final dará un grosor de diente menor y un hueco mayor para la tolerancia de engrane, según la calidad del engranaje.
- La pareja de engranajes tiene z dientes cada uno, con un paso medido sobre la elipse o el óvalo primitivo $p = \pi \cdot m$ (m es el módulo), que es el doble del espesor del diente.
- Al ser el paso medido en la elipse primitiva $\pi \cdot m$, entonces su perímetro es $\pi \cdot m \cdot z$, siendo este último valor la longitud de la elipse primitiva.

- En este estudio se parte precisamente de la longitud de la elipse primitiva, determinando los valores a y b por otra condición adicional, como la excentricidad. De esta manera, si se desea construir un engranaje de módulo $m=2,5$, número de dientes $z=60$ y excentricidad $0,85$. La longitud de la elipse primitiva debe ser $l=p \cdot m \cdot z=p \cdot 4 \cdot 35=439,822972$. Por supuesto, y dado el método usado para su fabricación, puede emplearse cualquier módulo no convencional para de esa forma obtener valores sencillos de a y b .

La longitud de la elipse se obtiene evaluando la integral:

$$l = 4 \int_0^a \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (6)$$

La longitud del óvalo se obtiene evaluando la integral:

$$l = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 + r^2} d\theta \quad (7)$$

3. Distribución de los dientes

El cálculo de la distribución de los dientes se realiza partiendo de un programa en MATLAB y finalizando con una hoja Excel.

El programa de MATLAB determina los puntos de la elipse primitiva determina los puntos de la elipse primitiva con un error cordal menor que una cantidad establecida, figura 7.

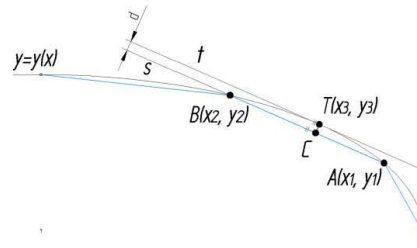


Figura 7: Los puntos de la elipse se obtienen de forma discontinua con una precisión dada.

En el entorno de un punto $A(x_1, y_1)$ se debe encontrar otro punto $B(x_2, y_2)$, también perteneciente a la función, que cumpla la condición de que la secante AB mantenga una distancia máxima d a la curva. Esta distancia se obtiene al sustituir las coordenadas $T(x_3, y_3)$ en la ecuación normal de la recta:

$$d = \frac{a \cdot x_3 + b \cdot y_3 + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (8)$$

También hay que tener en cuenta el signo de la distancia d , pues nos indica en el semiplano dónde se encuentra el punto tomado como referencia para el cálculo de dicha distancia. En este caso, se ha evaluado el cuadrado de la distancia para prescindir del signo:

$$d^2 = \frac{(a \cdot x_3 + b \cdot y_3 + c)^2}{(a^2 + b^2)} \quad (9)$$

El punto anterior, T , es el de tangencia con la gráfica de la función, de la recta paralela al segmento secante AB . Por lo tanto, la derivada primera en T es igual a la tangente del ángulo α

$$y'_{x=x_3} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (10)$$

Se tiene, de esta forma, las dos condiciones que permitirán resolver las dos incógnitas (x_2, y_2) .

No es necesario analizar el signo de la tangente, pues se conoce la forma de la trayectoria a seguir. Para resolver este sistema de dos ecuaciones por métodos numéricos MATLAB dispone de la instrucción [10]:

```
maple(fsolve({ecu1,ecu2},{var1,var2},{var1=v1inicial..v1final,var2=v2inicial..v2final}))
```

Sobre esta elipse, al conocer el espesor del diente sobre ella, se distribuyen los segmentos de arco de elipse de esta longitud y se determinan los radios de curvatura de dichos puntos, figura 8.

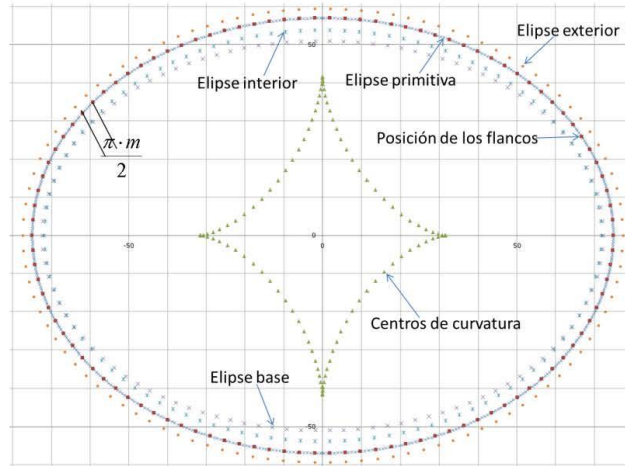


Figura 8: Puntos para posicionar los flancos y otros puntos característicos.

Debe tenerse en cuenta, que la longitud de la elipse/óvalo dada por las ecuaciones [6] y [7] conducen a integrales elípticas, por dicha razón se ha realizado lo explicado anteriormente con MATLAB, pero, una vez obtenido los puntos de la elipse primitiva, la separación en el valor de medio paso se realiza con Excel encontrando los puntos que distan entre sí dicho valor. Para ello se utiliza la expresión:

$$l = \sum \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \quad (8)$$

Cuando la longitud es mayor que el espesor sobre la elipse primitiva se interpola un punto adicional, pasando dicho punto a formar parte de la serie de puntos de aproximación lineal, figura 9. Dicho punto se convierte en el nuevo punto de lugar i .

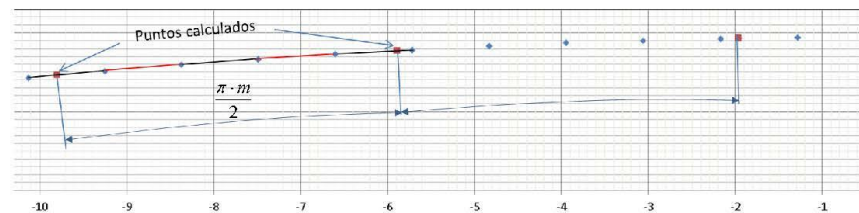


Figura 9: Puntos calculados sobre la elipse primitiva por donde pasan los flancos.

El error absoluto que se obtiene sobre un perímetro aproximado de 416.2589 es de inferior a 0.0021, para un error cordal inferior a 0.001.

