

# Estudio comparativo de capacidad entre piezas fabricadas con máquinas tradicionales y centro de mecanizado



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

Director:

***Dr. Manuel San Juan Blanco***

**Curso: 2012 - 2013**

Alumno:

***Borja García Hernando***

# Estudio comparativo de capacidad entre piezas fabricadas con máquinas tradicionales y centro de mecanizado

## *Resumen*



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

Director:

**Dr. Manuel San Juan Blanco**

**Curso: 2012 - 2013**

Alumno:

**Borja García Hernando**

## Introducción

La calidad en fabricación es un término muy importante que puede llegar a repercutir en los beneficios de una empresa, ya sea esta grande o pequeña.

En este estudio se dará una definición para este término, así como para la *capacidad*, que es, a su vez, otro término estrechamente relacionado con la calidad de un producto.

Este estudio quiere dar una guía a los pequeños talleres de cómo obtener un indicador de la calidad de sus productos, dicho término es la anteriormente citada *capacidad*.

## Objetivos

Los objetivos de este proyecto fin de carrera son los siguientes:

Profundizar en el conocimiento de la metodología del estudio de capacidad de los sistemas productivos. Así como realizar una aclaración sobre el concepto de calidad de fabricación, y así observar lo íntimamente ligados que están estos dos conceptos.

Mostrar la metodología que se podría emplear en la aplicación de esta técnica en una PYME o en un pequeño taller. Mismamente, mostrar la adaptación de dicha metodología para que, dada una determinada capacidad, se obtengan los intervalos de tolerancia, a partir de los cuales, la calidad de los productos sea suficiente. Esto último se refiere a una característica concreta de la pieza terminada o no, es decir, que la capacidad se aplica a una única característica a la vez, sin embargo puede aplicarse tantas veces como se quiera en distintas características.

Validar la metodología aplicando su uso en el taller de la Escuela de Ingeniería Industrial de la sede de Francisco Mendizábal y de la sede de Paseo del Cauce. Comparando los resultados de máquinas convencionales y de Control numérico. También asignar, para cada característica estudiada, los intervalos de tolerancia límites para los cuales, a partir de ellos, las máquinas utilizadas en este estudio, dejan de tener una calidad suficiente de fabricación; y por ende, el rango de tolerancias admisibles para las máquinas empleadas; para validar la adaptación de la metodología obteniendo los intervalos de tolerancia límites dada una capacidad determinada.

Explicar el funcionamiento de las máquinas convencionales utilizadas en este estudio, así como de las máquinas de medida empleadas para la obtención de los datos a utilizar para la validación de la metodología, con el fin de otorgar un mejor entendimiento sobre la validación de la metodología.

Comprobar el estado de las máquinas convencionales del taller de la Escuela de Ingeniería Industrial de la sede de Francisco Mendizábal y de la sede de Paseo del

Cauce mediante la misma aplicación de esta metodología, para así determinar si dichas máquinas tienen capacidad suficiente para una producción en serie o en pequeñas series; ya que en estos momentos únicamente, estas máquinas tradicionales y el centro de mecanizado, tienen función educativa y sería interesante determinar si pudieran utilizarse para producir pequeñas series de piezas, todo ello teniendo en cuenta sus restricciones de material mecanizable en el caso de las máquinas convencionales.

## **El método de capacidad de los medios de fabricación**

La **calidad** de un producto (por extensión, proceso o servicio) está constituida por el conjunto de propiedades y características del mismo, que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades establecidas o implícitas. También puede definirse la calidad como la idoneidad o utilidad del producto respecto a la aplicación para la que ha sido previsto.

**Calidad de proyecto o de diseño** es la medida en que las características establecidas en el mismo logran que el producto diseñado proporcione esa utilidad.

**Calidad de fabricación o de concordancia** es la medida en que el producto real fabricado satisface las especificaciones del proyecto.

La **calidad deseada por el cliente** queda definida por lo que está dispuesto a pagar en función de lo que obtiene y valora, o en la medida que satisface sus necesidades y expectativas. Por ello, la calidad de un mismo producto resulta valorada de distinta manera por distintos clientes, y en consecuencia, en la etapa de diseño hay que tener claro a qué segmento del mercado va dirigido el producto.

Conviene hacer todos los esfuerzos posibles para que las tres calidades mencionadas coincidan, de forma que la calidad de diseño coincida con la que desea el cliente y, a su vez, sea la que se logre en el proceso de fabricación.

Según la norma UNE – ISO/TR 10017 *El análisis de la capacidad de proceso es el examen de la variabilidad y distribución inherente de un proceso, con el fin de estimar su habilidad para producir resultados que sean conformes con el rango de variación permitido por las especificaciones.*

La capacidad y la variabilidad sirven para:

- Definir el riesgo de no conformidad del producto.
- Definir la frecuencia de muestreo o el tamaño de la muestra.

- Definir las cifras productivas: predecir los riesgos para la aplicación de las especificaciones productivas y por lo tanto un mejor conocimiento de los costos.
- Definir la precisión de la máquina o el intervalo de reglaje.
- Permitir la recuperación de información en la oficina de estudios o métodos para definir objetivamente tolerancias. Por lo que se crea una retroalimentación de información entre el diseño y la producción a través de la capacidad y la variabilidad.

## Metodología para la aplicación en un pequeño taller (PYME)

En primer lugar se recopilan los datos necesarios para el estudio.

Se ha de calcular la media de la muestra, así como la desviación tipo o estándar de la misma para su utilización en el cálculo de la capacidad.

En segundo lugar se deben elegir los indicadores de la capacidad a utilizar dependiendo de que se necesite conocer.

Si se quiere, simplemente, conocer si una máquina o proceso podría tener capacidad suficiente para la realización de una pieza futura a partir de una pequeña pre-serie, basta con utilizar el **índice de capacidad simple**.

$$Cap = Cp = \frac{\text{intervalo de tolerancia}}{\text{dispersión global del proceso}} = \frac{IT}{6\sigma}$$

El **indicador de la capacidad centrada** en conjunto con el indicador de capacidad simple permiten comprobar que el proceso tiene realmente capacidad suficiente,

$$Cpk- = \frac{\text{media} - \text{tolerancia inferior}}{3\sigma}$$

$$Cpk+ = \frac{\text{tolerancia superior} - \text{media}}{3\sigma}$$

Dependiendo de la rigurosidad del estudio a realizar, estos dos indicadores pueden ser, o no, suficientes. Si la empresa lo considera oportuno, puede utilizar los indicadores anteriores en conjunto con el **indicador de la pérdida de capacidad debido a desajustes**, que contempla todo el proceso, tanto la dispersión como el centrado, para limitar el ajuste a realizar al proceso en pos de optimizar la capacidad del mismo.

$$\frac{IT}{6 \times \sqrt{\sigma^2 + (\text{media} - \text{medida nominal})^2}} \text{ o } Cpm = \frac{Cap}{\sqrt{1 + 9 \times (Cap - Cpk)^2}}$$

Existen otros indicadores como el indicador de capacidad de máquina y los indicadores de capacidad de máquina centrada que siguen las mismas fórmulas que sus homónimas y que dan la misma información, con el único distintivo de referirse exclusivamente a una máquina en particular, en vez de a un proceso.

En tercer lugar se debe calcular la capacidad utilizando las fórmulas dadas.

Es posible que lo que quiera conocer la empresa o el cliente sean los límites de tolerancia, a partir de los cuales, la máquina o proceso deja de tener capacidad suficiente. Lo cual es muy útil a la hora de aceptar un pedido que se sale de lo normal para la empresa, ya que se podrá saber de antemano si es necesario, o no, adquirir nuevas máquinas más precisas o modificar el proceso en cuestión. Para ello simplemente se deben despejar los intervalos de tolerancia y los límites de tolerancia de las ecuaciones anteriormente utilizadas.

Por último comprobar que el resultado es mayor que 1, o en su lugar, mayor que el coeficiente de seguridad elegido.

Para un mejor entendimiento de la metodología aquí explicada, se utiliza un ejemplo práctico.

## **Aplicación**

En este estudio tenemos dos tipos de piezas distintas:

- Engranaje, fabricado con máquinas convencionales.
- Pieza por control numérico de revolución, fabricada empleando un centro de mecanizado por control numérico.

Y las características de estudio elegidas de dichas piezas son las siguientes:

Para el engranaje:

- Perfil de evolvente.
- Diámetro Exterior.
- Diámetro del agujero:
- Anchura del engranaje.

Para la pieza de revolución:

- Conicidad.
- Radio de curvatura de la ranura.

Las máquinas convencionales empleadas para la fabricación del engranaje son las siguientes:

- Torno Paralelo.
- Fresadora universal.

Ambas máquinas del taller de la Escuela de Ingenierías Industriales con sede en Francisco Mendizábal.

En el torno paralelo se realizan, en este orden, un cilindrado de desbaste, un refrentado y limpiado de la cara, un cilindrado de acabado, un chaflanado de 45° en el diámetro exterior, un taladrado, un tronzado para separar cada engranaje, un refrentado de la cara de tronzado y, por último, un chaflanado de 45<sup>a</sup> en el diámetro del agujero por ambas caras y un chaflanado en la cara de tronzado en el diámetro exterior para igualar la pieza.

En la fresadora universal se realiza el tallado de los dientes.

El centro de mecanizado por control numérico se encuentra en el taller de la Escuela de Ingenierías Industriales con sede en Paseo del Cauce.

Para la recogida de datos se han empleado dos máquinas de medida distintas:

- Máquina de medida por coordenadas 3D.
- Proyector de perfiles.

Ambas máquinas de medida se encuentran en el taller de metrología de la Escuela de Ingenierías Industriales con sede en Paseo del Cauce.

## **Datos obtenidos**

Con los datos obtenidos de las características elegidas (Perfil de evolvente, diámetro exterior, diámetro del agujero y anchura, todos ellos del engranaje; y conicidad y radio de curvatura de la ranura, ambos de la pieza de revolución) se continúa con el cálculo de la capacidad de todas ellas. Estos cálculos se agrupan por característica realizándolos para cada método de obtención de medidas empleado, coeficiente de seguridad empleado y máquina de medida empleada.

Al no tener los límites de tolerancia de las características del engranaje se procede al cálculo de los mismos mediante el método de la capacidad ya explicado, y para poder realizar una comparativa, y pese a disponer de los límites de tolerancia de las características de la pieza de revolución, también se calculan los límites de esta por el método de la capacidad.

## Conclusiones

Con los resultados obtenidos en este estudio, así como con el proceso de cálculo utilizado en él se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

El estudio de la capacidad es un buen indicador de la calidad del producto y del estado del proceso, por lo que es muy recomendable utilizarlo para este fin.

La metodología aquí expuesta no requiere de sistemas de cálculo avanzado ni un gran nivel de destreza para llevarla a cabo, lo que facilita su implantación. Aunque la interpretación de los resultados, en contraste, sí que necesita de ciertos conocimientos de los procesos. Esto hace de esta metodología una opción casi necesaria para las pequeñas y medianas empresas, más concretamente en los pequeños talleres, puesto que, la inversión necesaria para la implantación de esta metodología no va más allá de la recogida de datos, que de todas formas es obligatoria para un control de calidad, y una mínima formación por parte de los encargados del control de calidad para realizar los cálculos acorde a las fórmulas dadas y realizar una interpretación válida de los mismos.

Los distintos usos del estudio de capacidad, como comprobar si un proceso está preparado para una futura serie o examinar el estado del reglaje del proceso o las máquinas a la vez que se comprueba la calidad, hacen que sea muy recomendable su implantación.

