

Procedimiento para la determinación de la calidad geométrica del perfil del diente en engranajes cilíndricos de dientes rectos



Revista EIA
ISSN 1794-1237
e-ISSN 2463-0950
Año XIX/ Volumen 20/ Edición N.40
Julio - diciembre de 2023
Reia4012 pp. 1-19

Publicación científica semestral
Universidad EIA, Envigado, Colombia

PARA CITAR ESTE ARTÍCULO / TO REFERENCE THIS ARTICLE /

Zamora-Hernández, Y. K.; Santana-Reyes, S. A.; Morales-Tamayo, Y.; Cárdenas-Yanez, R. A.; Jacome-Alarcon, L. F.
Procedimiento para la determinación de la calidad geométrica del perfil del diente en engranajes cilíndricos de dientes rectos
Revista EIA, 20(40), Reia4012.
pp. 1-19.
<https://doi.org/10.24050/reia.v20i40.1686>

✉ Autor de correspondencia:

Santana-Reyes, S. A.
(Santiago Amaury).
Departamento de Ingeniería Mecánica,
Universidad de Granma. Cuba
Correo electrónico:
ssantanareyes89@gmail.com

Recibido: 28-02-2023
Aceptado: 15-05-2023
Disponible online: 01-06-2023

YUSIMIT KARINA ZAMORA-HERNÁNDEZ¹
✉ SANTIAGO AMAURY SANTANA-REYES²
YOANDRYS MORALES-TAMAYO³
RODRIGO ANDRÉS CÁRDENAS-YANEZ⁴
LUIS FERNANDO JACOME-ALARCON⁵

1. Universidad Técnica Estatal de Quevedo - Ecuador
2. Universidad de Granma - Cuba.
3. Universidad Técnica de Cotopaxi - Ecuador
4. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE - Ecuador
5. Universidad Técnica Estatal de Quevedo - Ecuador.

Resumen

El objetivo de la investigación es establecer un procedimiento que integre el control estadístico del proceso con las herramientas de diseño e ingeniería asistidos por computadora, para determinar la calidad geométrica del perfil del diente en engranajes cilíndricos de dientes rectos (ECCR), obtenidos a partir del proceso de maquinado por arranque de virutas. Para lo cual, se realizó una simulación, por el Método de los Elementos Finitos (MEF), a los ECCR con modificación y sin modificación geométrica del perfil con el fin de evaluar su resistencia a la flexión. Se evidenció que, el proceso de maquinado está bajo un adecuado control estadístico, no existen desviaciones en los valores del coeficiente del perfil del diente. Se comprobó la disminución del estado tensional en la base del diente con geometría modificada. Se concluyó que el procedimiento propuesto permitió evaluar la concepción inicial del diseño hasta el control dimensional para valorar la calidad del proceso de fabricación.

Palabras clave: Engranajes, Control estadístico del proceso, Diseño asistido por computadora, Ingeniería asistida por computadora, Maquinado por arranque de virutas.

Procedure for determination of geometric quality of tooth profile in spur tooth cylindrical gears

Abstract

The research objective is to establish a procedure that integrates the process statistical control with computer-aided design and engineering tools, to determine the geometric quality of tooth profile in spur tooth cylindrical gears (STCG), obtained from the machining process by chip removal. Therefore, a simulation was carried out, by the Finite Element Method, to the STCG with modification and without geometric modification of profile to evaluate its resistance to bending. It was evident that, the machining process is under adequate statistical control, there are no deviations in tooth profile coefficient values. The decrease in the stress state at the tooth base with modified geometry was verified. It was concluded that the proposed procedure allowed evaluating the initial conception of the design up to the dimensional control to quality assess of manufacturing process.

Keywords: Gears, Process statistical control, Computer aid design, Computer aid engineering, Machining by chip removal.

1. Introducción

La calidad del producto siempre ha sido uno de los aspectos más importantes de las operaciones de manufactura. En vista de un mercado competitivo global, en la actualidad, la mejora continua de la calidad es una prioridad, sobre todo para las grandes corporaciones en los países industrializados (Kalpakjian y Schmid, 2008). Tradicionalmente, el control de calidad (QC, del inglés *quality control*) se relaciona con la detección de la calidad deficiente en los productos manufacturados y con tomar las acciones correctivas para eliminarlas (Groover, 2010).

Aunque todos los métodos de control de calidad tienen sus límites de aplicabilidad en la producción de artículos, la implantación de la administración de la calidad total, las normas ISO y QSO 9000, así como la norma ISO 14000, se encuentran entre los desarrollos más significativos del control de la calidad en la manufactura (Kalpakjian y Schmid, 2008). El Control Estadístico del Proceso (CEP) data de los años 1920, donde los departamentos de control de la calidad examinaban las dimensiones de los artículos (Schey, 2002). Este método aconseja al operario tomar ciertas medidas y acciones, consta de diversos elementos: tablas, límites de control, capacidades del proceso particular de manufactura y características

de la maquinaria involucrada. La principal meta del CEP consiste en mejorar el proceso de manufactura con la ayuda de tablas de control, a fin de eliminar las causas asignables a la salida de control de los parámetros del proceso (Kalpakjian y Schmid, 2008).

Los métodos de CEP son ampliamente utilizados en el monitoreo y en la mejora de los procesos de manufactura (Woodall, 2000), pues, mediante estos métodos, es posible la determinación detallada de la incidencia de los parámetros del proceso analizado. En ese sentido, Moreno-Pino, et al. (2021), muestran la aplicación de una metodología para la realización del CEP con el fin de determinar la calidad a los procesos de tratamiento térmico y forja en una fábrica productora de implementos agrícolas. Igualmente, Hayajneh, Tahat y Bluhm, (2017), desarrollan un estudio que tiene como propósito mejorar el entendimiento de los parámetros de corte del proceso de fresado y su influencia en la rugosidad superficial de la pieza, asimismo, los autores realizan un análisis de la efectividad de los modelos de regresión que se construyen para correlacionar dichos parámetros.

De igual manera, Chaviano-Tovar, et al. (2021), emplean el CEP como metodología de análisis para determinar la calidad dimensional del cuerpo de un candado. Entre las variables analizadas se encuentran: los radios del perfil, la simetría respecto a ambos ejes y el espesor del perfil. Los autores realizaron las mediciones haciendo uso de un perfilómetro DC-3000 DRO. En la investigación queda demostrada la efectividad del CEP como apoyo a la toma de decisiones respecto a un perfil que sirve de pieza en bruto en la fabricación de candados.