Sobre estos puntos, se han llevado los arcos de evolvente correspondientes al radio de curvatura local, figura 10. Dichos arcos, que parten de la elipse/oválo base (equivalente a la circunferencia base para el radio de curvatura local), se han prolongado más allá de la elipse exterior. El diente real estará entre la elipse interior y la exterior. No obstante, hay que considerar que no todos los dientes pueden llegar al fondo con el perfil de la evolvente calculada, lo que se debe a que cuando el número de dientes local equivalente es un número pequeño (menor radio de curvatura) se produce el hecho de que el “diámetro” interior es mayor que el “diámetro” base.

Dicho perfil de evolvente, figura 10 (b), se ha realizado como se indica en la referencia [11], pero íntegramente sobre la hoja Excel. De esta forma, se podrán pasar los datos de Excel a un programa de CAD, en este ejemplo se

ha utilizado Solid Edge mediante el comando “curva por tabla”, el cual se puede automatizar con una macro en Visual Basic [12]. Con dicho comando, además se pasan a Solid Edge las elipses/ovalos interior, primitivo y exterior.

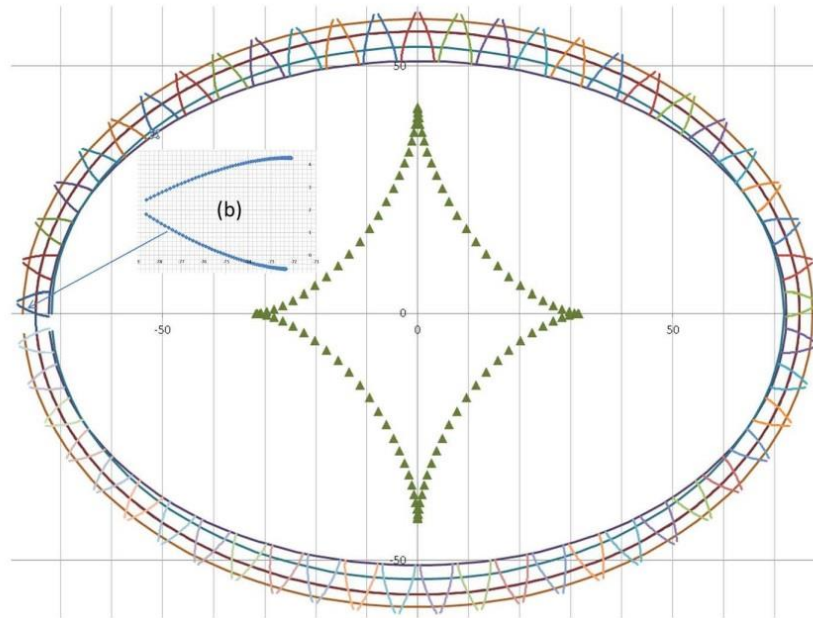


Figura 10: Puntos de las diferentes evolventes según los radios de curvatura.

Con todas estas curvas en Solid Edge es preciso realizar la extrusiones correspondientes, además de los redondeos del fondo de los dientes, figura 11 y 12.

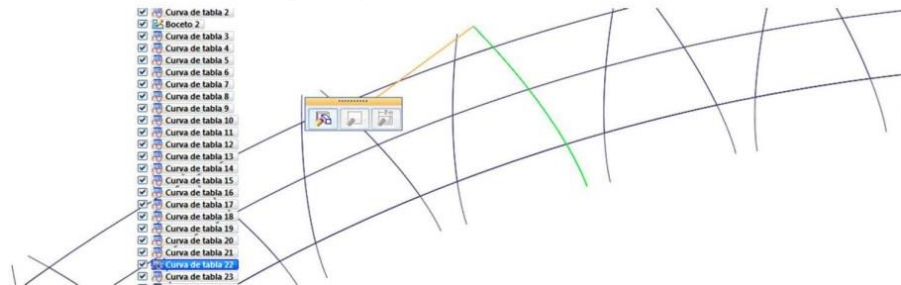


Figura 11: Los puntos calculados con Excel se importan a Solid Edge.

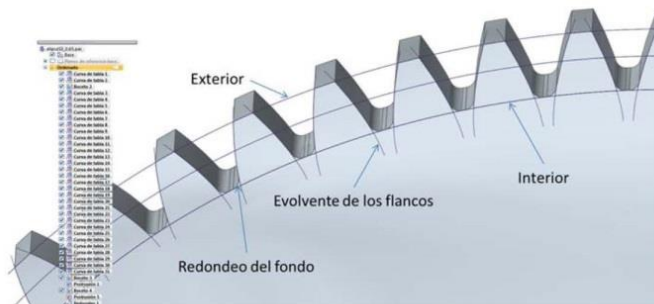


Figura 12: Se realizan las extrusiones y los redondeos.

Por supuesto, todo ello se podría haber realizado directamente con Excel o Matlab, calculando la posición de los puntos de redondeo para cada diente tal como se hizo en [11], la continuidad entre los puntos de la elipse interior, los puntos de los flancos y los puntos correspondientes de la elipse exterior (que corresponden a la cabeza del diente), dan la trayectoria del hilo de la electroerosionadora y a ellos se les aplica la corrección del radio del hilo más el GAP. Pero se ha preferido utilizar como intermediario un programa de CAD, tras lo cual se puede postprocesar como interese, en este caso con la electroerosión por hilo, con un programa de CAM. En la aplicación práctica se ha utilizado EdgeCAM [13], figura 13, y se muestra una pareja de engranajes de los realizados con una excentricidad de 0,75 y 80 dientes.

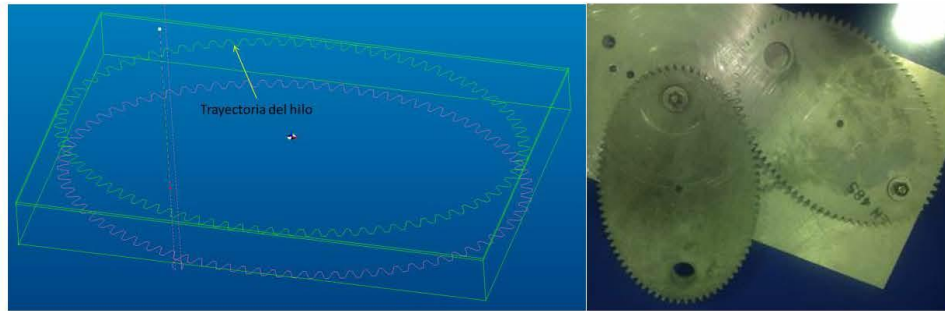


Figura 13: Uso del programa de CAM. Pareja de engranajes elípticos y piezas obtenidas.