El beneficio de las pequeñas y medianas empresas se vería realizado al otorgarlas un control de calidad regulado que puede ser certificado, sin necesidad de una inversión importante para ello, abriendo el mercado de dichas empresas a la competitividad con las grandes empresas.

En otro orden de cosas, y teniendo en cuenta los datos y los resultados obtenidos en el ejemplo práctico que aquí se ha dado, se puede observar que las máquinas convencionales aquí utilizadas no se diferencian tanto del centro de mecanizado por control numérico empleado, teniendo en cuenta la capacidad para ciertas características.

Si se hubiera dispuesto de unas tolerancias para los engranajes, se podría realizar una comparación de capacidades, sin embargo, como los índices de capacidad son directamente proporcionales a los intervalos de tolerancia, no sería justo una comparación para intervalos de tolerancia de distinto orden. Claramente es mucho más sencillo lograr una capacidad suficiente para un intervalo de tolerancias amplio que para otro más estricto. Por ello es aconsejable realizar un cálculo de a partir de qué intervalos de tolerancia se tiene o se puede tener capacidad suficiente, ya que indicaría el orden de los intervalos de tolerancia de las distintas características.

Aparte de las conclusiones de este estudio, no se elimina la función principal de las máquinas herramienta tradicionales empleadas en el mismo, ya que su función principal es educativa.



## **Palabras Clave**

Capacidad, Calidad, PYME, Comparación, Fabricación, Precisión, Centrado de proceso, Variabilidad, Metodología, Torno, Fresadora, Engranaje, Centro de mecanizado, Proyector de perfiles, Máquina de medición por coordenadas.

# Estudio comparativo de capacidad entre piezas fabricadas con máquinas tradicionales y centro de mecanizado



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

Director:

***Dr. Manuel San Juan Blanco***

**Curso: 2012 - 2013**

Alumno:

***Borja García Hernando***

Proyecto fin de carrera presentado para la obtención del título de  
Ingeniero Técnico Industrial especializado en Mecánica.

Valladolid, mayo 2013

# Índice

1. Introducción .....	4
1.1. Objetivos .....	5
1.2. Descripción global del proyecto .....	6
2. El método de capacidad de los medios de fabricación .....	10
2.1. Definición de calidad .....	10
2.1.1. Definición de elemento defectuoso y aceptable .....	12
2.2. Capacidad .....	13
3. Metodología para la aplicación en un pequeño taller (PYME) .....	28
3.1. Recogida de datos y su tratamiento previo .....	28
3.2. Índices de la capacidad a emplear .....	29
3.3. Cálculo de la capacidad .....	33
3.4. Comprobación de los resultados .....	35
4. Aplicación .....	38
4.1.Descripción de las piezas de estudio .....	38
4.1.1. Engranaje .....	38
4.1.1.1. Planos del engranaje .....	40
4.1.1.2. Características del engranaje .....	41
4.1.1.3. Límites de especificación del engranaje .....	42
4.1.2. Pieza por control numérico .....	42
4.1.2.1. Planos de la pieza por control numérico .....	43
4.1.2.2. Límites de especificación de la pieza por control numérico .....	44
4.2.Descripción de las máquinas herramienta tradicionales .....	45
4.2.1. Torno .....	45
4.2.1.1. Herramientas del torno .....	51
4.2.2. Fresadora .....	54
4.2.2.1. Herramientas de la fresadora .....	60
4.3.Análisis de fabricación en máquinas herramienta .....	63
4.3.1. Análisis del proceso de fabricación en el torno .....	63
4.3.2. Análisis del proceso de fabricación en la fresadora .....	73
4.4.Descripción de las máquinas de medida .....	77
4.4.1. Descripción de la máquina de medida 3D .....	77
4.4.2. Descripción del proyector de perfiles .....	86
5. Resultados .....	94
5.1. Datos obtenidos .....	94
5.2. Cálculo de la capacidad .....	103
5.2.1. Cálculo de capacidad de las máquinas herramienta .....	105
5.2.2. Cálculo de capacidad del centro de mecanizado .....	126
5.3. Comparación de las capacidades de las máquinas herramienta y el centro de mecanizado .....	131
6. Conclusiones .....	140

7. Bibliografía .....146

Anexo I: Planos

## 1.- Introducción

La calidad en fabricación es un término muy importante que puede llegar a repercutir en los beneficios de una empresa, ya sea esta grande o pequeña.

Las grandes empresas disponen de métodos propios y externos para “medir” la calidad de sus productos y así, demostrar que sus productos cumplen con las normativas de calidad, poder etiquetar sus productos con una calidad determinada y no una peor o innecesaria, o simplemente poder afirmar al consumidor que sus productos son de calidad sin miedo a demandas por publicidad engañosa.

En este estudio se dará una definición para este término, así como para la *capacidad*, que es, a su vez, otro término estrechamente relacionado con la calidad de un producto.

Este estudio quiere dar una guía a los pequeños talleres de cómo obtener un indicador de la calidad de sus productos, dicho término es la anteriormente citada *capacidad*. La capacidad de una máquina o proceso respecto a la fabricación de una pieza ha sido poco utilizada como indicador de calidad de un proceso por falta de su entendimiento. Sin embargo en estas páginas se aclarará este término y se mostrarán las pautas para poder aplicarlo en pequeños talleres. Ya que las pequeñas y medianas empresas también pueden beneficiarse de estos métodos de control de la producción.

La capacidad de máquina está íntimamente ligada a las tolerancias dimensionales de una pieza, por lo que se puede ver a esta, como un indicador de las tolerancias que se puede alcanzar con una máquina a la hora de fabricar una pieza. Esta información es de vital importancia, ya que muestra los límites de fabricación de una máquina o proceso, por encima de los cuales, las piezas no tendrán calidad suficiente y serán rechazadas por los compradores. Es decir, que no se podrá fabricar, con calidad suficiente, piezas que tengan unas tolerancias más finas que las que nos indique la capacidad de máquina.

Como ejemplo de lo que se pretende explicar en este estudio, se podrá observar la diferencia existente entre las máquinas tradicionales y las máquinas por control numérico a la hora de producir piezas en serie y con una calidad adecuada, ambas series producidas en un pequeño taller.

Aunque se utilicen piezas diferentes, en este caso, una pieza de revolución y un engranaje; el concepto de capacidad permitirá abstraer y comparar los datos obtenidos. Esto indica que el concepto de capacidad se puede utilizar para cualquier pieza y máquina, lo cual es muy versátil.

## **1.1.- Objetivos**

Los objetivos de este proyecto fin de carrera son los siguientes:

Profundizar en el conocimiento de la metodología del estudio de capacidad de los sistemas productivos. Así como realizar una aclaración sobre el concepto de calidad de fabricación, y así observar lo íntimamente ligados que están estos dos conceptos.

Mostrar la metodología que se podría emplear en la aplicación de esta técnica en una PYME o en un pequeño taller. Mismamente, mostrar la adaptación de dicha metodología para que, dada una determinada capacidad, se obtengan los intervalos de tolerancia, a partir de los cuales, la calidad de los productos sea suficiente. Esto último se refiere a una característica concreta de la pieza terminada o no, es decir, que la capacidad se aplica a una única característica a la vez, sin embargo puede aplicarse tantas veces como se quiera en distintas características.

Validar la metodología aplicando su uso en el taller de la Escuela de Ingeniería Industrial de la sede de Francisco Mendizábal y de la sede de Paseo del Cauce. Comparando los resultados de máquinas convencionales y de Control numérico. También asignar, para cada característica estudiada, los intervalos de tolerancia límites para los cuales, a partir de ellos, las máquinas utilizadas en este estudio, dejan de tener una calidad suficiente de fabricación; y por ende, el rango de tolerancias admisibles para las máquinas empleadas; para validar la adaptación de la metodología obteniendo los intervalos de tolerancia límites dada una capacidad determinada.

Explicar el funcionamiento de las máquinas convencionales utilizadas en este estudio, así como de las máquinas de medida empleadas para la obtención de los datos a utilizar para la validación de la metodología, con el fin de otorgar un mejor entendimiento sobre la validación de la metodología.

Comprobar el estado de las máquinas convencionales del taller de la Escuela de Ingeniería Industrial de la sede de Francisco Mendizábal y de la sede de Paseo del Cauce mediante la misma aplicación de esta metodología, para así determinar si dichas máquinas tienen capacidad suficiente para una producción en serie o en pequeñas series; ya que en estos momentos únicamente, estas máquinas tradicionales y el centro de mecanizado, tienen función educativa y sería interesante determinar si pudieran utilizarse para producir pequeñas series de piezas, todo ello teniendo en cuenta sus restricciones de material mecanizable en el caso de las máquinas convencionales.

## **1.2.- Descripción global del proyecto**

Metodología del proyecto:

- a) Elección de la pieza y característica que se va a estudiar.
- b) Selección de las máquinas con las que obtener la pieza.
- c) Selección de los métodos de control que se van a emplear.
- d) Definición del ensayo y el tratamiento de los datos.
- e) Conclusión sobre la capacidad de las máquinas.

En este proyecto, para validar la metodología del estudio de la capacidad de máquina, se han elegido dos piezas distintas:

*Engranaje.*

*Pieza de revolución.*

Ambas piezas descritas en profundidad más adelante.

Para el engranaje se han elegido las siguientes características:

*Diámetro del alojamiento o agujero.*

*Diámetro exterior o diámetro de la circunferencia de cabeza.*



*Anchura del engranaje.*

*Perfil del diente de evolvente.*

Para la pieza de revolución se han elegido las siguientes características:

*Conicidad del tronco de cono.*

*Radio de curvatura de la muesca.*

Las máquinas seleccionadas para esta validación han sido las siguientes:

Para el engranaje:

*Torno Paralelo.*

*Fresadora universal.*

Para la pieza de revolución:

*Centro de mecanizado.*

Todas estas máquinas son descritas más adelante a excepción del centro de mecanizado.

Se ha seleccionado, como método de control, la medición de dichas características por medio de dos máquinas de medida distintas:

*Máquina de medida 3D.*

*Proyector de perfiles.*

Las características han sido medidas, a su vez, de distintas formas cada una, para poder hacer un control estadístico y minimizar los posibles errores de medida. Todo ello, se encuentra de forma más extensa y detallada en su capítulo correspondiente.

Se dará una explicación más extensa de las máquinas utilizadas, tanto las máquinas convencionales como las máquinas de medida, así como de los procesos que se pueden realizar con cada máquina de forma breve. Sin embargo los procesos empleados tendrán una explicación más extensa, todo ello para una mejor comprensión de la descripción del proceso de fabricación y un mejor entendimiento del funcionamiento de las máquinas de medida.

El tratamiento de los datos obtenidos se expone de forma genérica en su apartado correspondiente de este proyecto, así como para cada una de las características seleccionadas para la validación de la metodología, en otro punto.

Finalmente, en este proyecto, y a través de los datos obtenidos, se llega a las conclusiones de la aplicación de esta metodología en un pequeño taller o en una PYME; sin perder de vista las conclusiones de la validación de la metodología aquí expuesta.



## ***2.- El método de capacidad de los medios de fabricación***

En la industria un concepto clave es la calidad. La calidad de un producto, ya sea intermedio o final, es de vital importancia para la fabricación de dicho producto. Generalmente, dicha calidad, viene exigida por el cliente o, como mínimo, impuesta por la normativa vigente relativa al producto a fabricar o montar.

Para despejar cualquier duda sobre este concepto, se procede a definir la calidad de un producto.