Los engranajes son indispensables en la transmisión de la potencia mecánica en maquinarias, automóviles y motores aeroespaciales, son los elementos de uso más común en la transmisión de potencia (Kailuke y Yenarkar, 2013), y de acuerdo a Mott, et al. (2018), son ruedas cilíndricas dentadas que se utilizan para transmitir movimiento y potencia de un eje giratorio a otro. La mayoría de las transmisiones por engranajes provocan un cambio en la velocidad del engranaje de salida en relación con el engranaje de entrada.

Los engranajes cilíndricos de dientes rectos (ECDR) es la configuración geométrica más extendida de esta categoría de piezas. Una de las dimensiones más críticas de la geometría del engranaje es el perfil del diente, dicha curva que forma el lado del diente está delimitada por el diámetro mayor y menor del engranaje (Mott et al., 2018).

El diseño de elementos de máquina es una actividad que se encuentra en constante evolución, en el caso de los ECDR dicha actividad se ha acrecentado a partir del uso de las herramientas de Diseño Asistido por Computadoras (CAD, del inglés *Computer Aid Design*)/Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, del inglés *Computer Aid Engineering*)/Manufactura Asistida por Computadoras (CAM, del inglés *Computer Aid Manufacturing*). Particularmente, el análisis del diseño de los ECDR con el empleo del Método de los Elementos Finitos (MEF) constituye una tarea altamente exigente debido a lo demandante que resulta ser el diseño y la fabricación de los perfiles geométricos de estas piezas con características resistivas elevadas, menores niveles de contaminación acústica y eficiente transmisión de potencia.

En tal sentido, Cotaquispe (2007), señala que existe un marcado rechazo, por parte de los fabricantes, a la introducción de perfiles geométricos que ofrezcan mayor resistencia tensional a partir de la variación del ángulo de presión de la fuerza normal al diente del ECDR. Por tanto, en su investigación el autor desarrolla un programa de cálculo con los parámetros que definen exactamente la geometría de los engranajes, dentro del software COSMOS\M, garantizando con ello la obtención de una forma precisa del funcionamiento de la transmisión. A partir del análisis por el MEF demuestra que existe un mejor comportamiento resistivo, ante los esfuerzos de flexión, en ECDR con un ángulo de presión de 22,5°.

La posibilidad de la variación de la geometría en el perfil del diente en los ECDR, con el propósito de mejorar la resistencia ante los esfuerzos de flexión, constituye el principal cometido de la investigación realizada por Tacle-Humanante, et al. (2019), estos autores establecen el concepto novedoso denominado índice de robustez para evaluar la resistencia a la fractura de los ECDR, y analizan cómo influyen las correcciones y la asimetría del diente en este índice. La metodología de análisis empleada es el MEF, a partir de la cual, se calcularon las tensiones normales debido a la flexión en los dientes sin modificaciones y en los dientes modificados.

De igual manera, Van-Thoan, et al. (2015), presentan una metodología que permite el diseño de ECDR con la presencia de agujeros de alivio de tensiones en la base del diente. En esta investigación el MEF constituye el método de cálculo que permite determinar el comportamiento tensional, evaluado en cada configuración geométrica analizada.

Las modificaciones geométricas, de los ECDR, propuestas en las investigaciones antes mencionadas, aun no cuentan con el desarrollo real de la pieza diseñada, pues establecer los parámetros

constructivos que respondan a la adecuada modificación de la geometría del ECDR es una actividad exigente. La evaluación de la calidad de la fabricación, mediante el proceso de maquinado por arranque de virutas, de los ECDR está sujeta a la precisión de la máquina-herramienta pero, principalmente, a la finalidad funcional que se persigue con la modificación.

Los Proyectores de Perfiles Ópticos (PPO) son instrumentos que permiten la medición de piezas a partir de la amplificación óptica de su contorno. De acuerdo con Contreras y Meneses (2015), el uso más básico de un proyector de perfiles es identificar un punto o borde en la sombra de la proyección del objeto de estudio y desde ese punto o borde calcular una longitud. Los PPO tienen un determinante uso en el control de la calidad dimensional en los procesos de manufactura de piezas, en tal sentido Silva y Alvares (2020), emplean un PPO en el análisis del desgaste en una herramienta de conformación de metales, estos autores ponderan la exactitud de las mediciones realizadas mediante este dispositivo.