4. Discusión.

El método presentado en este estudio prescinde de máquinas dedicadas a un proceso específico de fabricación, como son las talladoras de engranajes, para emplear en su lugar máquinas programables de tipo universal. La tecnología empleada en este trabajo conlleva el cambio de fase para producir el arranque de la viruta, lo puede traer como consecuencia algunos problemas en ciertos materiales.

Por ejemplo, [14] realiza un engranaje en miniatura en latón mediante electroerosión por hilo y analiza las ventajas de utilizar este método, que evita rectificadores posteriores, junto a los parámetros superficiales microdureza y microestructura, concluyendo que este método es ideal para obtener buenas calidades (N5).

En el caso del acero, en [15] se realiza el estudio tanto de calidad superficial como de fatiga sobre acero de alta aleación para herramienta mecanizado por electroerosión de hilo, concluyendo que es necesaria una adecuada selección de los parámetros para realizar un acabado con el hilo.

En el trabajo [16] sobre inconel se llega al mismo tipo de conclusiones. El acabado superficial es muy bueno, pero las condiciones de intensidad del pulso y tiempo de descarga deben ser cuidadosas para lograr una microestructura superficial que no perjudique a la integridad futura de la pieza.

No obstante, hay otros trabajos más antiguos [17] donde se demuestra que la electroerosión por hilo lleva aparejada un aumento de la rugosidad así como una disminución relativamente importante de la duración a fatiga frente a probetas mecanizadas por torneado.

Evidentemente, la discrepancia de resultados es posible que se deba a la diferencia de años en las máquinas utilizadas (2003 a 2014), ya que en este tiempo los fabricantes han mejorado sus equipos [18]. Lo que está de acuerdo con las conclusiones obtenidas en [19] para el caso de una aleación Ti-6Al-4V.

5. Resumen.

Aunque el campo de aplicación de los engranajes elípticos/ovales no es muy amplio, sin embargo son interesantes usos en los que se desee transmitir un par motor que no sea constante, así como ejemplo para investigación. El facilitar la fabricación de los mismos con maquinaria no dedicada, o sea, prescindiendo de los métodos de generación acerca la posibilidad de estudio, realización y uso a mayor cantidad de personas. El ejemplo aquí presentado, se ha generalizado para obtener la trayectoria de mecanizado con un CAM. El uso del CAM permite su producción por cualquier método: electroerosión por hilo, corte por agua, láser, fresado, etc. De esta manera, se ofrece un buen método para que el desarrollador controle el diseño del engranaje y utilizar métodos de fabricación que garanticen un mejor acabado del engranaje. Por último, si bien se ha utilizado el programa MATLAB para la resolución de ecuaciones, es también posible limitarse al uso de Excel implementando una macro con métodos numéricos.

Con la bibliografía analizada sobre las características superficiales obtenidas en el proceso, se puede resumir, en máquinas actuales, que con una cuidada selección de las condiciones que definen el proceso (intensidad, tiempo de pulso, etc.), se obtienen tanto unas calidades metrológicas, y físico-químicas comparables a cualquier otro proceso. Evidentemente, en esta última característica tienen una gran importancia los avances en el control de la descarga que poseen las máquinas actuales frente a las ya descatalogadas.

6. Referencias

- [1] SIMEF. Calle 148 Nro 1327, entre 59 y 60. La Plata, Buenos Aires, Argentina. Tel. (0221) 15-4352271. www.simef.com.
- [2] <http://www.osymetric.es>.
- [3] www.volkspage.net/technik/ssp/ssp/SSP_337.pdf (pag. 9)
- [4] F. L. Litvin, I. Gonzalez-Pérez, K. Yukishima, A. Fuentes, K. Hayasaka. Generation of planar and helical elliptical gears by application of rack-cutter, hob, and shaper. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 196 (2007) 4321–4336.
- [5] <http://www.aeok.org.ar/museo/elmuseo/recorrido/engranaj.htm>
- [6] H. F. Quintero-Riaza. Aporte al diseño de engranajes no circulares cilíndricos rectos, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 2006.
- [7] B. Bloomfield. Noncircular Gears. *Product Engineering Special Report*, 1960; 159-165.
- [8] F. L. Litvin, A. Fuentes-Aznar, I. Gonzalez-Pérez, and K. Hayasaka. *Noncircular Gears, Design and Generation* (secciones 3.3 y 4.3.2.2). Cambridge University Press. 2009. ISBN-13 978-0-511-60521-5.
- [9] C. Mataix. Análisis Algébrico e Infinitesimal. Dossat. 1964. D.L. M15450.
- [10] J. A. Infante-del-Río, J. M. Rey-Cabezas. Métodos numéricos. Teoría, problemas y prácticas con MATLAB. Ediciones Pirámide. 1999. ISBN 8436817249.
- [11] J. L. Huertas-Talón, J. C. Cisneros-Ortega, C. López-Gómez, E. Sancho-Ros, E. Faci-Olmos. Manufacture of a spur tooth gear in Ti-6Al-4V alloy by electrical discharge. *Computer Aided Desing*. 42 (2010), 221–230.
- [12] Siemens. Solid Edge “Programming User’s Guide Versión 1.0 y 2.0”.
- [13] EdgeCAM. www.Edgecam.com
- [14] K. Gupta, N. K. Jain. On surface integrity of miniature spur gears manufactured by wire electrical discharge machining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 72 (2014):1735–1745
- [15] F. Ghanem, N. B. Fredj, H. Sidhom, C. Braham. Effects of finishing processes on the fatigue life improvements of electro-machined surfaces of tool steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52 (2011):583–595.
- [16] L. Li, Y.B. Guo, X.T. Wei, W. Li. Surface integrity characteristics in wire-EDM of inconel 718 at different discharge energy. *Seventeenth International Symposium on Electromachining. Procedia CIRP* 6 (2013) 220 – 225.
- [17] C. Ferrer, A. Cárcel, M. Pascual-Guillamón, M. A. Pérez-Puig, F. Segovia, K. A. Razzaq. Investigación de las causas que modifican la resistencia a fatiga en flexión rotativa del proceso de mecanización de electroerosión por hilo en las aleaciones de aluminio AA-2000. *Anales de mecánica de la fractura*. 20 (2003) 201-206.
- [18] www.ona-electroerosion.com.
- [19] T. M. Mower. Degradation of titanium 6Al-4V fatigue strength due to electrical discharge machining. *International Journal of Fatigue* 64 (2014) 84-96.