### **2.1.- Definición de calidad**

La **calidad** de un producto (por extensión, proceso o servicio) está constituida por el conjunto de propiedades y características del mismo, que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades establecidas o implícitas. También puede definirse la calidad como la idoneidad o utilidad del producto respecto a la aplicación para la que ha sido previsto.

**Calidad de proyecto o de diseño** es la medida en que las características establecidas en el mismo logran que el producto diseñado proporcione esa utilidad.

**Calidad de fabricación o de concordancia** es la medida en que el producto real fabricado satisface las especificaciones del proyecto.

La **calidad deseada por el cliente** queda definida por lo que está dispuesto a pagar en función de lo que obtiene y valora, o en la medida que satisface sus necesidades y expectativas. Por ello, la calidad de un mismo producto resulta valorada de distinta manera por distintos clientes, y en consecuencia, en la etapa de diseño hay que tener claro a qué segmento del mercado va dirigido el producto.

Conviene hacer todos los esfuerzos posibles para que las tres calidades (Fig. 2.1.) mencionadas coincidan, de forma que la calidad de diseño coincida con la que desea el cliente y, a su vez, sea la que se logre en el proceso de fabricación.

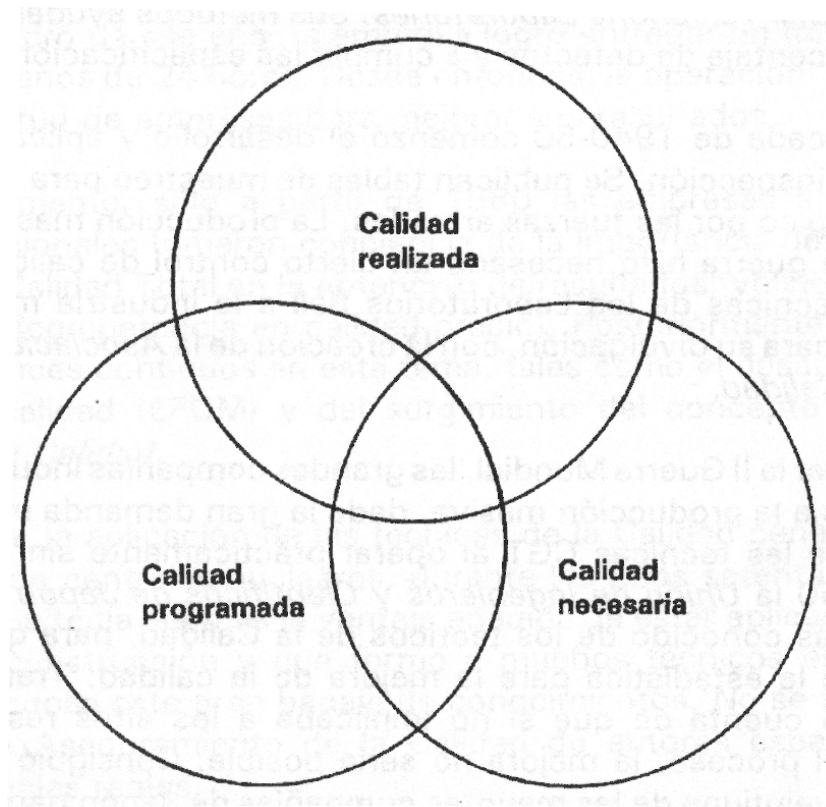


Fig. 2.1. Las tres calidades.

El **nivel de calidad aceptable (NCA)** es el grado que deben alcanzar las características definitorias del producto para que se considere aceptable. Este NCA se fija ya al proyectar el producto. Suele concretarse estableciendo el máximo porcentaje de elementos defectuosos que se está dispuesto a admitir en cada lote.

Se denomina **control de calidad** a la metodología que suministra la información sobre la calidad, ya sea esta de proyecto o de fabricación. En el caso del control de calidad de concordancia de los productos, se concreta en su inspección y en la comprobación de cómo responden a las especificaciones establecidas en el proyecto, de manera que puedan tomarse decisiones respecto de los mismos (rechazo o aceptación), según que su nivel de calidad sea, respectivamente, inferior o igual/superior al NCA prefijado.

A estas alturas parece necesario definir también los conceptos de elemento o pieza defectuoso/a y aceptable.

### 2.1.1.- Definición de elemento defectuoso y aceptable

Por todos es sabido que las máquinas tienen una alta repetitividad y que están pensadas para agilizar la producción en serie. Ahora bien, por mucho que el empresario quiera creer, las máquinas no son perfectas y cada pieza fabricada tendrá una desviación o error respecto de la medida que se quiere alcanzar. Esto mismo puede aplicarse al trabajador, al cual, por mucha pericia y destreza que tenga, le será prácticamente imposible fabricar dos piezas completamente iguales.

La calidad de los productos nos permite un margen de error, unos límites aceptables, dentro de los cuales el producto sigue estando bajo la conformidad del cliente y el diseño, o lo que es lo mismo, seguirá cumpliendo su función de forma satisfactoria.

Para definir estos límites de conformidad se utilizan las **tolerancias**.

El término “tolerancias” es un término muy amplio que indican las variaciones que pueden ser admitidas para una determinada magnitud, pudiendo ser ésta dimensional, de composición o de características mecánicas.

Por lo que se puede decir que todo producto o característica que se encuentre dentro de los límites especificados, o tolerancias, será considerado **aceptable**.

Por el contrario, si un producto o característica se encuentra fuera del rango de conformidad será considerado **defectuoso**, al no satisfacer las características de diseño o las deseadas por el cliente.

Se puede apreciar, de forma esquemática, la diferencia entre elemento defectuoso y elemento aceptable en función de las tolerancias en la figura 2.2.



Fig.2.2. Elementos aceptables y defectuosos.

## 2.2.- Capacidad

Un concepto poco conocido y realmente útil en el control de la calidad es la capacidad.

La capacidad es un indicador que muestra si un lote de productos o una característica en concreto se encuentran dentro, o no, de un NCA prefijado, es decir, si se dispone de la precisión suficiente para fabricar las piezas a estudiar. Existen otros indicadores que señalan lo mismo, por lo que no tendría que elegirse este método en lugar de cualquier otro más conocido, si no fuera porque la capacidad no simplemente nos indica si la calidad de los productos, las piezas o las características, están dentro del NCA; si no que también nos indica si el proceso de fabricación está o no descentrado y en qué dirección.

Llegados a este punto se necesita aclarar ciertos conceptos.

**Precisión de un proceso de fabricación:** Toda máquina o proceso tiene una fluctuación en torno a un punto a la hora de mecanizar o fabricar. Esa fluctuación tiene unos límites, tanto a un lado como a otro, que pueden ser medidos. A estos límites naturales se les llama precisión de máquina o proceso dependiendo lo que se esté midiendo. Un proceso o máquina será más preciso cuanta menos diferencia exista entre sus límites, es decir, que tenga una fluctuación pequeña.

**Proceso centrado o descentrado:** Independientemente de la precisión del proceso, el mismo centro de fluctuación del proceso puede no coincidir con la

característica nominal que se quiere obtener con dicho proceso. El centro de fluctuación puede estar por encima o por debajo del punto de diseño.

Estas imágenes esperan aclarar estos dos conceptos.

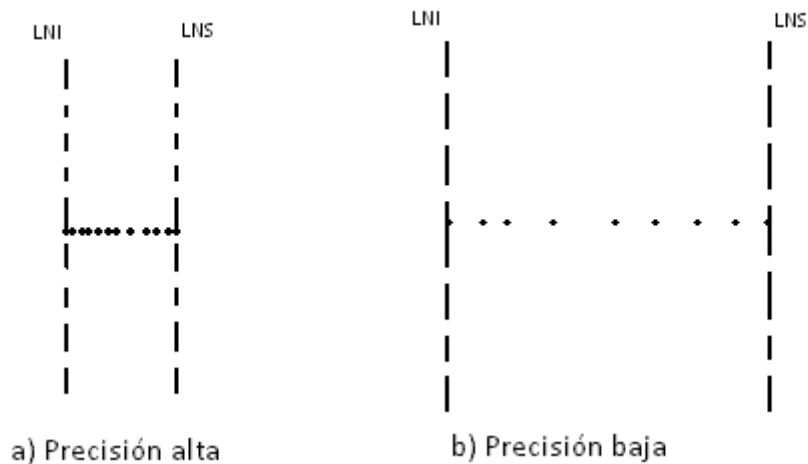


Fig. 2.3. Diferencia entre precisiones.

En la Fig. 2.3., se puede observar la diferencia entre un proceso con una precisión alta a) y un proceso con una precisión baja b). En el proceso de alta precisión se puede observar que los límites naturales del proceso, límite natural superior (LNS) y límite natural inferior (LNI), se encuentran próximos entre sí y que los puntos medidos se encuentran dentro de los límites, puesto que ellos mismos determinan donde se encuentran los límites. En el proceso de baja precisión se puede observar como los límites naturales se encuentran alejados entre sí, esto se debe a la dispersión de los puntos observados. Como se puede observar, no se representa la posición de la característica nominal que se desea alcanzar, ya que la precisión es independiente de ella.

En la Fig. 2.4., se puede apreciar la diferencia entre un proceso centrado a) y otro descentrado b). En el proceso centrado se puede observar que el centro de fluctuación natural de la máquina concuerda con la cota nominal de diseño, por lo que las piezas resultantes de este proceso tienen una alta probabilidad de estar dentro de los límites de aceptación de diseño. En el caso del proceso descentrado se puede observar que el centro de fluctuación natural del proceso no concuerda con la cota nominal de diseño. Esto crea una dispersión que no está centrada en el punto de diseño y puede dar lugar a piezas defectuosas. La solución a un proceso descentrado, si se estima conveniente modificarlo, es una simple calibración del proceso en sentido inverso de la desviación del centro de fluctuación natural respecto a la cota de diseño.



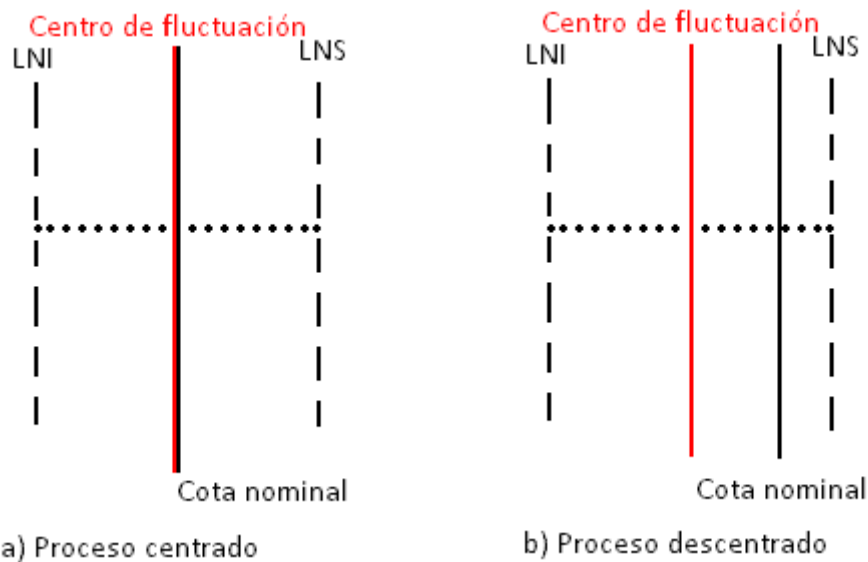


Fig. 2.4. Diferencia de proceso centrado y proceso descentrado

Los dos conceptos que se acaban de aclarar son independientes entre sí, por lo que puede darse el caso de una combinación de los mismos de cualquiera de sus formas.