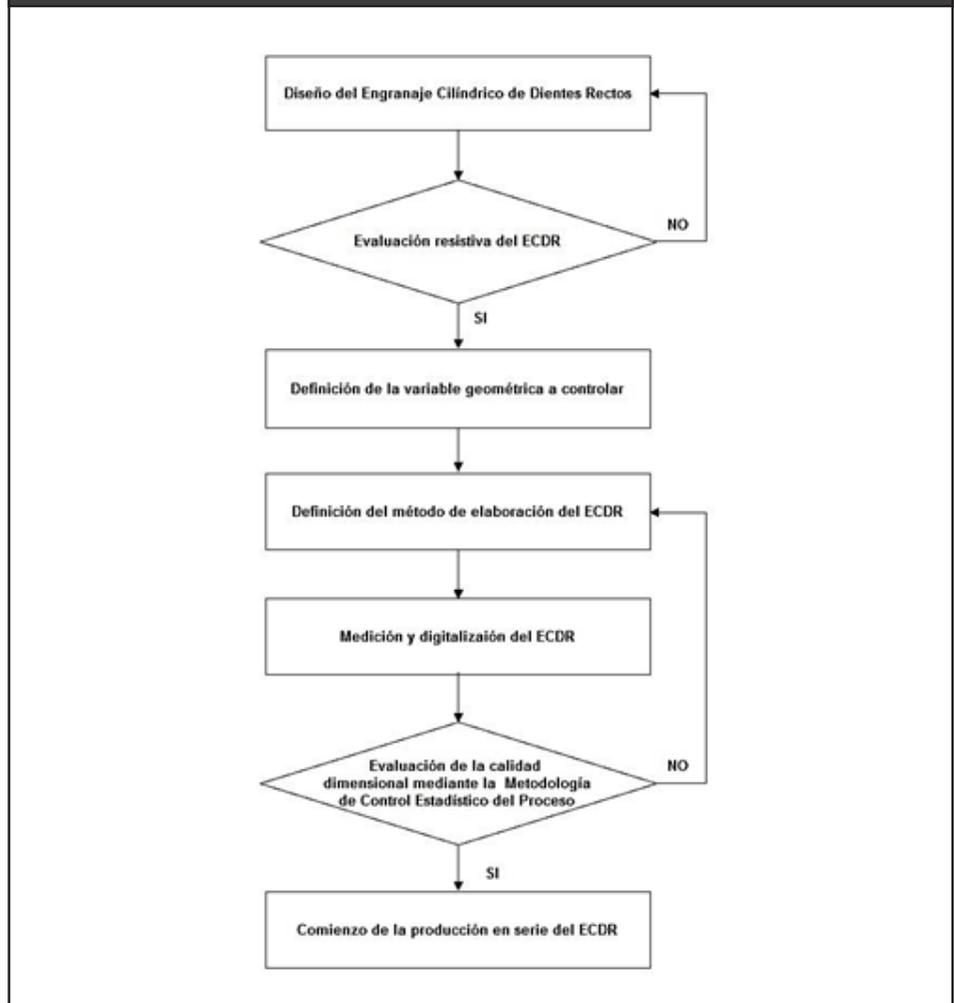
En esta investigación se plantea la necesidad de lograr mayores valores de resistencia, ante los esfuerzos a flexión, de los ECDR para lo cual se realizan modificaciones al perfil del diente del engranaje. En tal sentido, además de comprobar la disminución de los valores tensionales en la base del diente del ECDR con la geometría del perfil del diente modificada, es necesario controlar la calidad del proceso de maquinado que posibilita la obtención de la pieza con geometría modificada. Por tanto, el objetivo de la presente investigación es establecer un procedimiento que, mediante la integración del CEP con herramientas de CAD/CAE, permita la determinación de la calidad geométrica del perfil del diente en ECDR, que se obtienen mediante el proceso de maquinado por arranque de virutas.

2. Materiales y métodos

2.1. *Procedimiento seguido para la evaluación de la calidad geométrica del perfil del diente en ECDR*

El procedimiento, que se muestra en la Figura 1, está dirigido a determinar la calidad geométrica del perfil del diente en ECDR mediante la integración del CEP con herramientas de CAD/CAE. La primera etapa contiene el diseño de la transmisión de potencia hasta particularizar en la geometría del ECDR.

Figura 1. Procedimiento propuesto para la evaluación de la calidad geométrica del perfil del diente en ECDR mediante la integración del CEP con herramientas de CAD/CAE.



Posteriormente, la propuesta geométrica del engranaje se somete a una evaluación para determinar el comportamiento resistivo del mismo. De ser positiva la evaluación, la próxima etapa consiste en realizar la definición de la variable geométrica a controlar durante la fabricación del engranaje. Es altamente aconsejable centrar todos los esfuerzos en la evaluación de la configuración geométrica del perfil del diente.

El método de elaboración es la actividad que define significativamente la condición de la calidad en el orden geométrico, en este caso el maquinado por arranque de virutas es el utilizado, debido a la alta precisión dimensional que presenta y a la adecuada calidad superficial que se logra en la pieza. Posteriormente, se emplea la metodología de CEP para determinar la magnitud de la desviación de los valores de la variable geométrica de interés. En esta etapa se

utiliza un PPO con el fin de realizar la lectura, mediante amplificación óptica, de las dimensiones geométricas del perfil del diente del ECDR.

Además, con la ayuda del PPO, es posible crear modelos CAD particularizados de los engranajes, lo cual posibilita la generación de una base de datos virtual con la información geométrica de la pieza.

Finalmente, de presentarse las condiciones geométricas adecuadas en el perfil del diente de los ECDR, se procede a la producción en serie de la pieza.

2.2. Caracterización geométrica y funcional del ECDR

El engranaje, analizado en esta investigación, forma parte del sistema de transmisión de potencia de un laminador, empleado fundamentalmente en el tratamiento por deformación en frío de láminas de latón. Este elemento mecánico es sometido a un intenso régimen de explotación, pues además de transmitir la potencia desde el rodillo inferior hasta el rodillo superior, los engranajes se encargan de mantener el adecuado espacio de laminación, lo que frecuentemente conlleva a la realización del trabajo fuera de los parámetros dimensionales adecuados.

Las principales características geométricas son: el diámetro interior es de 40 mm, el flanco del diente es de 25 mm, el módulo es de 6 y el ángulo de presión es de 20°. Otras dimensiones se describen a partir de las Ecuaciones 1 y 2.

$$D_p = N \cdot m = 11 \cdot 6 = 66 \text{ mm} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

D_p = Diámetro primitivo (mm).

N = Número de dientes.

m = Módulo.

$$D_e = m \cdot (N + 2) = 6 \cdot (11 + 2) = 78 \text{ mm} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo:

D_e = Diámetro exterior (mm).

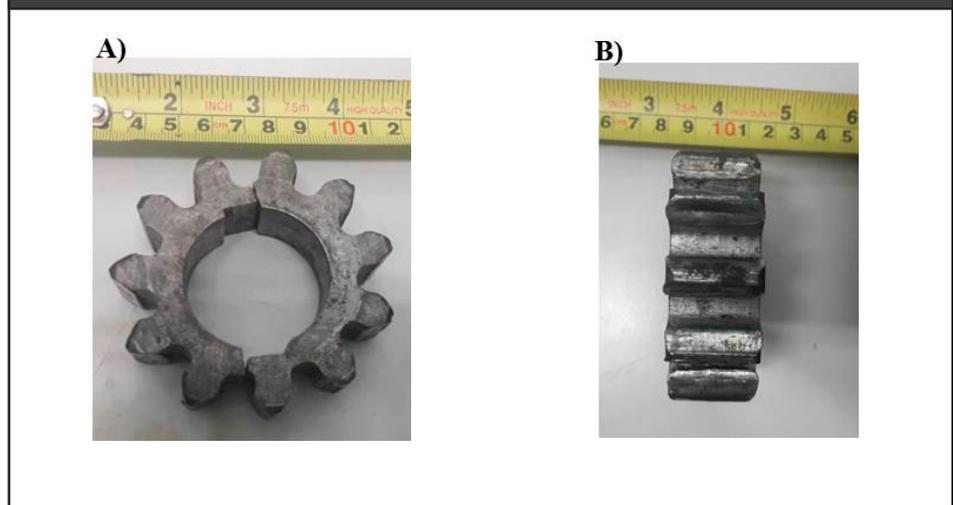
Los valores presentados en la Tabla 1 caracterizan el régimen de funcionamiento de la transmisión de potencia.