8. MEMORIA

8. MEMORIA

8.1. Objetivos

Esta tesis doctoral se enmarca dentro del desarrollo de trayectorias para el mecanizado de engranajes y su verificación.

El objeto de la tesis persigue la creación y evaluación de herramientas y aplicaciones orientadas a la mejora de los procesos de mecanización y verificación de engranajes

Para conseguir estos objetivos, se puede desglosar el trabajo en las siguientes tareas que se han llevado a cabo:

- Se ha realizado una revisión del estado del arte en cada trabajo presentado para obtener una visión general del estado de la tecnología en el ámbito que se deseaba estudiar. De esta manera se han determinado qué innovaciones tecnológicas era posible desarrollar en los trabajos de investigación.
- Se han estudiado en primer lugar los métodos y herramientas que existen actualmente para digitalizar perfiles. Se ha analizado la importancia que tiene el número de puntos que componen el perfil en los tiempos de fabricación. A continuación se ha propuesto desarrollar un método que consiga identificar los puntos que más información de calidad aporten al perfil, para de esta manera eliminar los puntos menos significativos y que dicho perfil sea más ágil de procesar. Para realizar este trabajo se han generado algoritmos que identifican estos puntos más significativos. A continuación se ha desarrollado un programa informático implementando este modelo matemático. Finalmente se ha evaluado la eficacia de este algoritmo mediante experimentos en el laboratorio.
- A continuación se han estudiado los métodos CAM existentes. Se han analizado las trayectorias que sigue la máquina-herramienta para mecanizar un perfil digitalizado. Se ha evaluado la influencia de las trayectorias en el mecanizado y en los tiempos de producción. Se ha desarrollado un algoritmo basado en estudios anteriores para su implementación en un programa informático que permite reducir los tiempos de mecanizado. Posteriormente se ha evaluado la eficacia de este algoritmo mediante experimentos en el laboratorio.

- Tras el desarrollo de las herramientas en los apartados anteriores orientadas a la fabricación, se ha centrado el estudio en la generación de una herramienta informática que apoye el proceso de control de calidad. Se ha implementado una aplicación informática que, a partir de un engranaje fabricado y cuyas características geométricas son conocidas, sea capaz de verificar su calidad dimensional. Así se asegura que la calidad de la producción cumple con las especificaciones requeridas.
- Con los conocimientos adquiridos de digitalización, limpieza de puntos, trayectorias, diseño y programación de herramientas de diseño y verificación de engranajes, se han estudiado engranajes no circulares y se han desarrollado herramientas y métodos alternativos de producción para su fabricación. Se han analizado los engranajes elípticos debido a su amplio uso en gran variedad de aplicaciones. Se han desarrollado modelos matemáticos que definen el perfil de estos engranajes. A continuación se ha seleccionado un método de fabricación adecuado para utilizar con los modelos matemáticos. Finalmente se han mecanizado y verificado prototipos para evaluar la adecuación del método propuesto.

8.2. Aportaciones del doctorando

El presente trabajo de Tesis Doctoral coincide con los objetivos propuestos. Ha sido el resultado de diversas tareas que se han realizado ordenadamente a lo largo del periodo en el cual se ha llevado a cabo este trabajo. En este apartado se presenta un resumen de las aportaciones que han contribuido a desarrollar las publicaciones que forman parte del compendio presentado en esta Tesis Doctoral.

En el campo de la investigación se han desarrollado novedosas herramientas aplicables en las fases de diseño, fabricación y verificación de distintos tipos de engranajes.

Estas herramientas han sido:

- La generación e implementación de un algoritmo que selecciona los puntos que más información aportan para definir el perfil de una superficie que se va a mecanizar. De esta manera se consigue reducir el tiempo de procesado.

- El desarrollo e implementación de un algoritmo que permite optimizar las trayectorias de mecanizado de un perfil.
- La programación de una herramienta informática que verifica la calidad dimensional de los engranajes rectos fabricados.
- El desarrollo de un método de generación de trayectorias para la fabricación de engranajes elípticos, verificado mediante la fabricación de prototipos.

8.3. Metodología

Para poder elaborar las publicaciones presentadas en este trabajo de Tesis fue necesario seguir una metodología a lo largo de todos los trabajos. En este apartado se describe esta metodología.

8.3.1. Realización de revisión bibliográfica

Para cada publicación se realizó previamente una revisión bibliográfica reflejando el estado del arte actual en la tecnología que se deseaba desarrollar. Así se pudo evaluar si el trabajo de investigación aportaba una innovación diferenciadora al ámbito de la investigación. Además sirvió para estudiar las técnicas que otros investigadores aplicaban para desarrollar sus trabajos.

8.3.2. Realización de modelos matemáticos

Tras realizar la revisión bibliográfica y teniendo de esta manera una base científica de la que partir que apoyaba los trabajos que se deseaban realizar, se generaron los algoritmos matemáticos necesario que en cada trabajo definieron las operaciones que realizarían las máquinas correspondientes durante los procesos de fabricación y verificación.

En el caso de las publicaciones **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”**, **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”**, **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”**, y **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** fue necesario desarrollar modelos matemáticos para poder desarrollar cada trabajo.

En **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”** se generó un modelo matemático para poder seleccionar los puntos que aportaban más información para definir un perfil.

En **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”** se desarrolló un algoritmo para realizar trayectorias de mecanizado en espiral optimizando el tiempo de fabricación. Se partió también de una revisión bibliográfica sobre las técnicas utilizadas actualmente para la programación de trayectorias.

En el caso de **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** se programó una herramienta para verificar la calidad de los engranajes fabricados. Fue necesario generar un modelo matemático para obtener los puntos que definían el perfil de un engranaje recto a partir de sus especificaciones técnicas. El modelo desarrollado se obtuvo a partir de las ecuaciones clásicas de la evolvente que se hallaron en libros clásicos como Litvin et al., (2004) y Litvin et al., (2009).