Los límites naturales de dispersión de las máquinas se pueden conocer mediante un control por muestreo de forma estadística o con un muestreo del 100% de los elementos producidos. Los límites de tolerancia vienen dados por el diseño del producto, e indican hasta donde un producto se considera aceptable. De forma ideal, estos límites, naturales y de tolerancia, coincidirían respectivamente, de forma que se tendría la máquina ideal para el proceso, pues dicha máquina tendría la precisión suficiente para abarcar la tarea encomendada y el proceso estaría bajo control al estar centrado, por lo que no se obtendría ninguna pieza o producto defectuoso. Sin embargo, lo más común es tener una máquina con una precisión más que suficiente con un proceso controlado; esto da como resultado un desperdicio de la precisión de la máquina en cuestión.

Desperdiciar precisión de máquina no es aconsejable en ningún sentido, ya que realmente se tendría una calidad mayor en las piezas producidas que la que se ha pactado o se quiere alcanzar. Un producto de una calidad superior puede ser vendido a un precio mayor, lo que indica que una calidad excesiva en los productos equivaldría a una pérdida de dinero a la empresa que los fabrica. Por eso es tan importante tener calidad suficiente para un proceso, pero no excesiva.

Aunque se tenga en un proceso precisión suficiente, eso no garantiza que ninguna de las piezas o productos salgan defectuosos, ya que si el proceso está descentrado, se obtendrán piezas defectuosas.

Si no se tuviera precisión suficiente para un proceso, lo ideal sería que el proceso estuviera centrado para minimizar el número de piezas defectuosas, esto, junto con un muestreo de control más riguroso para desechar las piezas defectuosas, podría completar un pedido concreto o no parar la producción mientras se cambia de máquina a una con precisión suficiente.

Una vez aclarados estos dos conceptos podemos dar una definición de la capacidad.

*Según la norma UNE – ISO/TR 10017 El análisis de la capacidad de proceso es el examen de la variabilidad y distribución inherente de un proceso, con el fin de estimar su habilidad para producir resultados que sean conformes con el rango de variación permitido por las especificaciones.*

La capacidad es un dato impuesto directamente por el cliente para garantizar la conformidad de una característica del producto.

A su vez la variabilidad es un dato que puede usar el proveedor o fabricante con fin de determinar objetivamente si se puede satisfacer una demanda en vista de lo que se conoce de las fabricaciones anteriores.

En general, los procesos industriales comprenden una combinación de materiales, máquinas y operarios. Las funciones de cada uno de estos elementos pueden variar de lo simple a lo complejo. Sin embargo, cada uno de ellos tiene una variabilidad inherente o natural, cuyas causas no pueden aislarse, más una variabilidad no natural que puede aislarse y, por ejemplo, controlarse hasta un cierto valor económico mínimo e irreducible.

En primer lugar, el material presentará alguna variabilidad de una pieza a otra. Unas piezas son más duras que otras o tienen más porosidad; también variarán en sus dimensiones. Las causas de la variación del material pueden ser muchas

(materiales adquiridos inadecuadamente o de calidad insegura, especificaciones ambiguas del material, necesidad urgente de materiales sin tener en cuenta la calidad, logro del precio de compra más bajo en lugar de buscar un coste mínimo una vez puesto el material en fábrica, o cualquiera otra de las muchas posibles causas).

La segunda fuente de variación es la máquina. Todo proceso industrial de precisión o no, posee un cierto intervalo de fluctuación, como ya se ha comentado en la definición de precisión.

La tercera fuente de variación, el operario, es la más influyente de todas. Sus decisiones y acciones afectan directamente a la importancia de la variabilidad, así como a las otras causas (materiales y máquinas).

La capacidad y la variabilidad sirven para:

- Definir el riesgo de no conformidad del producto.
- Definir la frecuencia de muestreo o el tamaño de la muestra.
- Definir las cifras productivas: predecir los riesgos para la aplicación de las especificaciones productivas y por lo tanto un mejor conocimiento de los costos.
- Definir la precisión de la máquina o el intervalo de reglaje.
- Permitir la recuperación de información en la oficina de estudios o métodos para definir objetivamente tolerancias. Por lo que se crea una retroalimentación de información entre el diseño y la producción a través de la capacidad y la variabilidad.

A continuación se muestran cuatro ejemplos distintos:

La variabilidad se muestra mediante una curva (función de distribución) y las tolerancias por dos líneas:  $T_i$  para la tolerancia inferior y  $T_s$  para la tolerancia superior

1° Ejemplo: La población total generada (definida por la curva de la variabilidad) entra de forma ajustada en el intervalo de tolerancia IT (Fig. 2.5.). Esto significa que prácticamente no es necesario ningún ajuste en el proceso. Se puede decir que el proceso tiene capacidad justa.

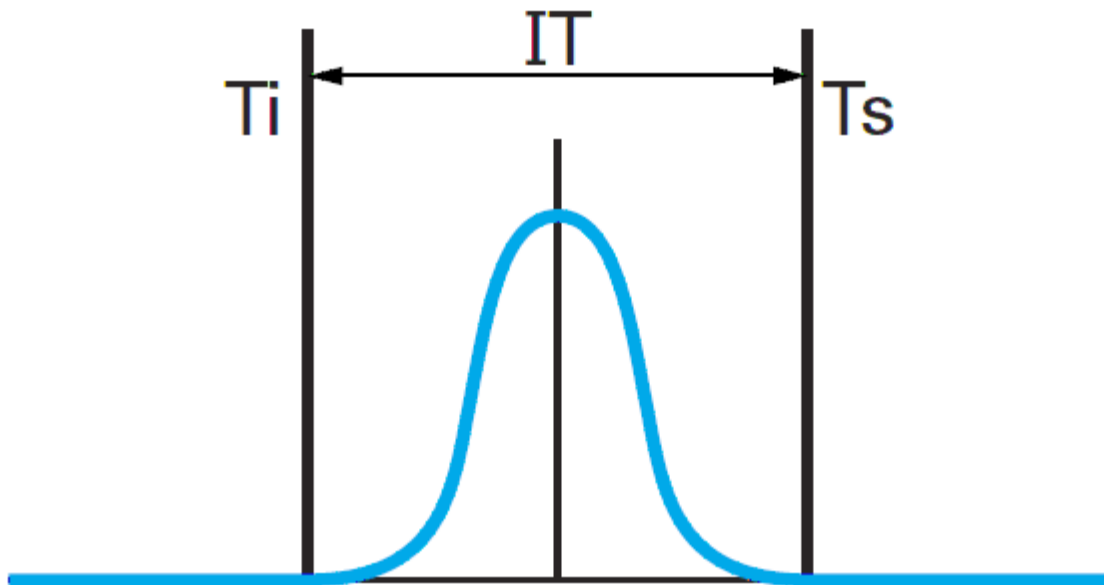


Fig. 2.5. Capacidad justa.

2° Ejemplo: La población total generada (definida por la curva de la variabilidad) no se encuentra dentro del rango de tolerancia (Fig. 2.6.). Existen, por lo tanto, piezas defectuosas o a retocar. Establecer el centro de la tolerancia permite únicamente limitar las pérdidas o piezas defectuosas. En este caso se considera que el proceso no tiene capacidad suficiente o que el proceso tiene capacidad insuficiente.

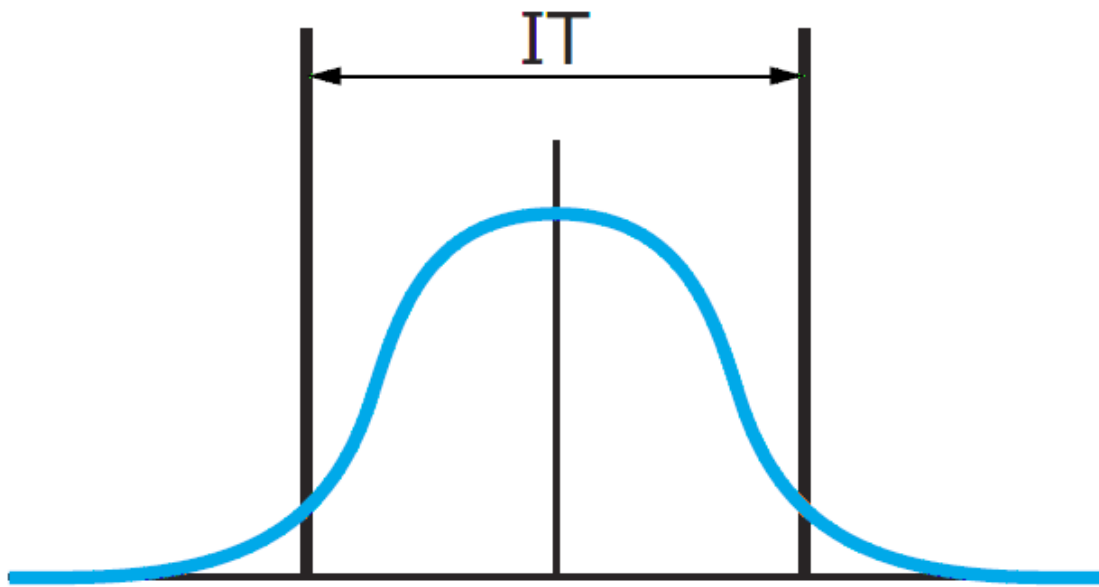


Fig. 2.6. Capacidad insuficiente.

3° Ejemplo: La población total producida (representada por la curva de la variabilidad) se encuentra dentro de los límites de tolerancia (Fig. 2.7.). Es posible realizar un ajuste en el reglaje sin producir piezas defectuosas. Una desviación en el proceso también será admisible. En este caso se puede decir que el proceso tiene capacidad suficiente.

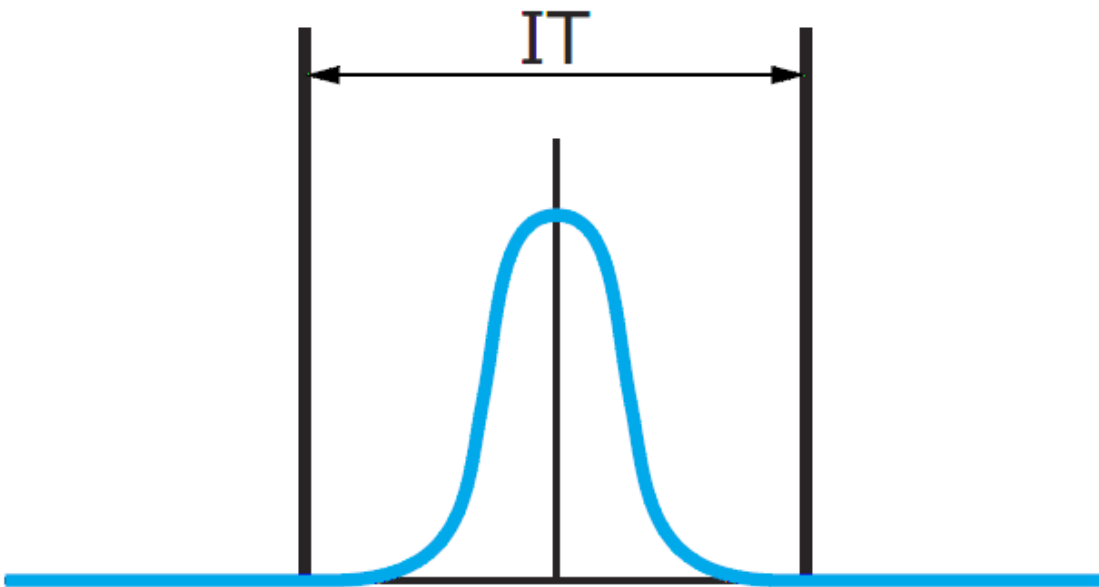


Fig. 2.7. Capacidad suficiente.

