

El control dimensional y las decisiones en la fabricación de piezas / Dimensional control and decision making in the manufacture of parts

Lilian Chaviano-Tovar¹ lilian.chaviano@reduc.edu.cu <http://orcid.org/0000-0002-2177-5169>;
José Castelló-González¹ <http://orcid.org/0000-0001-8399-7034>; Silvio del Risco-Alfonso¹
<http://orcid.org/0000-0001-7228-7360>; Manuel Serrú-Batista¹<http://orcid.org/0000-0003-4940-6338>

Institución de los autores

¹Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz

País: Cuba

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento - No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

El trabajo aborda el control dimensional y las decisiones en la fabricación de piezas, se propone cómo se utilizó la detección de desviaciones no permisibles en varios de los parámetros de un engrane con dentado helicoidal, de módulo 3,5 mm y 38 dientes, para llegar a la propuesta de decisiones de carácter técnico organizativo en el proceso. Se utilizaron como métodos el histórico lógico, el de observación científica y las técnicas de medición. Luego del análisis de los resultados obtenidos se concluyó que los principales problemas se detectaron en desviaciones en el diámetro interior, en el paso, la pulsación radial y la dirección del diente, así como en el diámetro exterior. Se precisaron las causas más probables de estas desviaciones y se propusieron las acciones correctivas. El llevar las recomendaciones a vías de hecho en forma inmediata, pero gradual y continua, permitió enmendar los principales problemas que se detectaron.

Palabras clave: Control de calidad; Control dimensional; Fabricación de engranes

Abstract

Manufacturing by using machining processes allows responding to the high demands of shapes, levels of dimension accuracy and surface roughness of machine elements. With

respect to the manufacture of gears, there are some failures of these requirements, associated to manufacturing technological process factors. The purpose of this work is to present how to use the detection of non-permissible deviations in different parameters of a gear (with 38 helical teeth and a module of 3.5 mm) to get to the proposal of technical and organizational decisions in the process. The historical and logical methods were used, as well as, the scientific observation and measurement techniques. After analyzing the results, we concluded that the main problems were detected in the internal diameter deviations, the step, the radial pulsation and the tooth direction; as well as in the external diameter. The most probable causes of these deviations were detected, and the corrective actions were proposed. To immediately put the recommendations into practice, in a gradual and continuous way, allowed correcting the main detected problems.

Keywords: Quality control; Dimensional control; Gear manufacturing

Introducción

La fabricación de piezas para equipos y agregados se consigue en la actualidad mediante la aplicación de diversas tecnologías. La elaboración mediante procesos de maquinado continúa ocupando un importante lugar entre estas, y cada vez más, se consigue dar respuesta a elevadas exigencias en cuanto al maquinado de diferentes materiales, a la forma, los niveles de exactitud en las dimensiones y la rugosidad superficial de los elementos gracias a las modernas máquinas herramienta, el utillaje y las herramientas de corte, posibilitando alcanzar una elevada productividad. El control de la calidad para asegurar el cumplimiento de los diferentes parámetros de diseño y durante los pasos de la fabricación, es una importante herramienta para la conducción del proceso y la toma de decisiones operativas por parte de los directivos. La estrecha supervisión de la precisión de los engranajes durante su fabricación no solo es importante para los requisitos operacionales, sino también para detectar y controlar los problemas durante la fabricación en relación con las máquinas herramienta y su funcionamiento. (Gupta, Kumar y Laubscher, 2017)

En el país, como parte de la renovación industrial que se acomete en correspondencia con los lineamientos y directrices emanados del VII Congreso del Partido Comunista de Cuba (PCC, 2017), se realiza de forma gradual la sustitución de máquinas herramienta y equipamiento tecnológico, para posibilitar dar respuesta efectiva a las exigencias modernas en campos como el de la fabricación de piezas de repuesto para agregados y equipos. Entre

los componentes que se demandan con elevada frecuencia y diversidad, se encuentran los engranes, piezas con exigencias de calidad que resultan mayores que muchas otras, como es el caso de las piezas tipo eje, por citar solo un ejemplo. Esto se incrementa exponencialmente cuando se trata de engranes para agregados como las cajas de cambio de velocidades de diferentes medios de transporte, entre ellos los automóviles.