En **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** se desarrolló un modelo matemático para poder generar los puntos que el perfil de los engranajes elípticos. Se partió del conocimiento adquirido al desarrollar la herramienta de verificación de engranajes rectos.

8.3.3. Implementación de los algoritmos

Los algoritmos desarrollados en el apartado anterior se implementaron en aplicaciones y programas informáticos que automatizaron los procesos y que se utilizaron posteriormente en las máquinas para la fabricación y verificación de prototipos.

En el caso de **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”**, para implementar el modelo matemático, se desarrolló una macro de hoja de cálculo mediante la cual partiendo de un archivo de puntos que definían un perfil, se seleccionaron los puntos que más información de calidad aportaban, borrando el resto.

En **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”**, a partir de un archivo de puntos que definían nuevamente un perfil, se desarrolló una herramienta programada en código abierto que generaba un archivo con las trayectorias de mecanizado optimizadas.

En **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** se desarrollaron tres programas.

En primer lugar se programó una herramienta informática basada en macros de hoja de cálculo para generar los puntos que componían el perfil de un engranaje recto a partir de sus especificaciones técnicas y crear un archivo con las direcciones de medición de la Máquina de Medir por Coordenadas (MMC).

En segundo lugar se programó una rutina de medición en una MMC Mitutoyo que se utilizó con el archivo creado. La MMC leyó las direcciones de medición de dicho archivo, realizó las mediciones sobre el engranaje fabricado y creó un archivo con los puntos medidos.

Finalmente, se desarrolló una herramienta informática adicional basada en macros de hoja de cálculo que comparaba los puntos originales que componían el perfil del engranaje con los puntos medidos, generando las gráficas de comparación necesarias.

En **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** se implementó el modelo matemático que generaba los puntos del perfil de engranajes elípticos mediante un programa de cálculo técnico y una macro de hoja de cálculo.

8.3.4. Realización de ensayos y fabricación

Los algoritmos que se implementaron en aplicaciones informáticas en los apartados anteriores se evaluaron en laboratorio mediante la fabricación y verificación de

prototipos. De esta manera se evaluó el correcto funcionamiento de las innovaciones propuestas en cada trabajo.

En **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”** se comprobó la reducción del tiempo de fabricación usando el algoritmo presentado mediante la fabricación de distintos perfiles. Se comparó el tiempo de mecanizado y los puntos necesarios entre los perfiles originales y dichos perfiles tras aplicar el algoritmo.

En **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”** se fabricaron perfiles utilizando el algoritmo generado para producir las trayectorias de mecanizado y se comparó el tiempo y el número de puntos necesarios con tres paquetes CAM comerciales.

En **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** se utilizaron engranajes ya fabricados cuyas especificaciones se conocían y se aplicó la herramienta de verificación para determinar la calidad de su fabricación.

En **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** se fabricaron parejas de engranajes elípticos usando los modelos matemáticos y los programas desarrollados y se verificó que engranaban correctamente, siendo adecuado el algoritmo y el método de fabricación.

8.4. Conclusiones

En **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”** se ha mostrado la importancia de un adecuado tratamiento de datos para seleccionar los puntos más significativos de un perfil que posteriormente se postprocesarán para mecanizar. Se han analizado en la bibliografía los métodos usados para digitalizar perfiles tales como el láser tracker, basados en cámaras, MMCs, etc. Se ha observado que el digitalizado exige el procesado de un alto volumen de datos que puede ralentizar el proceso de reconstrucción o mecanizado. Utilizando el algoritmo presentado es posible reducir el tiempo requerido para representar o mecanizar mediante control numérico elementos en 2D o en 3D seleccionando los puntos del perfil que más

información de calidad aportan. Puede ser además interesante incorporar este algoritmo a programas CAD comerciales. Así los puntos escaneados se pueden limitar a un número óptimo en función de la tolerancia requerida.

En **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”** se ha desarrollado un algoritmo mediante el cual es posible optimizar el proceso de mecanizado de superficies obteniéndose perfiles regulares. En la bibliografía presentada se apunta el gran interés en la industria y en la investigación por optimizar las trayectorias de las herramientas de mecanizado por los beneficios de tiempo, calidad y costes que es posible obtener. Por ello se ha partido en el análisis bibliográfico de la investigación de las técnicas usadas actualmente en la generación de trayectorias. Con estos conocimientos se ha desarrollado un método para programar trayectorias de mecanizado en espiral.

El método presentado genera trayectorias de herramientas con una longitud que hace posible mejorar el tiempo de mecanizado en comparación con paquetes de CAM comerciales. Este algoritmo puede ser aplicado también, como se ha indicado anteriormente, en la fabricación de engranajes.

En **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** se presenta una herramienta informática desarrollada mediante código abierto que apoya el proceso de control de calidad una vez finalizado el proceso de fabricación. Se han analizado en la bibliografía las herramientas existentes para el control dimensional de engranajes. Se han estudiado los métodos usados para la verificación usando una MMC. Se ha observado que los módulos comerciales están basados en palpado continuo y son de programación cerrada. Se ha desarrollado una aplicación que permite personalizar la verificación de engranajes rectos basando los cálculos en una hoja electrónica y pudiendo usar además una MMC de palpado punto a punto.

Con esta herramienta el usuario puede introducir los datos que definen un engranaje recto y generar su perfil. La aplicación genera un archivo CSV con los las direcciones del medición del perfil. Este archivo se exporta a la MMC disponible en el laboratorio. A continuación, mediante un programa diseñado específicamente para la MMC, se leen estos puntos y se mide el perfil del engranaje fabricado, generando un archivo con los puntos medidos. Por último, el usuario utiliza el archivo de puntos medidos en una

herramienta informática adicional que se ha programado para comparar los puntos generados con los puntos medidos. El usuario puede seleccionar un diente o pareja de dientes y analizar el perfil, el espesor cordal y el paso, siendo estos datos puntos de control siguiendo la norma UNE 18048:1983 usada en ruedas dentadas y engranajes cilíndrico-rectos con dientes de perfil evolvente. Así es posible verificar la calidad del engranaje fabricado.