4° Ejemplo: La población total generada no se encuentra dentro de los límites de tolerancia, pero podría estarlo si se realiza un ajuste al proceso (Fig. 2.8.). En este caso el proceso no tiene capacidad suficiente pero podría tenerla mediante un ajuste.

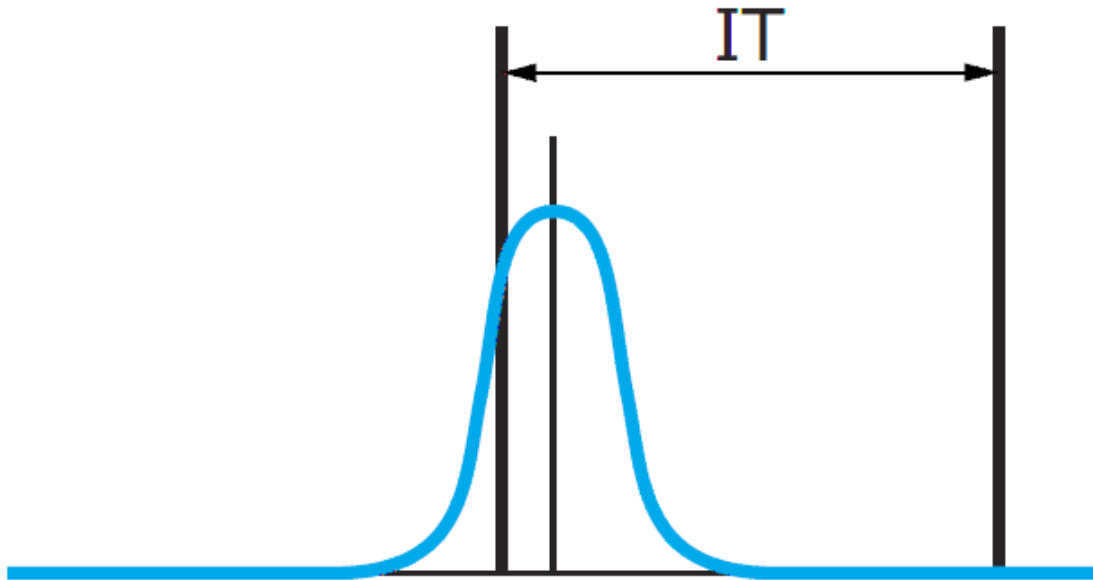


Fig. 2.8. Capacidad insuficiente, pero suficiente si se realiza un ajuste.

### ***Los indicadores de la capacidad***

Los indicadores de la capacidad (indicadores de aptitud de la media en los procesos) permiten asegurar que la media de los procesos, dada su variabilidad, son capaces de respetar las exigencias en materia de calidad.

En principio, independientemente del tipo de distribución estadística, la dispersión de la característica medida se establece de modo que el 99.37% de los valores están dentro del rango, que corresponde al intervalo de  $m \pm 3 \cdot \sigma$  en el caso de una distribución normal.

Para los distintos tipos de actividades o procesos se utilizan distintos indicadores.

**El indicador de capacidad simple (Cap, Pp)** (Fig. 2.9.) permite saber si un proceso podría, “a través de un reglaje” tener capacidad suficiente.

En el caso de la distribución normal:  $IT/6 \cdot \sigma$ .

El indicador de capacidad “simple” se obtiene considerando que la media se encuentra en la medida nominal (ajuste óptimo). Se tendrá capacidad suficiente si se cumple lo siguiente:  $IT / \text{dispersión} > 1$ .

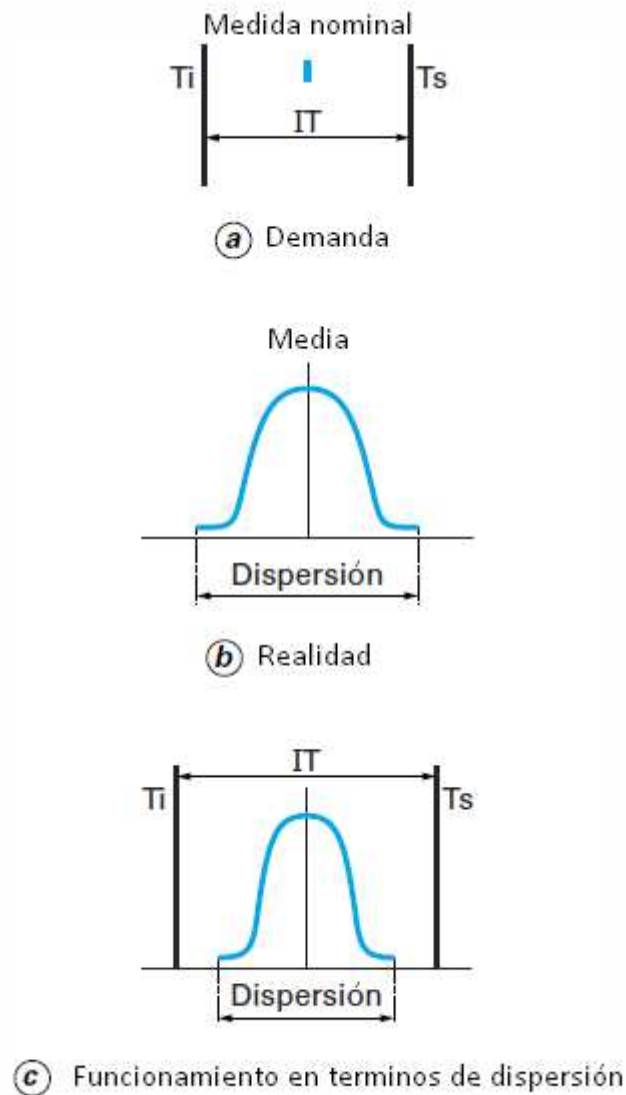


Fig. 2.9. Indicador de la capacidad simple.

**El indicador de la capacidad centrada (Cpk, Ppk)** (Fig. 2.10.) permite saber si se tiene capacidad suficiente.

En el caso de la distribución normal: mínimo de  $(T_s - \text{media}) / 3 \cdot \sigma$  y  $(\text{media} - T_i) / 3 \cdot \sigma$ .

El indicador de la capacidad centrada se obtiene teniendo en cuenta tanto la dispersión como si el proceso está centrado o no. Para tener capacidad suficiente se considera, por ejemplo, la proporción:  $(T_s - \text{media}) / \text{dispersión derecha} > 1$

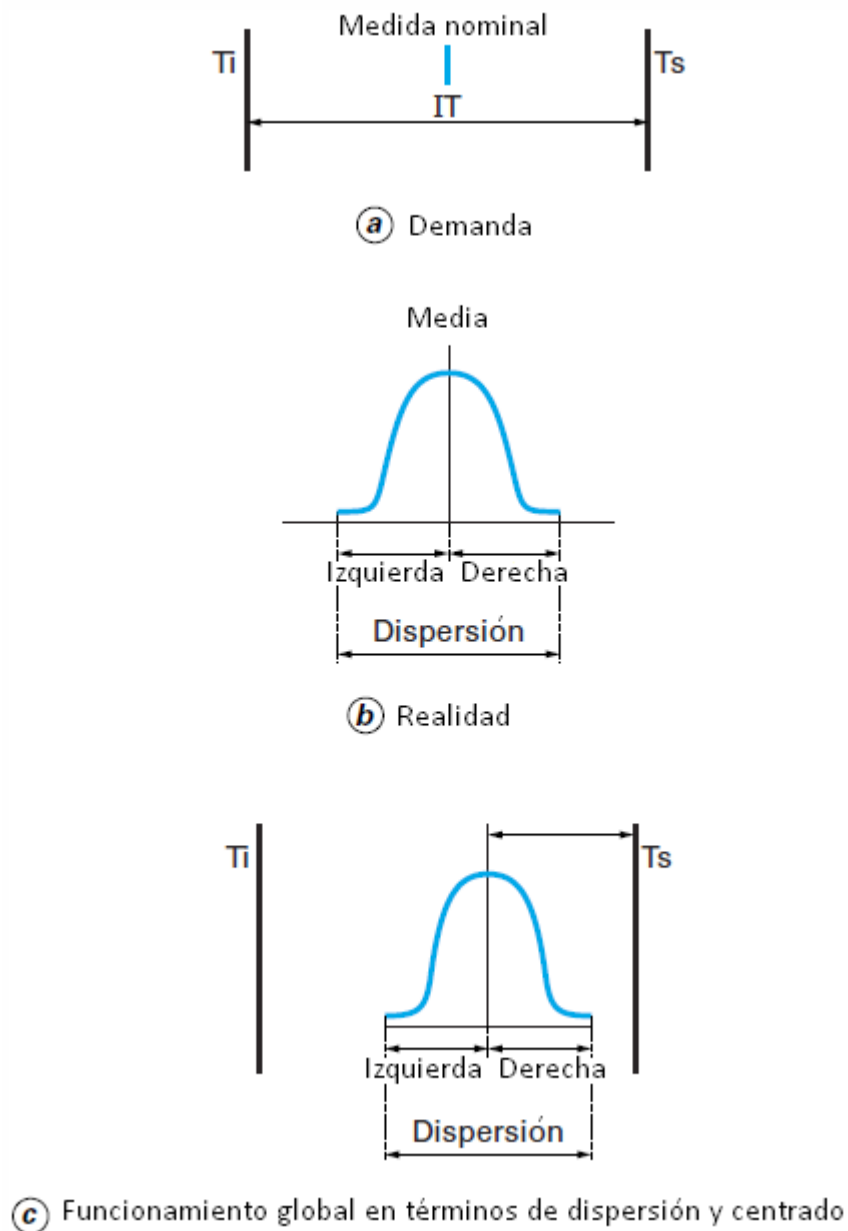


Fig. 2.10. Indicador de la capacidad centrada.

**El indicador de la pérdida de capacidad debido a desajustes (Cpm)** permite saber si existe capacidad suficiente, y limitar el margen de ajuste para optimizar



la capacidad. El Cpm es un indicador que tiene en cuenta tanto la dispersión como si el proceso está centrado o no. Este indicador muestra el estado de todo el proceso.

En el caso de la distribución normal:

$$\frac{IT}{6 \times \sqrt{\sigma^2 + (\text{media} - \text{medida nominal})^2}} \text{ o } C_{pm} = \frac{Cap}{\sqrt{1 + 9 \times (Cap - C_{pk})^2}}$$

Si la media coincide con la medida nominal, el reglaje y la capacidad son óptimos.

Si la media se encuentra a una desviación típica de distancia de la medida nominal, el impacto en las piezas defectuosas se notará de inmediato.

El Cpm y el Cpk informan del aspecto del centrado del proceso y de la dispersión del mismo (Fig. 2.11.), pero:

- El Cpm indica la distancia entre la medida nominal y el centrado.
- El Cpk indica el centrado de la tolerancia relativa.