Tabla 1. Valores de entrada de la transmisión de potencia.

Características de la transmisión	Valores	Unidades de medida
Potencia transmitida	5	kW
Velocidad de rotación	100	min ⁻¹
Velocidad tangencial	0,3456	m/s
Fuerza tangencial	14 470	N
Fuerza radial	5 266	N

El régimen de trabajo, mostrado en la Tabla 1, resulta altamente comprometedor para la integridad resistiva de la pieza, lo cual se hace patente en las recurrentes fallas por esfuerzos de flexión que presenta el ECDR (Ver Figura 2). Por lo tanto, se ha establecido una modificación en la geometría del perfil del diente, la cual persigue alcanzar una mayor robustez geométrica y por ende aumentar la resistencia del ECDR ante los esfuerzos de flexión.

Figura 2. ECDR empleado en la trasmisión de potencia; a) Vista principal y b) Vista lateral.



La influencia de la variación geométrica en el perfil del diente se ha comprobado mediante ensayos prácticos, los cuales han arrojado como resultados que la modificación de la geometría del perfil del diente no afecta la acción de engrane, por tanto no existen interferencia durante el funcionamiento de la transmisión.

En la Tabla 2 se presentan las características dimensionales del ECDR con modificación de la geometría del perfil del diente y del ECDR sin modificaciones geométricas (basado en la norma ISO/54 (1996) respectivamente.

Tabla 2. Características geométricas del perfil del diente del ECDR con modificaciones y sin modificaciones.

Característica geométrica	Simbología	ECDR con geometría modificada (mm)	ECDR sin geometría modificada (mm)
Altura del diente	h_t	12,20	13,50
Ancho del diente	S_c	10,50	9,42
Addendum	a	6,10	6,00
Deddendum	b	6,10	7,50
Diámetro primitivo	D_p	66,00	66,00
Diámetro de la base	D_b	55,60	51,00

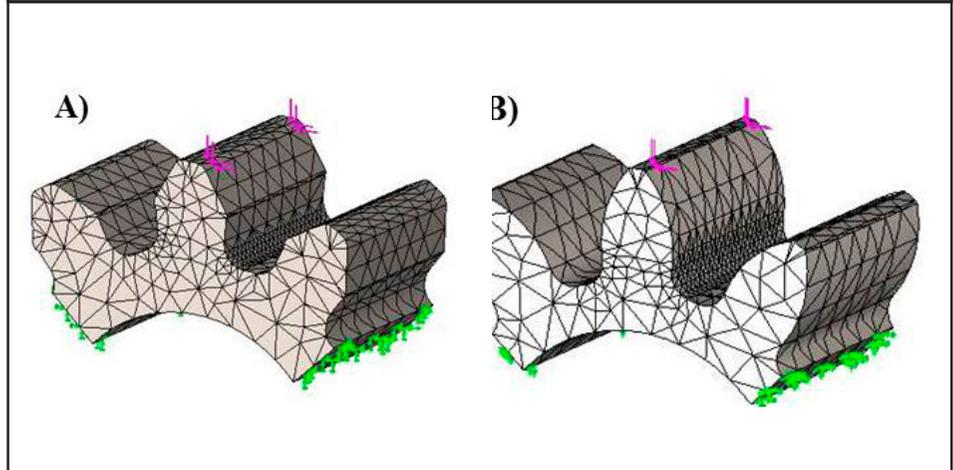
2.3. Simulación por el MEF de la pieza

En la comprobación de la variación geométrica propuesta del perfil del diente del ECDR se utiliza el MEF, a partir del cual se analizan los esfuerzos en la base del diente provocados por la acción de las cargas presentadas en la Tabla 1. La Figura 3 muestra el modelo CAD del ECDR utilizado en la simulación por el MEF, dicho modelo ha sido seccionado en una porción que contiene tres dientes. La geometría del perfil del diente de cada engranaje se basa en los parámetros geométricos establecidos en la Tabla 2.

Las cargas se aplican en la arista superior del diente, en el momento del contacto monopar, o sea, cuando solo un par de dientes está transmitiendo toda la carga, según el modelo de aplicación de las cargas propuesto por Carro-Suárez, et al. (2011). En cuanto a

las restricciones de movimiento: son del tipo fija y se encuentran ubicadas en las caras seccionadas, este tipo de restricción impide la existencia de traslaciones del modelo.

Figura 3. Modelos de análisis por el MEF del engranaje; a) ECDR con geometría del perfil modificada y b) ECDR con geometría convencional.



Un parámetro importante es el dimensionamiento de la malla, la cual divide el modelo geométrico en elementos con geometría conocida, las características de dicha malla se presentan en la Tabla 3. El tipo de malla es sólida cuadrática de alto orden con 10 grados de libertad por nodo. Asimismo, en la base del diente se realiza un control de mallado, o sea, se disminuye el tamaño de los elementos de la malla con respecto al tamaño global establecido en toda la pieza, esta acción busca como propósito aumentar la precisión de los resultados.

Tabla 3. Características de la malla.