En **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** se desarrolló un método de tallado de engranajes elípticos con maquinaria no específica, adaptando el proceso de diseño y fabricación y acercando el estudio, uso y realización de este tipo de engranajes a un mayor número de personas. Se ha realizado en la bibliografía un estudio previo de las técnicas usadas para la generación de perfiles de engranajes rectos y se han adaptado para el desarrollo de un método de trayectorias de mecanizado de engranajes elípticos. Dichos engranajes elípticos se fabricaron usando el programa CAM mediante electroerosión por hilo, pero es posible aplicar este método usando otras tecnologías de fabricación: corte por agua, láser, fresado, etc., obteniéndose de esta forma un método para que el desarrollador controle el proceso de diseño y fabricación del engranaje y obtenga el resultado deseado. Además, aunque se ha desarrollado el proceso usando un programa de cálculo técnico para la resolución de las ecuaciones, es posible utilizar una hoja de cálculo implementando una macro con métodos numéricos. De esta manera se ha desarrollado un método que permite tener un mayor control sobre el proceso de mecanizado de los engranajes elípticos

8.5. Trabajos futuros

Tras los resultados obtenidos en los trabajos presentados existen diversas líneas de investigación en las que es interesante profundizar.

En el caso del algoritmo desarrollado para seleccionar los puntos más significativos de un perfil, sería importante estudiar su implementación en paquetes CAD o de escaneado comerciales. Se podría mejorar el tiempo de importación de archivos en el caso de los paquetes de diseño 3D. En el caso de implantar este método en equipos de escaneado, se aceleraría significativamente el proceso de adquisición de puntos.

Otra tarea interesante sería la relacionada con el algoritmo generado para optimizar las trayectorias de mecanizado. Una línea futura útil sería estudiar su integración en paquetes CAM comerciales. De esta forma se conseguiría optimizar el tiempo de mecanizado de superficies.

Por otro lado, usando el conocimiento generado en el mecanizado de engranajes rectos, y elípticos, se plantea estudiar su ampliación para desarrollar trayectorias de mecanizado en otros tipos adicionales de engranajes como helicoidales o cónico-helicoidales. Se propone de esta manera estudiar cómo aplicar los conocimientos adquiridos en la optimización de procesos de fabricación de estos engranajes. Además se plantea desarrollar herramientas informáticas que encapsulen el proceso de generación de perfiles y de trayectorias optimizadas de mecanizado para obtener una herramienta que controle el proceso completo de mecanizado de engranajes.

En el caso del software desarrollado para la verificación dimensional de engranajes rectos, el siguiente paso lógico sería proponer adaptarlo a la verificación de otros tipos de engranajes. Además, debido a la posibilidad de programar rutinas de medición en la herramienta, sería posible adaptar las trayectorias de la medición de la MMC para poder medir cuadrículas a lo largo de la superficie del diente. De esta manera se podría obtener una representación más precisa al obtener más puntos de medición del flanco. Este paso sería interesante no solo en engranajes de nueva fabricación, sino también en engranajes usados. El desgaste se produce a lo largo de la superficie del diente, y midiendo puntos en cuadrículas sería posible evaluar el nivel de deterioro del engranaje.

9. APÉNDICES



9.1. Factor de impacto de las revistas y áreas correspondientes a las publicaciones que se incluyen en la Tesis

En este apartado se presentan los factores de impacto de las revistas y áreas de las publicaciones incluidas en esta Tesis.

Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points			
Revista JCR	Factor de Impacto	Área	Tercil
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	1.458	Engineering, Manufacturing	1º

Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool			
Revista JCR	Factor de Impacto	Área	Tercil
Computer-Aided Design	1.801	Computer Science, Software Engineering	1º

Increasing capacity of a gear measurement practical sesión using freeware applications			
Revista JCR	Factor de Impacto	Área	Tercil
Measurement	1.484	Instruments & Instrumentation	1º

Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo	
Nombre del Congreso	Ambito del Congreso
XX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica	Ingeniería Mecánica

9.2. Justificación de la contribución del doctorando si se trata de un trabajo en coautoría

Las contribuciones del doctorando en la publicación **“Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points”** han sido:

- Estudio del estado del arte en el ámbito del trabajo del artículo.
- Trabajo en el desarrollo del algoritmo matemático.
- Implementación del algoritmo en un programa de software abierto.

Las contribuciones del doctorando en la publicación **“Obtaining a spiral path for machining STL surfaces using non-deterministic techniques and spherical tool”** han sido:

- Contribución en el trabajo del desarrollo del algoritmo matemático
- Contribución en la implementación del algoritmo.

Las contribuciones del doctorando en las publicaciones **“Algorithm for measuring gears implemented with general-purpose spreadsheet software”** han sido:

- Estudio del estado del arte en el ámbito del trabajo de las publicaciones.
- Contribución al desarrollo y programación de la herramienta de verificación.
- Ensayos en laboratorio para evaluar la herramienta.

Las contribuciones del doctorando en la publicación **“Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo”** han sido:

- Estudio del estado del arte en el ámbito del trabajo de la publicación.
- Trabajo en el desarrollo del modelo matemático que genera el perfil de los engranajes.
- Implementación del modelo matemático en un programa de software abierto.
- Postprocesado del perfil del engranaje.
- Seguimiento y apoyo en la fabricación.

10. BIBLIOGRAFÍA

Aenor. UNE 18048:1983, Sistema ISO de precisión de ruedas dentadas y engranajes cilíndrico rectos con dientes de perfil evolvente.

Alvarez, A., Calleja, A., Rodriguez, A. Urbikain, G., Fernandez, A. (2015), El fresado, operación clave en nuestras empresas, IMHE, 26-32.

Axinte, D. A., Stepanian, J. P., Kong, M. C., & McGourlay, J. (2009). Abrasive waterjet turning—an efficient method to profile and dress grinding wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3), 351-356.

Azaouzi, M., & Lebaal, N. (2012). Tool path optimization for single point incremental sheet forming using response surface method. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 24, 49-58.

Barbero, B. R., & Ureta, E. S. (2011). Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Computer-Aided Design*, 43(2), 188-206.

Barrios, A., Panche, S., Duque, M., Grisales, V., Prieto, F., Villa, J. L., Chevrel, P., & Canu, M. (2013). A multi-user remote academic laboratory system. *Computers & Education*, 62, 111-112.

Bloomfield B. (1960). Noncircular Gears. *Product Engineering Special Report*, 159-165.

Boukebbab, S., Bouchenitfa, H., Boughouas, H., & Linares, J. M. (2007). Applied iterative closest point algorithm to automated inspection of gear box tooth. *Computers & Industrial Engineering*, 52(1), 162-173.