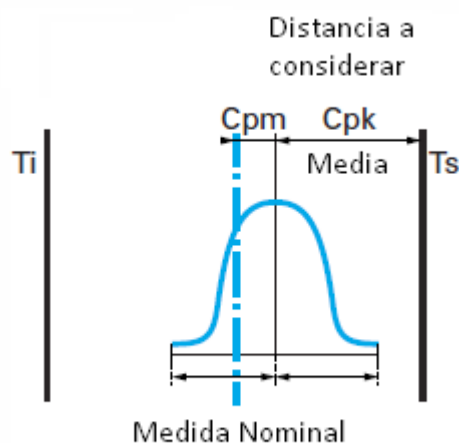


Fig. 2.11. Cpm y Cpk: Distancia a tener en

**El indicador de la capacidad de máquina** es el informe sobre el intervalo de tolerancia a lo largo de la distribución intrínseca. Este indicador ( $C_m$ ,  $C_{am}$ ) permite medir si potencialmente la media es apta para la realización de la característica para la cual estamos realizando el estudio. La capacidad de máquina tiene en cuenta esencialmente la distribución instantánea.

$$C_m = \frac{\text{Intervalo de tolerancia}}{\text{Dispersión instantánea (de la máquina)}} \text{ (a corto plazo)}$$

La aptitud de una máquina o un proceso para fabricar los productos conformemente, es decir, para mantener la tolerancia requerida, depende del intervalo de tolerancia y del rendimiento real.

Para el caso de una distribución que sigue una ley normal, se toma como dispersión global:  $6 \cdot \sigma$ .

En cuanto al proceso, es necesario verificar si está centrado en relación con los límites acordados. Para esto se utiliza el indicador  $C_{mk}$ .

$$C_{mk-} = \frac{\text{media} - \text{tolerancia inferior}}{\text{Media dispersión instantánea (de la máquina)}} \text{ (a corto plazo)}$$

$$C_{mk+} = \frac{\text{tolerancia superior} - \text{media}}{\text{Media dispersión instantánea (de la máquina)}} \text{ (a corto plazo)}$$

Como se puede observar, los indicadores  $C_{mk}$  son muy parecidos a los indicadores  $C_{pk}$ .

Para el caso de diseño de utillajes, si realizar un reglaje no es posible, se debe formular una exigencia para el  $C_m$  y para el  $C_{mk}$ , de lo contrario, el nivel de dispersión puede ser bueno y aceptable, pero totalmente descentrado con respecto a la tolerancia.

Un  $C_m$  incorrecto no significa que la máquina no esté adaptada: esto puede ser porque la gama de fabricación esté por revisar. Este indicador se usa a menudo para el caso de pre-estudios. Por ello en este estudio no se va a utilizar este indicador.

A continuación se muestran varios ejemplos gráficos de las distintas interacciones entre el indicador  $C_{ap}$  y el indicador  $C_{pk}$  (Fig. 2.12.).

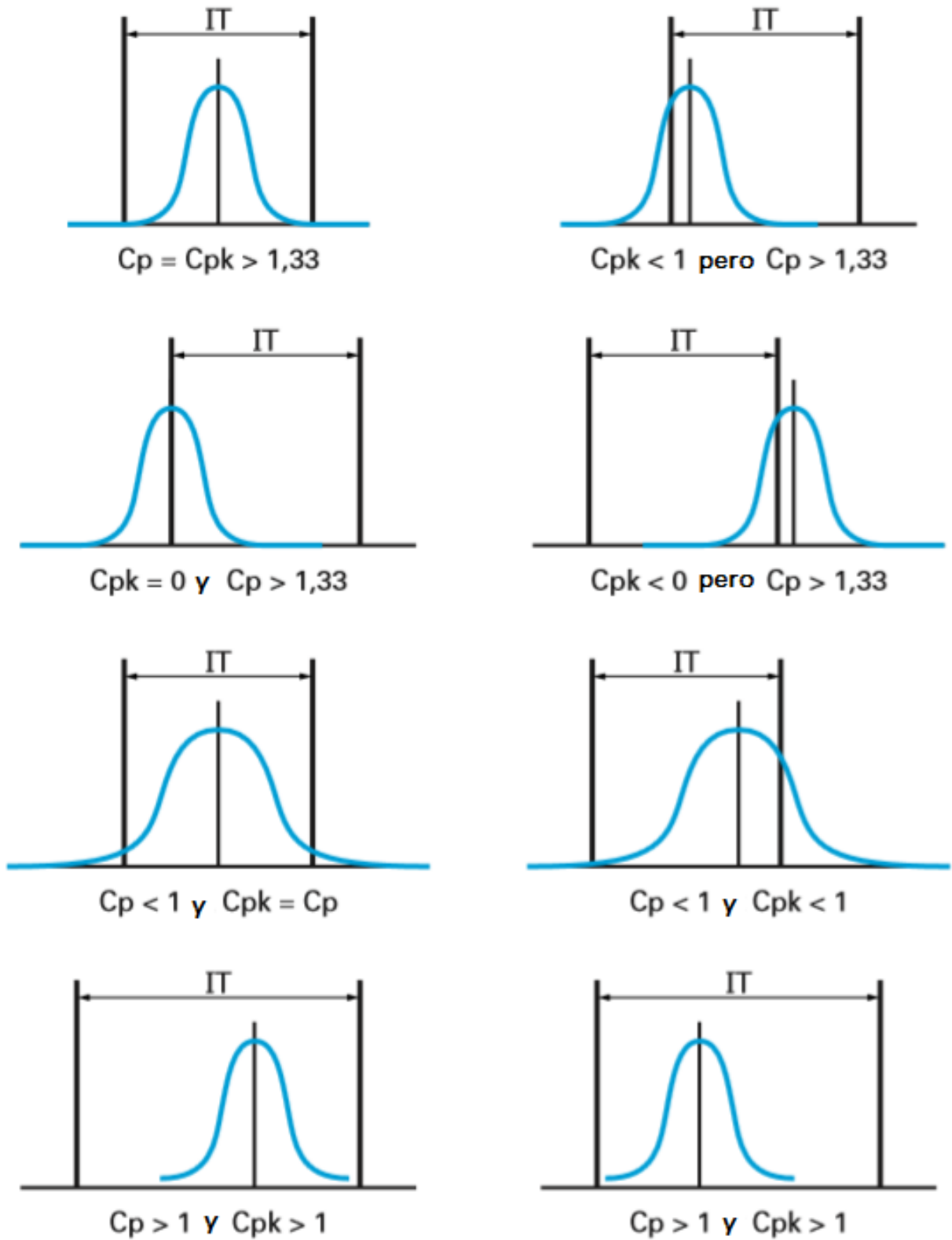


Fig. 2.12. Interacción entre  $C_p$  y  $C_{pk}$ .



### **3.- Metodología para la aplicación en un pequeño taller (PYME)**

En el capítulo anterior se han explicado los conceptos teóricos necesarios para la creación de una metodología de aplicación de la capacidad como herramienta para el control de calidad.

En este apartado se pretende exponer una posible metodología para la utilización de la capacidad con el fin de mantener un control de las piezas fabricadas en un pequeño taller.

#### **3.1.- Recogida de datos y su tratamiento previo**

En primer lugar se recopilan los datos necesarios para el estudio, para ello se deben utilizar los medios que la empresa vea necesarios, siempre teniendo en cuenta que a mayor precisión de medida mayor fiabilidad de los resultados obtenidos y mayor coste de medición, ya sea por las máquinas de medida empleadas, por la formación necesarias para utilizarlas correctamente o el coste de mantenimiento de dichas máquinas de medida. En la mayoría de las ocasiones se pacta con el cliente la precisión de los controles de calidad sin abandonar nunca las normativas competentes al respecto, en otros casos se adopta la normativa vigente al respecto.

Una vez que se han obtenido los datos, es aconsejable presentarlos en forma de tabla para su posterior tratamiento de forma estadística.

Se ha de calcular la media de la muestra, así como la desviación tipo o estándar de la misma para su utilización en el cálculo de la capacidad. En el caso de un estudio simple, en el cual solamente se desee conocer si el proceso o la máquina pueden tener capacidad suficiente para la fabricación de un producto futuro no es necesario el empleo de la media de la muestra, como se verá más adelante.

La media de la muestra cumple la siguiente ecuación:

$$m = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{N}$$

Donde  $m$  es la media aritmética de la muestra,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son los datos individuales y  $N$  es el número de datos que tiene la muestra.

La desviación tipo o estándar cumple la fórmula siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + \dots + X_n^2}{N} - m^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{X_i^2}{N} - m^2}$$

Donde  $\sigma$  es la desviación tipo o estándar,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  son los datos individuales,  $N$  es el número de datos que tiene la muestra y  $m$  es la media de la muestra.

### 3.2.- Índices de la capacidad a emplear

En segundo lugar se deben de tener en cuenta los índices que se van a utilizar. Estos dependen de la información de control que se quiera obtener; ya que, como se ha visto en el capítulo anterior, los distintos indicadores dan informaciones diferentes.

Si se quiere, simplemente, conocer si una máquina o proceso podría tener capacidad suficiente para la realización de una pieza futura a partir de una pequeña pre-serie, basta con utilizar el **índice de capacidad simple**; el cual, como se ha mostrado en el apartado 2.2., sigue la siguiente fórmula:

$$Cap = Cp = \frac{\text{intervalo de tolerancia}}{\text{dispersión global del proceso}} = \frac{IT}{6\sigma}$$

Este indicador debe cumplir la siguiente relación para que el proceso tenga capacidad suficiente:

$$Cap > 1$$

Dependiendo de la calidad del proceso y de la calidad exigida por el cliente, puede que esta relación sea insuficiente, lo que obliga a imponer un coeficiente de seguridad, bien por el cliente, bien por la empresa; lo que modifica la relación de la siguiente forma:

$$Cap > 1.33$$

Esta relación asegura prácticamente que el proceso o la máquina pueden tener capacidad suficiente.

Sin embargo, es muy posible que este indicador por sí solo no sea suficiente para un control de la calidad del proceso, ya que si el proceso en cuestión se encuentra con un reglaje inadecuado, aunque la máquina empleada o el proceso utilizado pueda tener capacidad suficiente, muy seguramente las piezas o productos resultantes no tengan la calidad deseada y resulten en piezas o productos defectuosos.

En este caso se debe emplear el **indicador de la capacidad centrada** en conjunto con el indicador de capacidad simple. De esta forma se puede comprobar que el proceso tiene realmente capacidad suficiente, y en caso negativo, si la falta de capacidad es debida a una precisión insuficiente, simplemente a un mal reglaje o una combinación de ambas. Esto último es de vital importancia en un pequeño taller (al igual que en los talleres más grandes) ya que, si la falta de capacidad es debida a una precisión insuficiente, las medidas a emplear van desde un control de calidad más exhaustivo de los productos obtenidos por el proceso estudiado, pasando por un control de calidad pieza a pieza o en caso de no existir otra solución la compra de maquinaria nueva más precisa o la remodelación del proceso en sí. Sin embargo, si el problema de capacidad insuficiente es debido a un mal reglaje, basta con realizar un reglaje correcto a la máquina o proceso y mantener un pequeño control del mismo a posteriori para cerciorar que el proceso no se descentra rápidamente. Por otro lado, si se da una combinación de capacidad insuficiente y un proceso descentrado, lo primero que debe hacerse es una calibración de la máquina o proceso para minimizar las pérdidas, y comprobar que la proporción de piezas defectuosas sea lo suficientemente pequeña como para no sobrepasar el NCA; de esta forma se habría reducido el problema al primer caso.



El indicador de la capacidad centrada como se vio en el apartado 2.2., cumple las siguientes fórmulas:

$$C_{pk-} = \frac{\text{media} - \text{tolerancia inferior}}{3\sigma}$$
$$C_{pk+} = \frac{\text{tolerancia superior} - \text{media}}{3\sigma}$$

Cada una de las fórmulas indica la desviación del proceso en dirección al límite de tolerancia inferior y superior respectivamente, así como la capacidad en esa dirección. Con este indicador se puede conocer hacia donde está desviado el proceso y cuanto y, en consecuencia, realizar una corrección del mismo.