Característica	Valor	Unidad de medida
Tamaño máximo de la malla	4	mm
Tamaño mínimo de la malla	0,5	mm
Tolerancia	0,125	mm

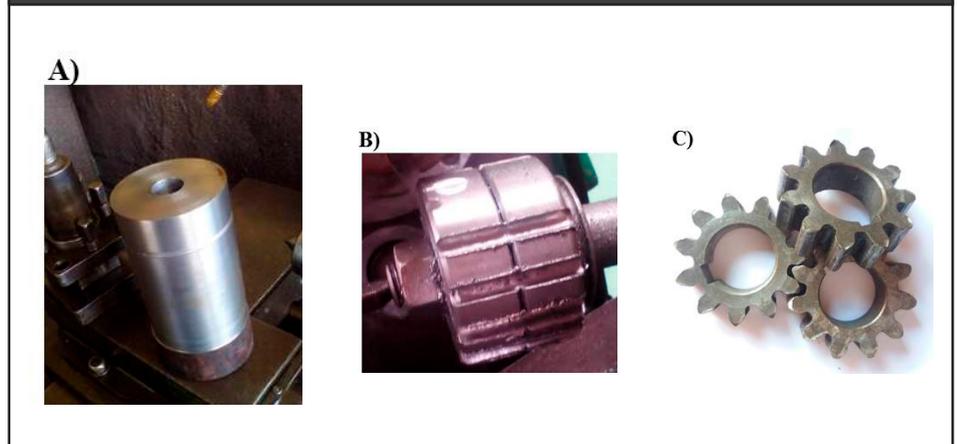
2.4. Método de elaboración de la pieza

Una vez establecida la geometría del perfil del diente del ECDR se procede a la elaboración de las piezas. El método de elaboración del conjunto de engranajes es: el maquinado por arranque de virutas, mediante el uso de máquina-herramientas convencionales: torno y fresadora. El material utilizado para la elaboración del conjunto de engranajes es el acero AISI 1040.

El primer paso tecnológico fue el maquinado en el torno de la pieza en bruto, se practicó un cilindrado exterior, luego un cilindrado interior y la última operación, en esta máquina-herramienta, fue el tronzado con vistas a separar las secciones con geometría anular (Ver Figura 4a)).

Posteriormente, se procede al maquinado de los dientes, haciendo uso de la máquina-herramienta fresadora, este método se caracteriza, de acuerdo con Budynas y Nisbett (2012), por cortar la pieza en bruto con una fresa de forma, para adaptarse al espacio del diente (Ver Figura 4b)) hasta quedar finalizada la geometría del ECDR (Ver Figura 4c).

Figura 4. Elaboración de los ECDR mediante el maquinado por arranque de virutas; a) Torneado; b) Fresado y c) Producto terminado.



2.5. Definición de la variable geométrica a controlar

El elemento de crucial importancia en las transmisiones mecánicas por engranajes es el diente, en el caso del esfuerzo a flexión, de acuerdo con Mott, et al. (2018), todo el análisis teórico tiene su fundamento en la geometría del perfil del diente. La variable geométrica para el análisis de la calidad del ECDR es el coeficiente del perfil del diente ante los esfuerzos de flexión (C_{pd}), establecido en esta investigación para relacionar los valores de la altura y el ancho del diente (Ecuación 3).

$$C_{pd} = S_c / h_t \quad (\text{Ecuación 3})$$

h_t = Altura del diente (mm).

S_c = Ancho del diente medido desde la circunferencia del diámetro primitivo del engranaje (mm).

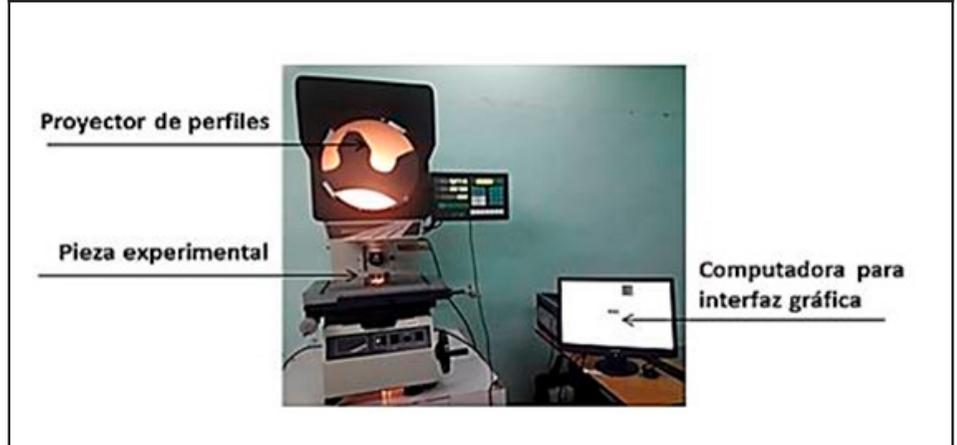
2.6. Metodología de medición de la pieza. Digitalización de la pieza a partir del uso del proyector de perfiles

En la determinación de las dimensiones de la geometría del perfil del diente del ECDR se utiliza un proyector de perfiles digital de banco CPJ-3000A, en la Figura 5 se muestra la disposición experimental para la obtención de las dimensiones. El procedimiento de medición consistió en la lectura, mediante amplificación óptica, de las dimensiones geométricas del perfil de los 11 dientes que componen la pieza, lo cual permitió la obtención de la geometría del ECDR con una adecuada precisión dimensional.

El análisis es centrado en la determinación de la configuración geométrica de las dimensiones del perfil del diente que forman parte constitutiva del coeficiente C_{pd} .

Una ventaja del uso del proyector de perfiles es la posibilidad de exportar los valores de la geometría de la pieza a un entorno CAD; lo cual constituye, sin lugar a dudas, una oportunidad para la generación de una base de datos con modelos CAD particularizados de los ECDR que contiene la información geométrica y los valores resistivos, obtenidos mediante el análisis numérico.

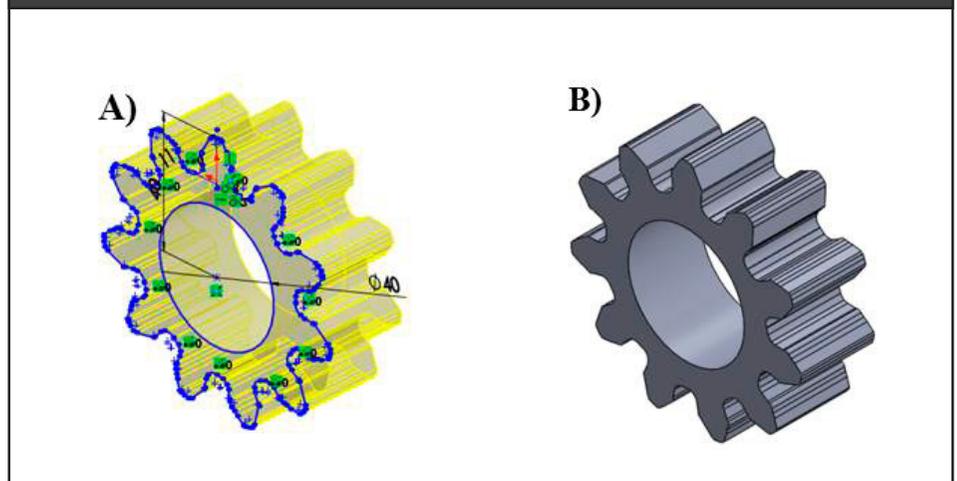
Figura 5. Disposición para la digitalización de la geometría del ECDR.