Bouquet, J., Hensgen, L., Klink, A., Jacobs, T., Klocke, F., & Lauwers, B. (2014). Fast production of gear prototypes—a comparison of technologies. *Procedia CIRP*, 14, 77-82.

Budak, I., Sokovic, M., & Barisic, B. (2011). Accuracy improvement of point data reduction with sampling-based methods by Fuzzy logic-based decision-making. *Measurement*, 44(6), 1188-1200.

Carro de Vicente Portela, J. (1978). *Curso de metrología dimensional*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. ISBN 978-84-600-1071-5.

Chen, C. F., & Tsay, C. B. (2005). Tooth profile design for the manufacture of helical gear sets with small numbers of teeth. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(12), 1531-1541.

Chen, T., & Shi, Z. (2008). A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. *Journal of materials processing technology*, 208(1), 259-263.

Chen, T., & Ye, P. (2002). A tool path generation strategy for sculptured surfaces machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 127(3), 369-373.

Chen, Z. C., & Fu, Q. (2007). A practical approach to generating steepest ascent tool-paths for three-axis finish milling of compound NURBS surfaces. *Computer-Aided Design*, 39(11), 964-974.

Cho, M. W., & Seo, T. I. (2002). Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on CAD/CAM/CAI integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(8), 607-617.

Choi, Y. K., & Banerjee, A. (2007). Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces. *International Journal of machine Tools and manufacture*, 47(3), 689-696.

Corley, H. W., Rosenberger, J., Yeh, W. C., & Sung, T. K. (2006). The cosine simplex algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(9-10), 1047-1050.

del Río, J. A. I., & Cabezas, J. M. R. (2007). *Métodos numéricos: teoría, problemas y prácticas con MATLAB*. ISBN: 978-84-368-2090-4 84-368-2090-8.

EdgeCAM. www.Edgecam.com

Efstathiou, K., Basiakoulis, A., Efstathiou, M., Anastasiou, M., & Seiradakis, J. H. (2012). Determination of the gears geometrical parameters necessary for the construction of an operational model of the Antikythera Mechanism. *Mechanism and Machine Theory*, 52, 219-231.

Fang, S. P., Wang, L. J., Komori, M., & Kubo, A. (2011). Design of laser interferometric system for measurement of gear tooth flank. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 122(14), 1301-1304.

Goch, G. (2003). Gear metrology. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 52(2), 659-695.

Goch, G., Knapp, W., & Härtig, F. (2012). Precision engineering for wind energy systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 61(2), 611-634.

Gómez, E., Maresca, P., Caja, J., Barajas, C., & Berzal. M. (2011). Developing a new interactive simulation environment with Macromedia Director for teaching applied dimensional metrology. *Measurement*, 44, 1730–1746.

Gupta, K., & Jain, N. K. (2013). On micro-geometry of miniature gears manufactured by wire electrical discharge machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(10), 1153-1159.

- Gupta, K., & Jain, N. K. (2014). Comparative Study of Wire-EDM and Hobbing for Manufacturing High-Quality Miniature Gears. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(11-12), 1470-1476.
- Held, M., & Spielberger, C. (2009). A smooth spiral tool path for high speed machining of 2D pockets. *Computer-Aided Design*, 41(7), 539-550.
- Hsieh, H. T., & Chu, C. H. (2013). Improving optimization of tool path planning in 5-axis flank milling using advanced PSO algorithms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(3), 3-11.
- Hsieh, J. F. (2006). Mathematical model and sensitivity analysis for helical groove machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(10), 1087-1096.
- Hu, E., & Zhu, Y. (2013). 3D online measurement of spare parts with variable speed by using line-scan non-contact method. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 124(13), 1472-1476.
- Işik, A. H., & Güler, İ. (2012). Comprehensive comparison of traditional and distance learning master programs. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 31, 120-123.
- Ivanov, V., & Nankov, G. (1998). Profiling of rotation tools for forming of helical surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(9), 1125-1148.
- Jones, F. D., & Ryffel, H. H. (1961). *Gear design simplified*. Industrial Press Inc. ISBN: 0831111593, 9780831111595.
- Kang, J. G., & Han, S. (2010). Measurement and evaluation of form deviation error of disk cam with an exclusively built profile-measuring machine. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(6), 686-693.
- Kang, S. K., Ehmman, K. F., & Lin, C. (1996). A CAD approach to helical groove machining—I. mathematical model and model solution. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(1), 141-153.
- Kayal, P. (2008). Offset error analysis of ball-end mill for cutter-path generation from point-based surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(11-12), 1133-1144.
- Kolar, R. L., Sabatini, D. A., & Fink L. D. (2002). Laptops in the Classroom: Do They Make a Difference?. *Journal of Engineering Education*, 91, 397- 401.
- Lee, R. S., & Lee, J. N. (2001). A new tool-path generation method using a cylindrical end mill for 5-axis machining of a spatial cam with a conical meshing element. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(9), 615-623.

- Lee, R. T., & Cheng, W. S. (2002). A multizone scaling method for CAD in shoe sole design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(5), 313-317.
- Litvin, F. L., & Fuentes, A. (2004). *Gear geometry and applied theory*. Cambridge University Press. ISBN: 9780521815178
- Litvin, F. L., Fan, Q., Vecchiato, D., Demenego, A., Handschuh, R. F., & Sep, T. M. (2001). Computerized generation and simulation of meshing of modified spur and helical gears manufactured by shaving. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190(39), 5037-5055.
- Litvin, F. L., Fuentes-Aznar, A., Gonzales-Perez, I., & Hayasaka, K. (2009). *Noncircular Gears: Introduction to theory of gearing, design, and generation of noncircular gears*; Cambridge University Press. ISBN: 9781107683525
- Lu, B., Chen, J., Ou, H., & Cao, J. (2013). Feature-based tool path generation approach for incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1221-1233.
- Ma, X., & Cripps, R. J. (2011). Shape preserving data reduction for 3D surface points. *Computer-Aided Design*, 43(8), 902-909.
- Mataix, C. (1967). *Análisis algébrico e infinitesimal*. Editorial Dossat.
- McMaster, R. B. (1989). The integration of simplification and smoothing algorithms in line generalization. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 26(1), 101-121.
- Özel, C. (2012). A study on cutting errors in the tooth profiles of the spur gears manufactured in CNC milling machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1-4), 243-251.
- Ozel, C., Inan, A., & Özler, L. (2005). An investigation on manufacturing of the straight bevel gear using end mill by CNC milling machine. *Journal of manufacturing science and engineering*, 127(3), 503-511.
- Quinsat, Y., & Sabourin, L. (2006). Optimal selection of machining direction for three-axis milling of sculptured parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(11-12), 1132-1139.
- Quinsat, Y., Sabourin, L., & Lartigue, C. (2008). Surface topography in ball end milling process: description of a 3D surface roughness parameter. *Journal of materials processing technology*, 195(1), 135-143.
- Shiou, F. J., & Pfeifer, T. (2002). Strategies and processes to measure the dimensional geometry of sheet metal parts for exact laser cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(2), 106-116.