Los parámetros dimensionales de la macrogeometría y de la microgeometría de los engranajes permiten cuantificar su precisión.

La inexactitud o los errores en estos parámetros, causan una desviación de las condiciones ideales de transmisión de movimiento y se puede decir que el nivel y la cantidad de desviaciones o errores en ellos, gobiernan el rendimiento funcional de los engranes (Tandwiel, 2018), Así por ejemplo, errores en el espesor de los dientes (uno de los parámetros importantes de la macrogeometría), son la causa principal del exceso o reducción del juego entre engranajes acoplados y el exceso de holgura que se genera, provoca ruidos y afecta la fuerza efectiva que trasmite el diente. De igual manera, los parámetros de la microgeometría, que son los de forma (forma de los dientes, dados por su perfil y flanco) y de ubicación (asociados a la posición real de los dientes, principalmente el paso y la pulsación radial) cuantifican la calidad de los engranajes y pueden afectar de manera notable su rendimiento funcional (Chaviano y Coello, 2016). Los autores Gupta et al. (2017) plantean que en general, la asignación de los grados de calidad del engranaje guarda estrecha relación con los errores de forma y ubicación permisibles.

Cerca del 25% de las fallas de los engranes en explotación tienen su génesis en el diseño y fabricación de los mismos, según los autores Machado y Moya (2005). Por supuesto este valor se elevará considerablemente a medida que salgan a explotación piezas defectuosas.

Ante la situación de que en una fábrica-taller escogida para el estudio, se conjugan factores que afectan el cumplimiento estable de las exigencias dimensionales y de forma de este tipo de pieza de repuesto, provocándose una afectación a la calidad en determinado número de ellas, se acometió el que constituye principal contenido para el presente artículo. Su propósito es exponer cómo, mediante la detección de desviaciones en el diámetro interior, en el paso, en las pulsaciones radiales y en la dirección del diente, junto a las del diámetro exterior de los engranes, se pudo realizar un análisis que llevó a identificar las posibles fuentes de los problemas detectados. Derivado de esto, se efectuaron las recomendaciones pertinentes a la empresa. Esta experiencia y sus resultados pudieron extrapolarse a la fabricación de otros grupos de engranes en la propia entidad.

Materiales y métodos

La posibilidad de adquisición e introducción de modernas máquinas talladoras y rectificadoras de engranes dotadas de control numérico (CNC, por sus siglas en inglés), significó un importante paso para cumplir eficazmente con las exigencias de estos procesos. Específicamente en el caso de análisis, se convirtió a su vez en un reto para elaborar las piezas en bruto que cumpliesen con exigencias mínimas para ser llevadas a las operaciones de tallado y rectificado, utilizando equipamiento tradicional con un alto número de años de explotación. Este constituye por tanto un antecedente importante que dio lugar a la necesidad de realizar el trabajo que a continuación se expone.

Se decidió realizar el estudio en una rueda dentada de caja de cambios de velocidades perteneciente a un camión para transporte de cargas. Se trata de un engrane cilíndrico de dientes helicoidales de módulo 3,5 mm, con 38 dientes. El mismo se fabrica mediante una pieza en bruto proveniente de un proceso de forja, importada. La fabricación del engrane (ver figura 1) comienza con el correspondiente torneado de esa pieza en bruto y el posterior rectificado del diámetro interior, para luego ser instalada nuevamente en el torno y dar la medida final al diámetro exterior. A continuación, se realiza el mortajado del chavetero. El engrane pasa a continuación a la operación de tallado de los dientes en una máquina talladora del tipo HG 250 (Samputensili, 2016) con fresa madre de módulo 3,5 mm.