El programa informático empleado como interfaz gráfica para interactuar con el proyector de perfiles es QIM1008CPJ. Este programa permite registrar las coordenadas cartesianas de la pieza en un plano, igualmente posibilita crear entidades asociadas a la geometría de la pieza como: líneas definidas por dos puntos, líneas *spline*, arcos de tres puntos, ángulos, entre otros.

El fichero que contiene la información de la geometría obtenida en el PPO se inserta en un programa CAD, a partir del cual, utilizando operaciones típicas de estos programas: creación de croquis y operaciones de generación de sólidos en 3D (Ver Figura 6a), fue posible obtener el modelo CAD de la pieza obtenida mediante la fabricación por maquinado (Ver Figura 6b).

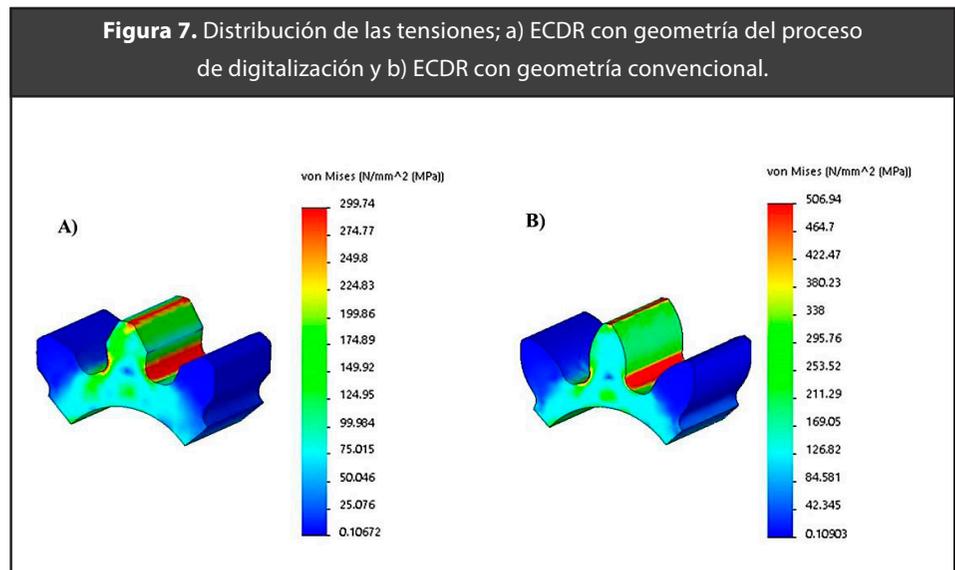
Figura 6. Procedimiento de obtención de la geometría de la pieza en un entorno CAD; a) Operación de extrusión y b) Modelo CAD del engranaje.



3. Resultados

En la Figura 7 se muestra el valor de las máximas tensiones, de acuerdo al criterio de von Mises, presentes en la base del diente, específicamente en la zona sometida a tracción. Los valores fueron determinados, a partir de la herramienta de identificación de resultados (presente en el programa SolidWorks 2022), en la entidad del radio de la base del diente en el modelo CAD de los engranajes estudiados.

En el ECDR con geometría del perfil del diente modificada (Ver Figura 6a) las tensiones tienen un valor de 299,74 MPa; mientras que en la Figura 6b) se muestra que el valor máximo es de 506,96 MPa para el caso del ECDR con geometría convencional, según lo dispuesto en la norma ISO/54 (1996).



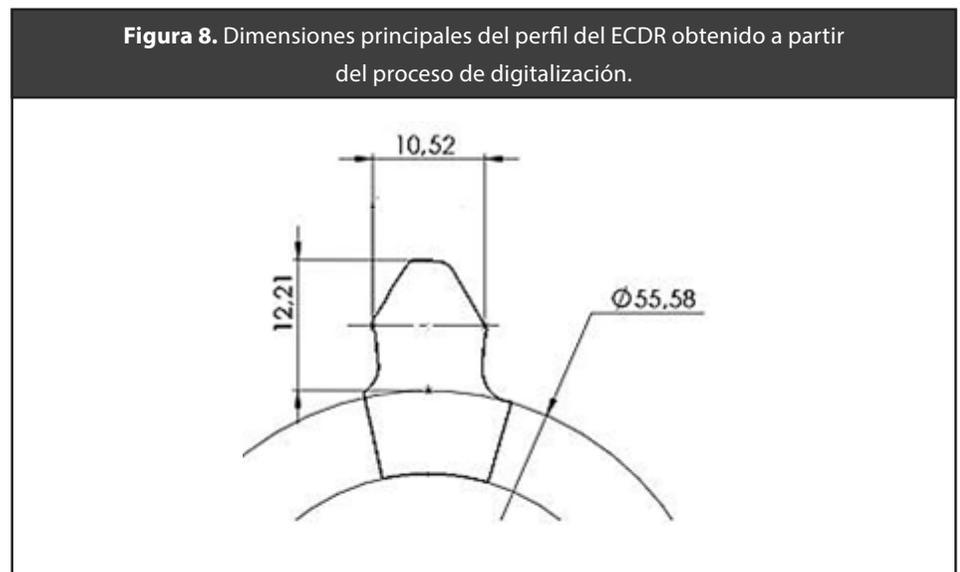
Debido a la robustez geométrica del diente en el ECDR con geometría del perfil del diente modificada, es posible apreciar que existen menores valores de tensión con respecto al ECDR con geometría convencional basado en la norma ISO/54 (1996). La diferencia del valor de las tensiones presentes entre las geometrías de los engranajes es de 207,2 MPa; lo cual puede considerarse altamente positivo en el orden resistivo. Por tanto, se comprueba que con la modificación de la geometría del perfil del diente en los ECDR, basado en el coeficiente del perfil del diente (C_{pd}), existen ventajas en el orden resistivo respecto a los ECDR con geometría no modificada.