De los dos términos se elige el menor, ya que está indicando que en esa dirección la máquina tiene menor capacidad, y por tanto que el proceso se encuentra desviado en esa dirección. Una vez que se ha elegido el término pasa a ser  $C_{pk}$  independientemente de que dirección indica.

Para que un proceso tenga capacidad suficiente se tiene que cumplir la siguiente relación:

$$C_{pk} > 1$$

Con este indicador también es posible utilizar un coeficiente de seguridad, lo que modificaría la relación de capacidad suficiente de la siguiente forma:

$$C_{pk} > 1.33$$

Un proceso ideal debería cumplir la siguiente relación:

$$C_{pk} = C_{ap}$$

Dependiendo de la rigurosidad del estudio a realizar, estos dos indicadores pueden ser, o no, suficientes. Si la empresa lo considera oportuno, puede utilizar los indicadores anteriores en conjunto con el **indicador de la pérdida de capacidad debido a desajustes**, que como se ha visto en el apartado 2.2., contempla todo el proceso, tanto la dispersión como el centrado, para limitar el ajuste a realizar al proceso en pos de optimizar la capacidad del mismo.

Este indicador sigue la siguiente fórmula:

$$\frac{IT}{6 \times \sqrt{\sigma^2 + (\text{media} - \text{medida nominal})^2}} \text{ o } Cpm = \frac{Cap}{\sqrt{1 + 9 \times (Cap - Cpk)^2}}$$

Este indicador requiere de un mayor tiempo en operaciones, pero otorga una información más precisa y en un único indicador. Es posible que la empresa considere que necesita esta información si realiza grandes series de productos con controles regulares para una visualización de la información más directa.

Al igual que en el resto de indicadores, una capacidad del proceso suficiente viene indicada por la siguiente relación:

$$Cpm > 1$$

Y, cómo no, este indicador también es susceptible de ser afectado por coeficientes de seguridad, lo que lo modificaría de la siguiente forma:

$$Cpm > 1.33$$

Existen otros indicadores como el indicador de capacidad de máquina y los indicadores de capacidad de máquina centrada que siguen las mismas fórmulas que sus homónimas y que dan la misma información, con el único distintivo de referirse exclusivamente a una máquina en particular, en vez de a un proceso.

Una vez que se ha elegido que indicadores se van a utilizar para el estudio de capacidad se procede a calcular la capacidad en sí.

### 3.3.- Cálculo de la capacidad

En este apartado se utilizan las fórmulas a priori elegidas para calcular la capacidad del proceso o máquina.

Es posible que lo que quiera conocer la empresa o el cliente sean los límites de tolerancia, a partir de los cuales, la máquina o proceso deja de tener capacidad suficiente. Lo cual es muy útil a la hora de aceptar un pedido que se sale de lo normal para la empresa, ya que se podrá saber de antemano si es necesario, o no, adquirir nuevas máquinas más precisas o modificar el proceso en cuestión.

Para este cometido se utilizará las fórmulas previamente descritas en los apartados 2.2. y 3.2., lo que, para un análisis simple, por ejemplo, podría expresarse de la siguiente forma:

Como se ha visto:

$$Cap = Cp = \frac{\text{intervalo de tolerancia}}{\text{dispersión global del proceso}} = \frac{IT}{6\sigma}$$

Y para que se pueda tener capacidad suficiente se debe cumplir:

$$Cap > 1$$

Lo que operando da lo siguiente:

$$Cap > 1 \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma$$

Si se cumple esta relación se puede tener capacidad suficiente.

A continuación se desarrollan los métodos de cálculo para los indicadores necesarios.

**Indicador de capacidad simple:** Se acaba de mostrar como quedaría la relación para que se pueda tener capacidad suficiente en el caso de que no se aplique coeficiente de seguridad. En el caso de que sí se aplicara dicho coeficiente se tendría lo siguiente:

$$Cap > 1.33 \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 7.98\sigma$$

**Indicador de la capacidad centrada:** Para este indicador se tienen las siguientes fórmulas explicadas en los apartados 2.2. y 3.2.:

$$Cpk_{-} = \frac{\text{media} - \text{tolerancia inferior}}{3\sigma}$$

$$Cpk_{+} = \frac{\text{tolerancia superior} - \text{media}}{3\sigma}$$

Como ya se conoce, la relación para que exista capacidad suficiente es la que sigue:

$$Cpk > 1$$

Lo que operando deja lo siguiente:

$$Cpk- > 1 \rightarrow \frac{m - Ti}{3\sigma} > 1 \rightarrow m - Ti > 3\sigma \rightarrow \mathbf{Ti} < m - 3\sigma$$

$$Cpk+ > 1 \rightarrow \frac{Ts - m}{3\sigma} > 1 \rightarrow Ts - m > 3\sigma \rightarrow \mathbf{Ts} > m + 3\sigma$$

Si se desea o se exige, en este caso también se puede aplicar coeficiente de seguridad lo que modificaría estas relaciones de la forma siguiente:

$$Cpk > 1.33$$

$$Cpk- > 1.33 \rightarrow \frac{m - Ti}{3\sigma} > 1.33 \rightarrow m - Ti > 3.99\sigma \rightarrow \mathbf{Ti} < m - 3.99\sigma$$

$$Cpk+ > 1.33 \rightarrow \frac{Ts - m}{3\sigma} > 1.33 \rightarrow Ts - m > 3.99\sigma \rightarrow \mathbf{Ts} > m + 3.99\sigma$$

De esta forma se podría calcular los límites de tolerancia, superior e inferior, así como el intervalo de tolerancia a partir de los cuales dejaría de tener capacidad suficiente.

El **indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes**, también podría emplearse para el cálculo de los límites de tolerancia, pero teniendo en cuenta que utiliza el indicador de capacidad simple y el indicador de capacidad centrada en sí mismo, no sería necesario más que para calcular dichos indicadores; por lo cual no se utiliza dicho indicador para este fin.

### 3.4.- Comprobación de los resultados

Una vez que se ha calculado la capacidad sobre la magnitud deseada, lo único que queda es comprobar los resultados.

Independientemente de los indicadores empleados, el objetivo a cumplir es que la capacidad calculada sea superior a 1, lo que indicaría que el proceso o

máquina dispondrá de capacidad suficiente, lo que indica que las piezas defectuosas deberían ser mínimas. Esto no es necesariamente correcto si únicamente se ha utilizado el indicador de capacidad simple, puesto que, como ya se ha explicado, este indicador únicamente mostrará si el proceso o máquina puede tener capacidad suficiente.

En el caso de tener que aplicar un coeficiente de seguridad, la capacidad calculada debe superar dicho coeficiente (el coeficiente utilizado en este estudio es de 1.33, lo cual no refleja que deba ser únicamente este valor el que deba ser utilizado en el coeficiente de seguridad, pero es un coeficiente ampliamente utilizado y que minimiza las piezas defectuosas).

En el caso de que la capacidad calculada sea inferior a 1 (o inferior al coeficiente de seguridad empleado) será necesaria una modificación en el proceso o un reglaje en la máquina y la reiteración de los cálculos a partir de nuevos datos obtenidos a posteriori del cambio en el proceso o la máquina. Si no se efectúan los cambios necesarios la producción tendrá un alto nivel de piezas o productos defectuosos.

En el caso de que, una vez se hayan realizado los cambios que la empresa crea pertinentes y la re-ejecución de los cálculos, se mantenga como resultado una capacidad insuficiente, es muy posible que la máquina o proceso empleado no sirva para este trabajo y por consiguiente sea necesaria la adquisición de nueva maquinaria o una reestructuración del proceso. Este caso es el más indeseable de todos, pues obliga a la empresa a invertir dinero a mayores para completar el trabajo asignado, con el consiguiente retraso en la entrega y un daño a su imagen, por otro lado, también deja a la empresa preparada para un encargo similar en un futuro.

A continuación se muestra un ejemplo para demostrar la ejecución de esta metodología con el caso práctico de la fabricación de una pequeña serie de engranajes con máquinas convencionales y su comparativa con la fabricación de otra serie de piezas en un centro de mecanizado por control numérico.



## **4.- Aplicación**

En la aplicación de la metodología, en primer lugar se dará una descripción de las piezas que se emplearán, así como una descripción de las máquinas empleadas en su obtención, además de la descripción de las máquinas de medida empleadas para la obtención de los datos.

Los cálculos y los resultados se verán en el apartado siguiente para un desglose exhaustivo.

### **4.1.- Descripción de las piezas de estudio**

En este proyecto tenemos dos tipos de piezas distintas:

- Engranaje, fabricado con máquinas convencionales.
- Pieza por control numérico de revolución, fabricada empleando un centro de mecanizado por control numérico.

A continuación se describirán ambos tipos de piezas.

#### **4.1.1.- Engranaje**

Se ha realizado una serie de 11 piezas para este estudio. El material elegido, debido a su facilidad de mecanizado o maquinabilidad, ha sido Hierro fundido, más concretamente fundición de grafito esferoidal.

Su composición química es la siguiente:

C	C <sub>eq</sub>	Si	Mn	P	S	Al	Mg
3,8%	4,5%	2,08%	0,12%	0,021%	0,011%	0,011%	0,036%

Está designado como EN-GJS-400-18U-LT en la norma UNE-EN 1563 para fundición de grafito esferoidal.



De la misma forma se muestran sus propiedades mecánicas básicas:

Rm (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	A (%)
369	235	12,9

La preforma del engranaje (Fig. 4.1.) es una barra de hierro fundido de 65mm de diámetro con una longitud mínima de 235mm ya que esa longitud es la que se mecanizará.

Las dimensiones de la preforma vienen dadas por los siguientes cálculos:

Dado que el diámetro exterior que se quiere alcanzar, como se verá en la tabla de características, es de 54 milímetros de diámetro, y se le suma como margen de seguridad un mínimo de 10 milímetros más para poder arreglar imperfecciones, se tiene como resultado un diámetro de la preforma mínimo de 64 milímetros. Como en el taller se disponía de una barra de 65 milímetros se eligió dicha barra.

La longitud a mecanizar depende del número de piezas y la anchura de las mismas, como se quería fabricar una serie de 10 engranajes de 15 milímetros de espesor, y teniendo en cuenta que se refrentarán y limpiarán ambas caras, se otorgan 2 milímetros de anchura más a cada pieza; aparte del refrentado las piezas deben separarse de la preforma, en este proceso se realiza mediante un tronzado, y la herramienta tronzadora determina la longitud por pieza debido a la separación de las mismas, en el caso de este estudio 4 milímetros. Al resultado final se le suman 25 milímetros más de margen por si se comenten errores de mecanizado, tener la oportunidad de enmendarlos. Lo que deja el siguiente cálculo:

$$L_B = (15 + 2 + 4) \times 10 = 210 \text{ mm mínimos}$$

$$L_B = 210 + 25 = 235 \text{ mm}$$

Donde  $L_B$  es la longitud de la preforma.

Esto da como resultado una preforma de longitud 235 milímetros y un diámetro de 65 milímetros.

Debido a esta longitud de preforma y a que no se cometieron fallos de mecanizado, la longitud de la preforma permitió realizar una serie de 11 piezas en lugar de 10.



Fig. 4.1. Preforma del engranaje

#### **4.1.1.1.- Planos del engranaje**

Cómo se puede apreciar en el plano N° 1 del anexo I, el engranaje es de dientes rectos y perfil de evolvente. Se eligió este perfil por ser uno de los más utilizados y el tipo de diente por ser de fácil fabricación.

En la Fig. 4.2., se puede observar el engranaje terminado.