Posterior al tallado, se aplica una cementación de 0,5 a 0,7 mm y el diámetro interior se somete al rectificado para obtener la medida final que será la que acoplará con el árbol correspondiente de la caja de cambios. Finalmente, se realiza el proceso de rectificado de los dientes en la rectificadora de igual tipo, con lo cual la pieza queda lista.

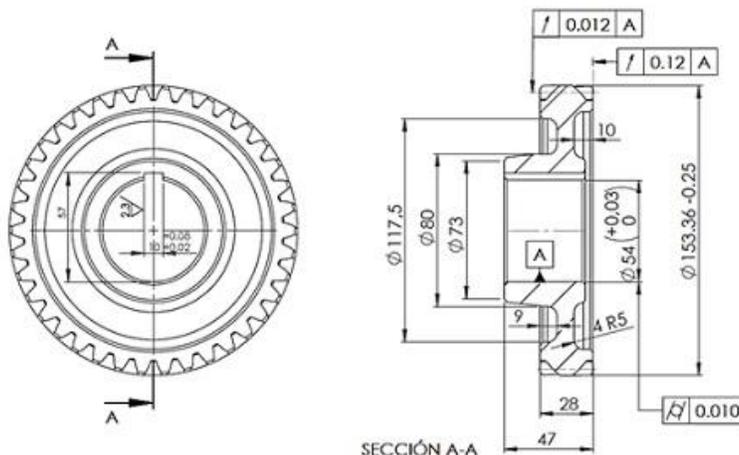


Figura 1. Especificaciones principales del engrane cilíndrico helicoidal.

Muestra a considerar y mediciones efectuadas.

Para un nivel de confianza de 90 % y un error máximo admisible de 16 % la muestra seleccionada fue de 25 piezas, de 260 como población total. La muestra se tomó en pleno proceso de producción, en base a lo recomendación publicada por la compañía Psyma (2015).

Los parámetros de control de la rueda dentada objeto de análisis fueron los siguientes:

Diámetro exterior (D_e)

Diámetro interior (D_i)

Error total del perfil (F_α)

Error de la dirección del diente (F_β)

Error individual del paso (f_p)

Error total del paso (F_p)

Pulsación radial del diámetro primitivo (F_r)

Los principales medios y equipos que se utilizaron fueron, un pie de rey (de 0 a 300 mm) con una apreciación de 0,05 mm para realizar la medición del diámetro exterior; un medidor de interiores y un micrómetro de exteriores (de 50 a 75 mm), ambos con una apreciación de 0,01 mm (marca MITUTOYO) para realizar el control del diámetro interior.

El medio de medición más importante utilizado en el control de las dimensiones ya mencionadas es la verificadora de engranes del tipo Gradey H300 (NANO Metrology, 2015).

Resultados

Síntesis de los problemas detectados y apreciaciones acerca de sus posibles causas.

A continuación, sin entrar a detallar y a modo de ejemplos, se muestran los siguientes resultados de las mediciones, procesados según experiencias derivadas de los trabajos de Chaviano (2016) y del Sol (2016).

Diámetro exterior (D_e).

Al analizarse el diámetro exterior de los engranes se pudo apreciar que existen errores en las dimensiones comprobadas, pues gran parte de estas se encontraron fuera de parámetros; existe un valor mínimo de 152,6 mm y un máximo de 153,6 mm, los cuales en varios casos se alejan de la zona de tolerancia.

Diámetro interior (D_i).

Esta dimensión se controló mediante el medidor de interiores, considerando las desviaciones de 0 y +0.03 mm, correspondientes al diámetro interior ($\varnothing 54 H7^{+0,03}$).

En la gráfica siguiente (Figura 2), se aprecia con claridad que en algunas mediciones hay engranes cuya dimensión queda completamente fuera del área de tolerancia, mientras que otros están dentro de los parámetros establecidos. El engrane 2 por ejemplo, presentó problemas con las mediciones 2, 4 y 5 sin embargo, las mediciones 1 y 3 son correctas.