La influencia del tamaño del elemento de malla sobre el resultado de las tensiones fue comprobada. Se redujo el tamaño de los

elementos a la mitad en otro estudio numérico, el error relativo entre ambos estudios numéricos es de 3,17 %.

3.1. Evaluación de la geometría del perfil del diente del ECDR

La evaluación de la calidad se centra en la geometría del perfil del engranaje, en tal sentido, el proceso de maquinado por arranque de virutas determinante es el fresado. En la Figura 8 se muestran las dimensiones principales del perfil del diente del ECDR, tomadas a partir del proceso de medición por amplificación óptica con el PPO, y exportadas a un formato CAD.



Se constataron diferencias entre los valores del perfil del diente del ECDR, obtenido mediante el proceso de fabricación de maquinado por arranque de virutas y la propuesta del modelo de engranaje con geometría modificada. En la Tabla 4 se muestra el análisis comparativo del perfil del diente de los ECDR, donde es posible apreciar que dichas diferencias no son significativas.

Tabla 4. Comparación entre el perfil del diente del ECDR fabricado con geometría modificada y la propuesta de ECDR con geometría modificada.

Características geométricas	Pieza fabricada del ECDR con geometría modificada (mm)	Propuesta de ECDR con geometría modificada (mm)	Error relativo (%)
S_c	10,52	10,50	0,19
h_t	12,21	12,20	0,08
C_{pd}	0,8616	0,8606	0,12

3.2. Estrategia de control de la calidad

Como parte del control de la geometría de los ECDR, que se elaboran mediante el proceso de maquinado por arranque de virutas (particularmente en el fresado del diente), se establece la metodología de CEP. En la Tabla 5 se muestra los valores de las mediciones realizadas, haciendo uso del PPO, al perfil del diente que se encuentra directamente sobre la región del chavetero de los ECDR. La variable geométrica que se controla es el coeficiente C_{pd} . El tamaño de la muestra es de 4 y el número de muestras es 7, por tanto el número total de piezas medidas es 28.

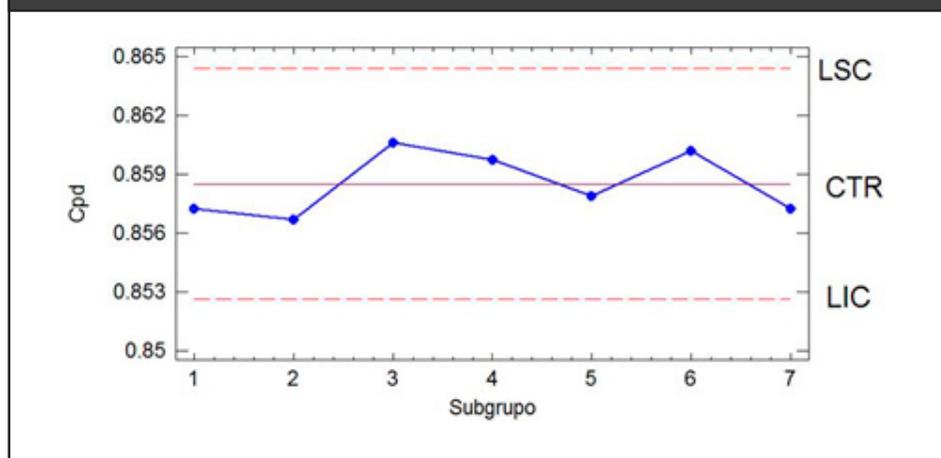
Tabla 5. Mediciones realizadas al perfil del ECDR.

Número de muestras	S_c	C_{pd}^1	S_c	C_{pd}^2	S_c	C_{pd}^3	S_c	C_{pd}^4
	h_t		h_t		h_t		h_t	
1	10,52	0,8616	10,46	0,8521	10,33	0,8541	10,56	0,8612
	12,21		12,28		12,09		12,26	
2	10,36	0,8502	10,55	0,8614	10,61	0,8610	10,42	0,8541
	12,19		12,25		12,32		12,20	
3	10,41	0,8621	10,51	0,8630	10,56	0,8601	10,41	0,8572
	12,08		12,18		12,28		12,14	
4	10,48	0,8592	10,51	0,8599	10,46	0,8578	10,53	0,8620
	12,19		12,22		12,19		12,22	
5	10,57	0,8581	10,33	0,8547	10,47	0,8579	10,58	0,8609
	12,32		12,09		12,21		12,29	
6	10,52	0,8603	10,41	0,8571	10,53	0,8651	10,43	0,8583
	12,23		12,14		12,18		12,15	
7	10,56	0,8608	10,45	0,8584	10,40	0,8584	10,52	0,8594
	12,27		12,17		12,11		12,24	

De acuerdo con el gráfico de control del proceso de fresado (Ver Figura 9), utilizado en la fabricación del diente con geometría modificada de los ECDR, es posible afirmar que dicho proceso se encuentra bajo un adecuado control estadístico (con un nivel de confianza del 95 %), puesto que los valores registrados provienen de una distribución normal con una media igual a 0,8585 y una desviación estándar igual a 0,0039.

De igual manera, es posible apreciar que no existe una tendencia notable de los valores del C_{pd} , hacia los extremos, ningún punto se encuentra fuera de los límites de control establecidos para el proceso. El límite superior de control (LCS) tiene un valor de 0,8644 y el límite inferior de control (LIC) tiene un valor de 0,8526; mientras que la línea central del proceso es de 0,8585.

Figura 9. Gráfico de control del proceso de maquinado por arranque de virutas (fresado del diente) utilizado en la fabricación de los ECDR.



Entre los elementos que inciden positivamente en el desarrollo del proceso de maquinado es posible relacionar: la acertada especificación del régimen de corte en la máquina-herramienta utilizada, a partir del material empleado; el control y la corrección oportuna del desgaste de la herramienta de corte, así como la atención constante a la posible degradación de los fluidos de enfriamiento para el corte de metales.