So, B. S., Jung, Y. H., Kurfess, T. R., & Hwang, S. M. (2007). 5-Axis machining speed enhancement by step length optimization. *Journal of materials processing technology*, 187, 2-5.

Solid Edge ST2, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. <http://www.plm.automation.siemens.com>. Access 9 Apr 2013.

Szilvsi-Nagy, M., & Matyasi, G. Y. (2003). Analysis of STL files. *Mathematical and Computer Modelling*, 38(7), 945-960.

Talón, J. H., Leza, F. T., Gómez, F. F., & Ruiz, V. H. (2006). Obtaining a program for machining an aerodynamic profile using Matlab. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31(5-6), 556-566.

Talón, J. H., Marín, R. G., García-Hernández, C., Berges-Muro, L., López-Gómez, C., Zurdo, J. M., & Ortega, J. C. (2013). Generation of mechanizing trajectories with a minimum number of points. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(1-4), 361-374.

Talón, J. L. H., Calvo, F. V., Aso, M. G., & Soro, M. V. (2009). Fabricación paramétrica de un engranaje de diente recto o helicoidal. *IMHE: Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios*, ISSN 0210-1777, (363), 50-53.

Talón, J. L. H., Faci, E., Ros, E. (2006), C O2, la mejor opción. *IMHE: Información de máquinas-herramienta, equipos y accesorios*, 330, 59-78.

Talón, J. L. H., Gómez, C. (2007) Simple algorithm to select significant points after a scan of a profile or a surface. *Interempresas*. June 22.

Talón, J. L. H., Ortega, J. C. C., Gómez, C. L., Sancho, E. R., & Olmos, E. F. (2010). Manufacture of a spur tooth gear in Ti-6Al-4V alloy by electrical discharge. *Computer-Aided Design*, 42(3), 221-230.

Tsai, Y. C., & Jehng, W. K. (1999). Rapid prototyping and manufacturing technology applied to the forming of spherical gear sets with skew axes. *Journal of Materials Processing Technology*, 95(1), 169-179.

Vijayaraghavan, A., Hoover, A. M., Hartnett, J., & Dornfeld, D. A. (2009). Improving endmilling surface finish by workpiece rotation and adaptive toolpath spacing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(1), 89-98.

Villava, I. Z. (2010). *Síntesis de Mecanismos y Máquinas*. Universidad de Navarra. ISBN: 000000015.

Zhang, H., Hua, L., & Han, X. (2010). Computerized design and simulation of meshing of modified double circular-arc helical gears by tooth end relief with helix. *Mechanism and Machine Theory*, 45(1), 46-64.

Zhang, K., Yuan, C. M., Gao, X. S., & Li, H. (2012). A greedy algorithm for feedrate planning of CNC machines along curved tool paths with confined jerk. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(4), 472-483.

Zhao, C., Zehnder, R., & Burge, J. H. (2005). Measuring the radius of curvature of a spherical mirror with an interferometer and a laser tracker. *Optical Engineering*, 44(9), 090506-090506.

11. RENUNCIA DE LOS COAUTORES NO DOCTORES

11. RENUNCIA DE LOS COAUTORES NO DOCTORES

En este apartado se presentan las renunciaciones de los coautores no doctores a presentar los trabajos en los que participan como parte de otra Tesis Doctoral en esta modalidad.




Escuela de Doctorado
Universidad Zaragoza

**RENUNCIA DE LOS COAUTORES DE LOS TRABAJOS PRESENTADOS
COMO PARTE DE UNA TESIS DOCTORAL EN LA MODALIDAD DE
COMPENDIO DE PUBLICACIONES**

1.- Datos personales del coautor		
Apellidos: Valdivia Calvo	Nombre: Francisco	
DNI/Pasaporte/NIE: 26449640-P	Teléfono 648803832	Correo electrónico fvaldivia@gmail.com

2.- Tesis Doctoral
Título: Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes
Autor: Rafael María Gella Marín
Programa de doctorado: Ingeniería de Diseño y Fabricación

3.- Publicaciones que formarán parte de la tesis y de las que el firmante es coautor
Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo

RENUNCIA:
Renuncio a que las publicaciones anteriores puedan ser presentadas como parte de otra tesis doctoral en la modalidad de compendio de publicaciones.
<lugar>, <fecha> Zaragoza 8 de Marzo de 2016
 Firma: Francisco Valdivia Calvo

11. Renuncia de los coautores no doctores



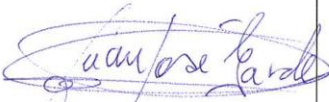
Escuela de Doctorado
Universidad Zaragoza

RENUNCIA DE LOS COAUTORES DE LOS TRABAJOS PRESENTADOS COMO PARTE DE UNA TESIS DOCTORAL EN LA MODALIDAD DE COMPENDIO DE PUBLICACIONES

1.- Datos personales del coautor		
Apellidos: Garde Barace	Nombre: Juan José	
DNI/Pasaporte/NIE: 73067730-L	Teléfono 617046422	Correo electrónico juanjose.garde@gmail.com

2.- Tesis Doctoral
Título: Desarrollo de trayectorias para mecanizado y verificación de engranajes
Autor: Rafael María Gella Marín
Programa de doctorado: Ingeniería de Diseño y Fabricación

3.- Publicaciones que formarán parte de la tesis y de las que el firmante es coautor
Fabricación de engranajes elípticos mediante electroerosión por hilo

RENUNCIA:
Renuncio a que las publicaciones anteriores puedan ser presentadas como parte de otra tesis doctoral en la modalidad de compendio de publicaciones.
<lugar>, <fecha> Zaragoza 8 de Marzo de 2016
 Firma: Juan José Garde Barace