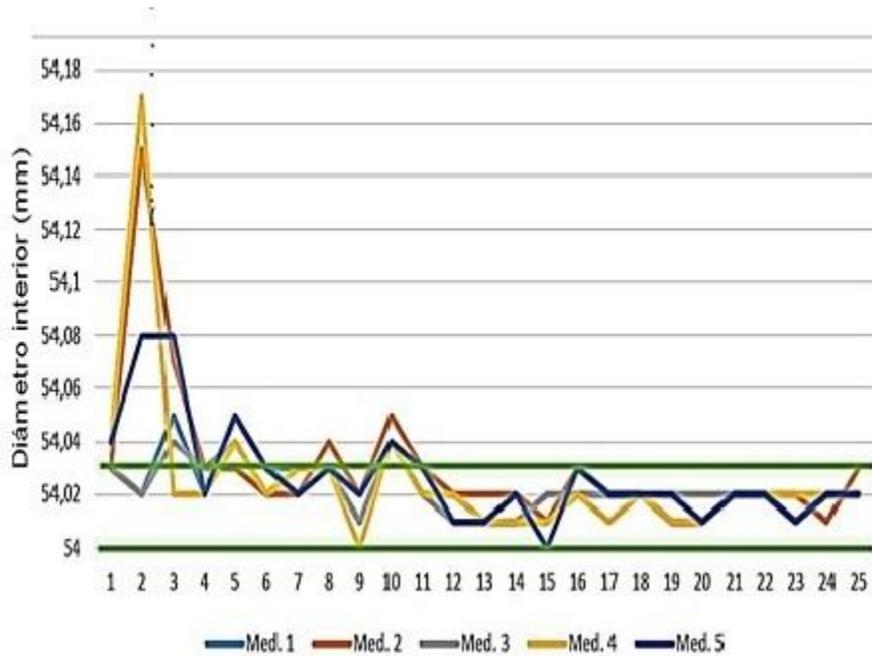


Figura 2. Valores del diámetro interior de los engranes.

Otro parámetro que se muestra a manera de ejemplo, es la pulsación radial.

Pulsación radial del dentado antes del rectificado de los dientes.

La máxima pulsación radial del dentado permitida para lograr un IT 9 es de $63 \mu m$. El resultado de la medición reflejó que solo un engrane, el 24 quedó en el rango permitido

Pulsación radial del dentado después del rectificado de los dientes.

Al pasar los engranes por el rectificado de los dientes y ser comprobados nuevamente, se apreció que el 40 % de los mismos permanece con error intolerable. En este caso no debe ser mayor a $32 \mu m$, para alcanzar un IT 7.

En la siguiente gráfica (Figura 3) se aprecia una vez más como el engrane 2 presenta el mayor error, en este caso $215,8 \mu m$ de pulsación radial.