La utilización del CEP permite establecer modelos matemáticos para predecir, bajo los parámetros tecnológicos de maquinado invariantes, el comportamiento del coeficiente C_{pd} , lo cual es coincidente con lo planteado por Chaviano-Tovar, et al. (2021). Una ventaja del procedimiento propuesto en la investigación es la posibilidad de cerrar el ciclo de desarrollo del producto, en este

caso del ECDR, pues se evalúa la concepción inicial del diseño (en un ambiente CAD) hasta el control dimensional para valorar la calidad del proceso de fabricación.

4. Conclusiones

El procedimiento propuesto permite determinar la calidad geométrica y resistiva del perfil del diente de los ECDR, que se obtienen mediante el proceso de maquinado por arranque de virutas, de manera particularizada a partir de la efectiva integración con las herramientas CAD/CAE.

La modificación de la geometría del perfil del diente en los ECDR, basado en el coeficiente del perfil del diente (C_{pd}), constituye una adecuada solución para la disminución de las tensiones, provocadas por los esfuerzos de flexión, en la base del diente en los ECDR.

El CEP constituye un método que permite el acertado monitoreo del proceso de maquinado por arranque de virutas para la obtención del perfil del diente del ECDR, con geometría modificada, al posibilitar la detección de las probables causas de los problemas tecnológicos e incidir en el mejoramiento de los parámetros del proceso.

5. Referencias

- Budynas, R.; Nisbett, K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, México, McGraw-Hill/Interamericana. <https://pdfcoffee.com/diseo-en-ingenieria-mecanica-de-shigley-9na-edicion-richard-g-budynas-2-pdf-free.html>
- Carro-Suárez, J.; Flores-Nava, I.; Flores-Salazar, F. (2011). Propuesta de una metodología para el análisis de engranes rectos aplicando ingeniería asistida por computadora. 10^o Congreso Nacional de Mecatrónica, 3-4 de noviembre 2011 Jalisco, México. Asociación Mexicana de Mecatrónica A. C., 35-40. <http://www.mecamex.net/anterior/cong10/trabajos/art09.pdf>.
- Chaviano-Tovar, L.; Del Risco-Alonso, S.; Castelló-González, J.; Del Risco-Alfonso, R.; Ortega-Zayas Bazán, J. (2021). La capacidad del proceso como criterio de calidad en parámetros de piezas en bruto: Caso de estudio. *Revista Cubana de Ingeniería*, XII, 81-88. <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/771>.
- Contreras, C.; Meneses, J. (2015). Calibración y automatización de un proyector de perfiles usado para el control de calidad en la fabricación de perfiles plásticos extruidos. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 9, 7-11. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5230979.pdf>.

- Cotaquispe, L. (2007). Influencia del ángulo de presión en el esfuerzo de flexión del pie de diente para engranajes cilíndricos de dentado recto exterior mediante el método de los elementos finitos. 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2007 Cusco, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, 1-7. <https://docplayer.es/82944562-8o-congreso-iberoamericano-de-ingenieria-mecanica-cusco-23-al-25-de-octubre-de-2007.html>.
- Groover, M. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes and systems*, Hoboken, Estados Unidos., John Wiley & Sons, Inc. <https://www.fcusd.org/cms/lib/CA01001934/Centricity/Domain/4529/Fundamentals%20of%20Modern%20Manufacturing%20Materials%20%20Processes%20and%20Systems%20%204th%20Edition.pdf>
- Hayajneh, M.; Tahat, M.; Bluhm, J. (2007). A study of the effects of machining parameters on the surface roughness in the end-milling process. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 1, 1-5. <http://jjmie.hu.edu.jo/files/001.pdf>.
- ISO. (1996) Cylindrical gears for general engineering and for heavy engineering—Modules, ISO:54/1996, No., 1996.
- Kailuke, J.; Yenarkar, Y. (2013). Investigation of stresses in the thin rimmed spur gear tooth using fem. *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2, 437-441. <https://ijret.org/volumes/2013v02/i11/IJRET20130211064.pdf>.
- Kalpakjian, S.; Schmid, S. R. (2008). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, México, Pearson Educación. www.pearsoneducacion.net/kalpakjian
- Moreno-Pino, M. R., Cobas-Aguilera, F. Y Suárez-Franco, L. E. (2021). Aplicación de metodología para la realización del control estadístico de la calidad de procesos. *Revista de Desarrollo Sustentable, Negocios, Emprendimiento y Educación*, 33-45. <https://www.eumed.net/es/revistas/rilcoDS/25-noviembre21/calidad-procesos>.
- Mott, R.; Vavrek, E. M.; Wang, J. (2018). *Machine elements in mechanical design*, New York, Estados Unidos, Pearson Education. <https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/DESIGN%20SISTEM%20DAYA%20GERAK/Machine%20Elements%20in%20Mechanical%20Design.pdf>
- Schey, J. (2002). *Procesos de manufactura*, México D.F., McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. https://www.academia.edu/44631332/Procesos_De_Manufactura_John_A_Schey_3ra_Edici%C3%B3n
- Silva, P. J.; Alvares, A. J. (2020). Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming. *Journal of Engineering Manufacture* 234, 170-188. https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954405419844653&ved=2ahUKewivuc255uPqAhWn-nuAKHSvMB64QFjAAegQIBhAB&usq=AOvVaw11_F_KmtNFFfm-croFf8y.
- Tacle-Humanante, P. M.; Moya-Rodríguez, J. L.; Marty-Delgado, J. R. (2019). El índice de Robustez como parámetro para evaluar el comportamiento de las transmisiones por engranajes cilíndricos de dientes rectos. *Ingeniería Mecánica*, 22, 57-66. <http://scielo.sld.cu/pdf/im/v22n1/1815-5944-im-22-01-57.pdf>.
- Van-thoan, P.; Wen, G.; Yin, H.; LD, H.; Sy-Nguyen, V. (2015). Optimization Design for Spur Gear with Stress-Relieving Holes. *International Journal of Computational Methods*, 12, 1-11. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aps&AN=103686554&lang=es&site=ehost-live>.
- Woodall, W. (2000). Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. *Journal of Quality Technology*, 32, 341-350. <https://www.tandfonline.com/action/showCitFormats?doi=10.1080%2F00224065.2000.11980013>.