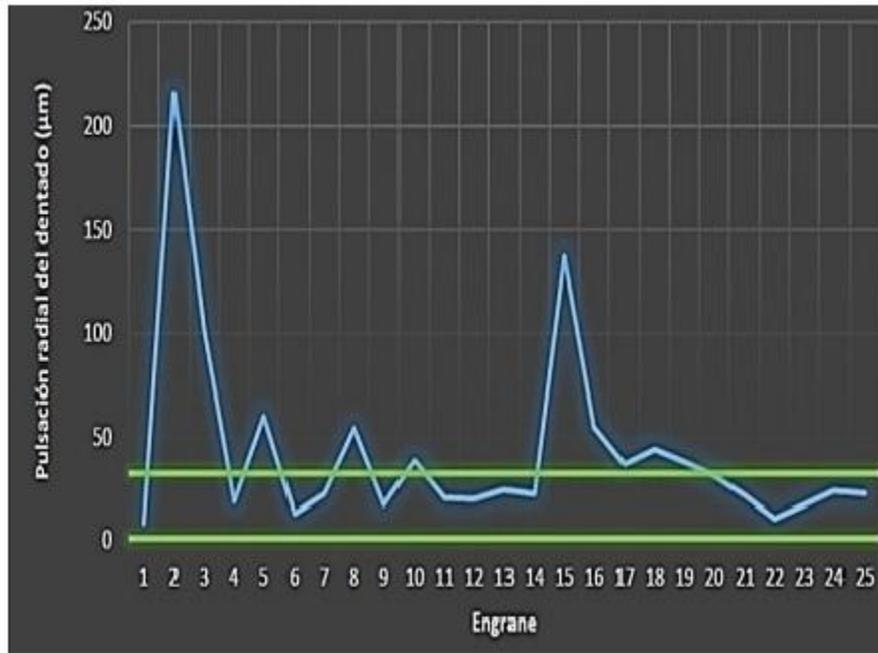


Figura 3. La pulsación radial del dentado después del rectificado de los dientes.

Al concluir todas las mediciones y su procesamiento, los resultados obtenidos permitieron elaborar las siguientes tablas, que resumen el estado de la muestra. (Tablas 1 y 2)

Tabla 1. Cantidad de engranes calificados para calidad IT9 según los parámetros analizados, antes del rectificado.

Parámetro del engrane	Califican	No Califican	Calificación %
De	14	11	56
Di	19	6	76
F α	3	18	14,29
F β	0	21	0
fp	2	19	9,52
Fp	2	19	9,52
Fr	1	20	4,76

Tabla 2. Cantidad de engranes calificados para calidad IT7 según los parámetros analizados, después del rectificado.

Parámetro del engrane	Califican	No Califican	Calificación %
De	14	11	56
Di	19	6	76
F α	20	5	80
F β	16	9	64
fp	11	14	44
Fp	19	6	76
Fr	15	10	60

Se aprecia que ningún engrane cumplió con un grado IT 9 posterior al tallado de los dientes, incluso ninguno obtuvo valores dentro de la tolerancia en el error de la dirección del diente y los demás parámetros se vieron seriamente afectados. Luego del rectificado solo el 28 % de los engranes alcanzó la calidad 7ma o menor, o sea, en 7 engranes de los 25 analizados se obtuvo la calidad exigida.

Con estos desfavorables resultados se realizó el análisis de los factores relacionados con el proceso tecnológico de elaboración, que podían tener la mayor influencia o ser causas principales de los mismos.

Prácticamente todos los parámetros analizados presentaron problemas. Las desviaciones dimensionales y de forma en el diámetro interior es uno de los problemas que más afecta la calidad de los engranes, ya que este diámetro se toma como base para la manufactura, para la medición y para el montaje de estos. Teniendo en cuenta que el diámetro exterior es una de las superficies relativamente más fáciles de obtener, se aprecia que en el 44 % se presentaron problemas, a pesar del rango de tolerancia permitida. en relación con los demás parámetros.

Dentro de los parámetros de la microgeometría de los engranes, el más afectado fue el error individual del paso, seguido por la pulsación radial del dentado. Los errores en la dirección de los dientes y total del paso, también mostraron problemas apreciables. Dentro de los analizados, fue el error total de la forma del perfil el de mejor comportamiento si bien, tomando en consideración que el proceso se realiza por generación con fresa madre y en máquinas modernas, pudieran esperarse mejores resultados.

Con estos elementos, y a modo de resumen, se muestran las posibles fuentes de los principales defectos. Como se indica, las desviaciones en el diámetro interior son producto de errores en el rectificado del mismo, y a su vez, acarrear problemas en la pulsación radial (F_r), en el paso y en la dirección del diente (F_β) (Tabla 3).

Tabla 3. Fuentes de las desviaciones observadas.

POSIBLES FUENTES DE LOS PRINCIPALES DEFECTOS		
Rectificado	Fijación para el tallado	Torneado
inadecuado del Di		
		
Desviaciones en el Di	Errores de F_r, paso y F_β	Desviaciones en el De

Derivado de este análisis, se propusieron a la empresa recomendaciones en las siguientes direcciones:

- Realizar una revisión y análisis del cumplimiento de los principios de unidad y constancia de las bases tecnológicas de la pieza analizada (engrane) contemplando todas las operaciones.
- Se hizo evidente que algunos errores están relacionados con la falta de coincidencia de las bases, ya que como resulta conocido, las superficies y ejes tomados como referencia en el dimensionado de diseño para cumplir con las exigencias de la pieza, han de ser tomados en cuenta durante la fijación para la elaboración y en las mediciones (Kórsakov, 1974).
- Revisar y exigir el cumplimiento estricto de la ejecución de las acciones de control de la calidad durante el proceso de elaboración de la pieza.
- Se evidenció que existía falta de rigor en el control; que ello puede haber sido decisivo para que no se detectaran oportunamente las desviaciones y se adoptaran las medidas correctivas de carácter técnico y de disciplina en la ejecución del proceso. Con ello se evitaba además que piezas que debían salir del proceso continuaran siendo elaboradas aun cuando ya no cumplían con los requerimientos establecidos.

- Revisar las condiciones de trabajo de las muelas abrasivas para el rectificado de los dientes.
- Analizar los sobre espesores recomendados, a fin de ajustarse a los mismos en las piezas en bruto que están en proceso. La sobrecarga a estas muelas abrasivas, producto de errores dimensionales y de forma, pueden originar problemas en la máquina y los dispositivos, así como en la vida útil de esas muelas.
- Revisar el diseño y funcionamiento del dispositivo para el tallado.
- Para llevar a cabo la instalación de la pieza en la máquina talladora se cuenta con un dispositivo elaborado en la propia empresa. Producto de que este dispositivo tiene un papel muy importante en el correcto posicionamiento de la pieza para realizar el tallado y de ello depende también la calidad del producto final, se considera conveniente una revisión de su diseño, particularmente de las cadenas de medida y las tolerancias, de ahí la recomendación final antes mencionada.

Conclusiones

1. Los principales defectos detectados son: desviaciones en el diámetro interior; paso, de pulsación radial y de dirección de diente; y desviaciones en el diámetro exterior.
2. Las posibles fuentes de los defectos detectados tienen que ver con la fabricación: torneado del diámetro exterior, rectificado inadecuado del diámetro interior y fijación para el tallado.
3. Se expusieron a la organización recomendaciones como: revisión del diseño del engrane, cumplimiento estricto del control de la calidad durante el proceso de elaboración de la pieza, analizar las condiciones de trabajo de las muelas abrasivas para el rectificado de los dientes, examinar el diseño y funcionamiento del dispositivo para el tallado.
4. Las medidas adoptadas, dada la similitud de los procesos, con el estudio de caso estudiado que se ejecutó sin afectar la continuidad de la producción, se extrapolaron a la fabricación de otros grupos de engranes en la propia entidad.

Referencias Bibliográficas

- Chaviano, T.L. y Coello, M.N. (2016). The magnitude of the centered in components: evaluation. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*. Tome XIV, fascículo: 2. <http://annals.fih.upt.ro/indexes.html>
- Chaviano, T. L. (2016). Simulación de valores geométricos estableciendo parámetros estadísticos para el cumplimiento de los índices de capacidad teóricos en un proceso de torneado. *Revista Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*. 5(16), 83-98. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=215048805007>
- del Sol, F. I. (2016). *Ajustes en los acoplamientos de elementos de máquinas: análisis dimensional*. Tesis de pregrado. Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba.
- Gupta, K., Kumar, N. y Laubscher, R. (2017). Advanced Gear Manufacturing and Finishing. Chapter 7. *Measurement of Gear Accuracy*.
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gear-accuracy>
- Kórsakov, V. (1974). *Fundamentos de la tecnología en la construcción de maquinaria*. Moscú. Editorial Mir.
- Machado, Á.S. y Moya, L.J. (2005). Principales fallas en las transmisiones por engranajes. *Centroazúcar*, 32(4) 62-67.
<http://centroazucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2005/4/11.pdf>
- NANO Metrology-Gear Measuring Machine (2015). GRADEY-H series gear measuring center. <http://www.cmm-nano.com/gear-measuring-machine/high-precision-gear-measuring-machine.html>
- Partido Comunista de Cuba (2017). Política industrial y energética. Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución para el período 2016-2021. Ed. *VII Congreso del PCC*. La Habana: PCC.
- PSYMA (2015) ¿Cómo determinar el tamaño de una muestra?.
<https://www.psyma.com/company/news/message/como-determinar-el-tamano-de-una-muestra>
- Samputensili (2016) Máquina talladora de engranajes \varnothing 250 mm | HG 250.
<https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/maquina-talladora-engranajes-80445.html>
- Tandwiel. (2018). Level of accuracy and compliance of the teeth.
<http://www.tandwiel.info/en/gears/level-of-accuracy-and-compliance-of-the-teeth/>.

Síntesis curricular de los Autores

Dr. C. Lilian Chaviano-Tovar¹ lilian.chaviano@reduc.edu.cu <http://orcid.org/0000-0002-2177-5169>

Ingeniera Mecánica, Dr. C.T. por la Universidad Martha Abreu de Las Villas. (Villa Clara, Cuba). Se desempeña como Vicedecana de la Facultad de Electromecánica de la Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey. Investiga en temas relacionados con la manufactura en procesos de mecanizado y en aplicación de las Mediciones Técnicas. Profesora Auxiliar del Departamento de Ingeniería Mecánica y colaboradora del Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas (CEEFREP) de la Universidad de Camagüey.

M. Sc. José Castelló-González¹ jose.castello@reduc.edu.cu <http://orcid.org/0000-0001-8399-7034> /Ing. Mecánico. Profesor de la carrera de Mecánica en la Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz (UC) e investigador en temas relacionados con la Ciencia de los Materiales, la aplicación de materiales, entre ellos los hierros fundidos, sus características y modificaciones estructurales para conseguir propiedades deseadas. Profesor Auxiliar, máster en Gerencia de Ciencia e Innovación, ha concentrado su labor docente e investigativa en los temas relativos a la fabricación de piezas y la fabricación y explotación de herramientas de corte para el maquinado. Ha publicado varios artículos en temas afines a esta actividad y al trabajo del Centro de Estudios de Explotación, Fabricación y Recuperación de Equipos y Piezas (CEEFREP) en el cual labora.

M. Sc. Silvio del Risco-Alfonso¹ silvio.delrisco@reduc.edu.cu <http://orcid.org/0000-0001-7228-7360>
Licenciado en Educación. Mecánica. Máster en Ciencias en Educación por el Instituto Superior Pedagógico José Martí. (Camagüey, Cuba). Investiga en temas relacionados con la manufactura en procesos de mecanizado y en aplicación de las Mediciones Técnicas. Se desempeña como Profesor Auxiliar en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Camagüey.

Ing. Manuel Serrú-Batista¹ manuel.serru@reduc.edu.cu <http://orcid.org/0000-0003-4940-6338>
Ingeniero Mecánico graduado en la Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz (Camagüey, Cuba). Colaborador del CEEFREP de la Universidad de Camagüey. Se desempeña actualmente como Especialista en la Empresa de Talleres Ferroviarios de Camagüey.

Institución de los autores

¹Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz

Fecha de Recepción: 19 de abril 2020

Fecha de Aprobación: 22 de junio 2020

Fecha de Publicación: 31 de julio 2020