Fig. 4.2. Engranaje terminado

#### 4.1.1.2.- Características del engranaje

El engranaje tiene, en su diseño, las siguientes características:

Diámetro Primitivo: $D_p = Z \times M$	48mm
Número de Dientes: $Z$	16
Módulo: $M$	3 mm
Diámetro Exterior: $D_{ext} = D_p + 2 \times M$	54 mm
Diámetro Interior: $D_{int} = D_p - 2.4 \times M$	40.8 mm
Diámetro de la Circunferencia Base: $D_b = D_p \times \cos \alpha$	45.105 mm
Longitud del Diente: $b \approx$ de $4 \times M$ a $10 \times M$	15 mm
Ángulo de Presión: $\alpha$	20°
Diámetro del Agujero: $d$	22 mm

#### 4.1.1.3.- Límites de especificación del engranaje

El engranaje no tiene unos límites de especificación definidos por lo que se calculará para qué límites tiene una capacidad suficiente.

#### 4.1.2.- Pieza por control numérico

Se ha realizado una serie de 20 piezas (Fig. 4.3.) para este estudio.



Fig. 4.3. Pieza CN.

El material elegido para estas piezas de revolución ha sido el acero al carbono, más concretamente F-114 calibrado según la norma UNE. Su composición química es la siguiente:

C	Mn	Si
0.45%	0.65%	0.25%

De la misma forma se muestran sus propiedades mecánicas básicas:

Rm (MPa)	$\sigma_{0,2}$ (MPa)	A (%)
650-1000	410 (Mínimo)	18

#### 4.1.2.1.- Planos de la pieza por control numérico

La pieza fabricada en el centro de mecanizado por control numérico es una pieza de revolución. Como se puede ver en el plano N° 2 del anexo I. Las medidas se encuentran expresadas en milímetros y son las siguientes:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	D1	D2	D3	D4	D5
10mm	10mm	10mm	10mm	5mm	2mm	30mm	25mm	20mm	15mm	14mm

A continuación se muestra un croquis de la pieza (Fig. 4.4.) en cuestión para observar mejor cada medida, así como un detalle de la pieza (Fig. 4.5.).

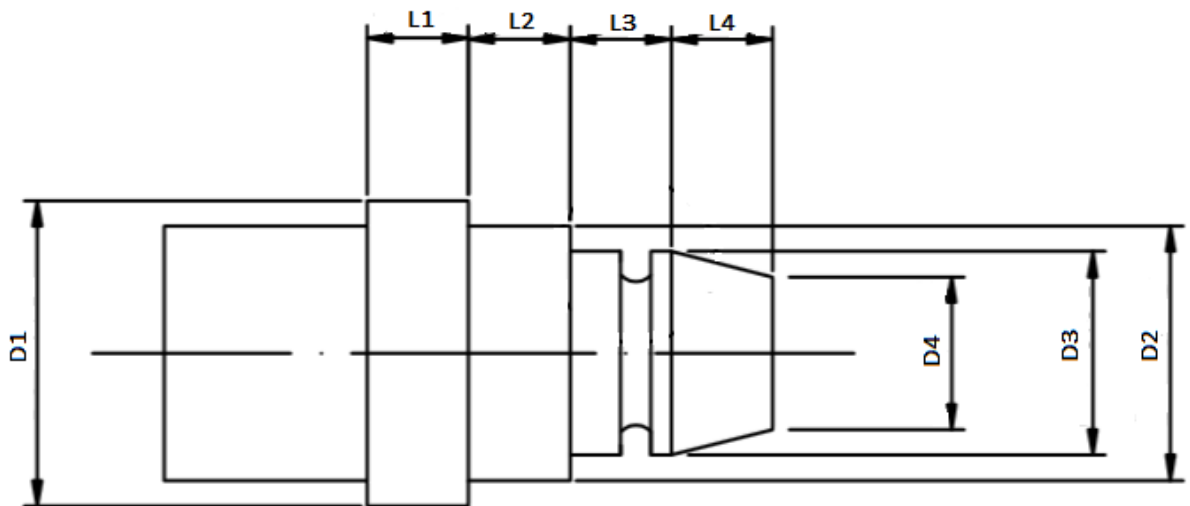


Fig. 4.4. Croquis de la pieza de revolución.

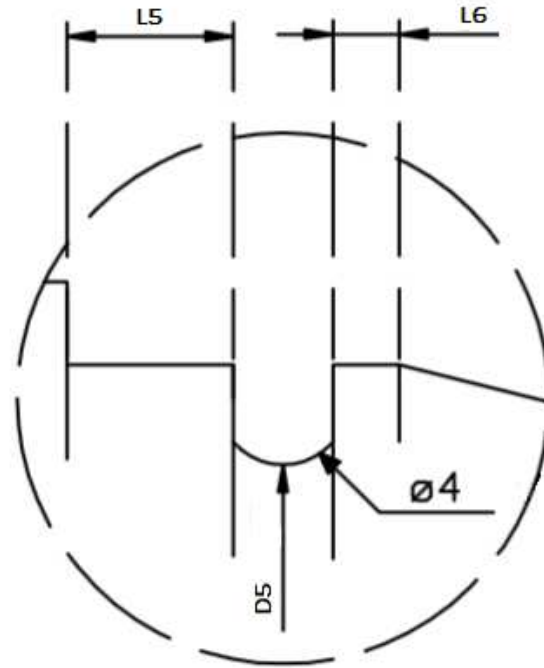


Fig. 4.5. Detalle de la pieza de revolución.

#### 4.1.2.2.- Límites de especificación de la pieza por control numérico

Los límites de especificación de la pieza, expresados en milímetros, son los siguientes:

L1	L2	L3	L4	L5	L6	D1	D2	D3	D4	D5	Ø4
± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05

Como en este caso sí que se tienen los límites de especificación, se procederá, en el apartado correspondiente de este estudio, a realizar el estudio de capacidad.

Y en el caso de que no se tenga capacidad suficiente se procederá a calcular los límites de tolerancia, a partir de los cuales, sí que se tenga capacidad suficiente.

## 4.2.- Descripción de las máquinas herramienta tradicionales

En este apartado se describen las máquinas herramienta utilizadas para el proceso de fabricación de los engranajes.

Básicamente se han utilizado dos máquinas distintas:

- *Torno Paralelo*
- *Fresadora universal*

### 4.2.1.- Torno

Antes de describir el torno empleado en este estudio, se dará una breve explicación sobre los tornos, tipos de los mismos, movimientos que tienen, operaciones que son capaces de realizar, fijación de las herramientas y sujeción de las piezas.

El torno es una máquina herramienta en la que la pieza que se mecaniza, sometida a un movimiento de rotación, es conformada por la herramienta, animada de un movimiento de avance, generalmente paralelo al eje de rotación de la pieza.

Los movimientos de trabajo del torno son:

*Movimiento de corte:* Por rotación de la pieza.

Para calcular la velocidad de corte del torno se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$

Donde  $V$  es la velocidad de corte en m/min,  $D$  es el diámetro de la pieza en mm y  $n$  son las revoluciones por minuto de la máquina.

*Movimiento de avance:* Por desplazamiento longitudinal de la herramienta.

*Movimiento de profundidad de pasada:* Por desplazamiento radial de la herramienta.

Las herramientas se montan en el portaherramientas del charriot por medio de dispositivos que permiten fijar una o varias herramientas.

La fijación de las herramientas puede realizarse por una simple brida, colocando las herramientas a la altura suficiente por medio de suplementos. Si se emplea el soporte americano, formado por un casquillo semiesférico, puede darse a la herramienta altura e inclinación sin necesidad de suplementos.

La sujeción de las piezas en el torno puede realizarse por cinco procedimientos: entre puntos, con plato de garras, con pinzas, con mandrinos auxiliares y por medio de plato plano y escuadras.

Las operaciones fundamentales que se realizan en los tornos son: cilindrado, mandrinado, refrentado, roscado, taladrado, moleteado, torneado cónico y tronzado. A continuación se describen los procesos que se utilizarán más adelante.

*Cilindrado* (Fig. 4.6.): El cilindrado consiste en mecanizar un cilindro recto de longitud y diámetro determinado. Una vez iniciado el corte con la profundidad y el avance deseado, la herramienta, desplazándose automáticamente, realiza el trabajo sin dificultad. En general, se dan dos clases de pasadas. Una o varias pasadas de desbaste para dejar la pieza a la cota deseada y una pasada de acabado para alisar la superficie.



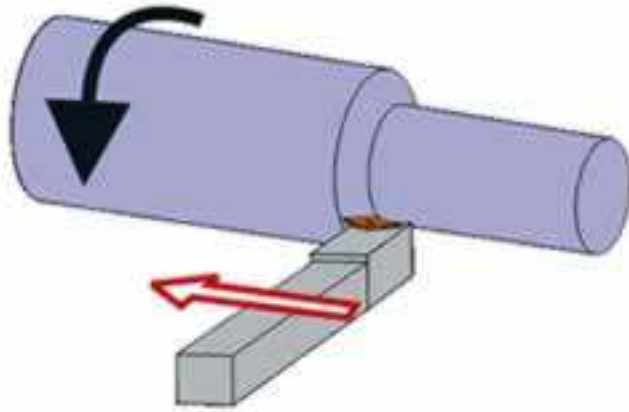


Fig. 4.6. Cilindrado.

*Mandrinado* (Fig. 4.7.): El mandrinado consiste en agrandar un agujero. Se realiza generalmente con las piezas sujetas con el plato de garras.



Fig. 4.7. Mandrinado.

*Refrentado* (Fig. 4.8.): Consiste esta operación en mecanizar una superficie plana perpendicular al eje de giro. Para ello, la herramienta no tiene avance sino únicamente movimiento de profundidad de pasada.

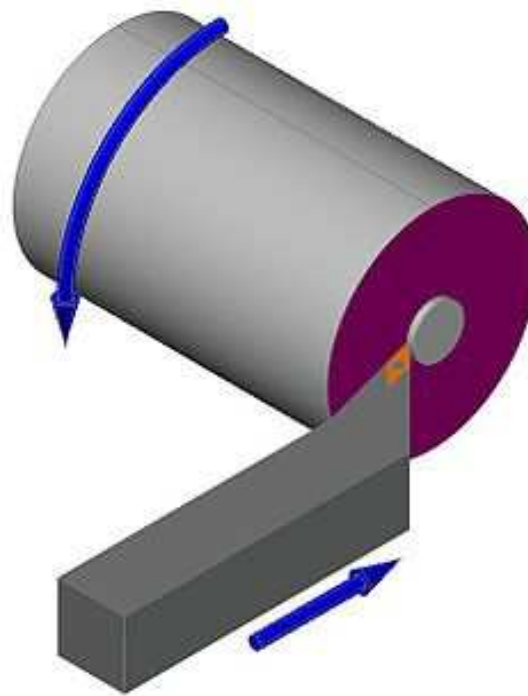


Fig. 4.8. Refrentado.

*Roscado:* El cilindrado se realiza con una velocidad muy lenta de avance de la herramienta en relación con la velocidad de giro de la pieza, pues de otro modo quedarían marcados surcos. Pues bien, el roscado se realiza con velocidades de avance mucho mayores en relación con la velocidad de la pieza, con lo que la herramienta marca una hélice que constituirá la rosca.

*Ranurado:* El ranurado consiste en abrir ranuras en las piezas. Si estas son estrechas, se realizan con una herramienta de la anchura de la ranura, pero si son anchas habrá que darle a la herramienta el movimiento de avance necesario.

*Taladrado* (Fig. 4.9.): El taladrado se realiza fijando brocas de diámetro apropiado en el cabezal móvil en lugar del contrapunto.

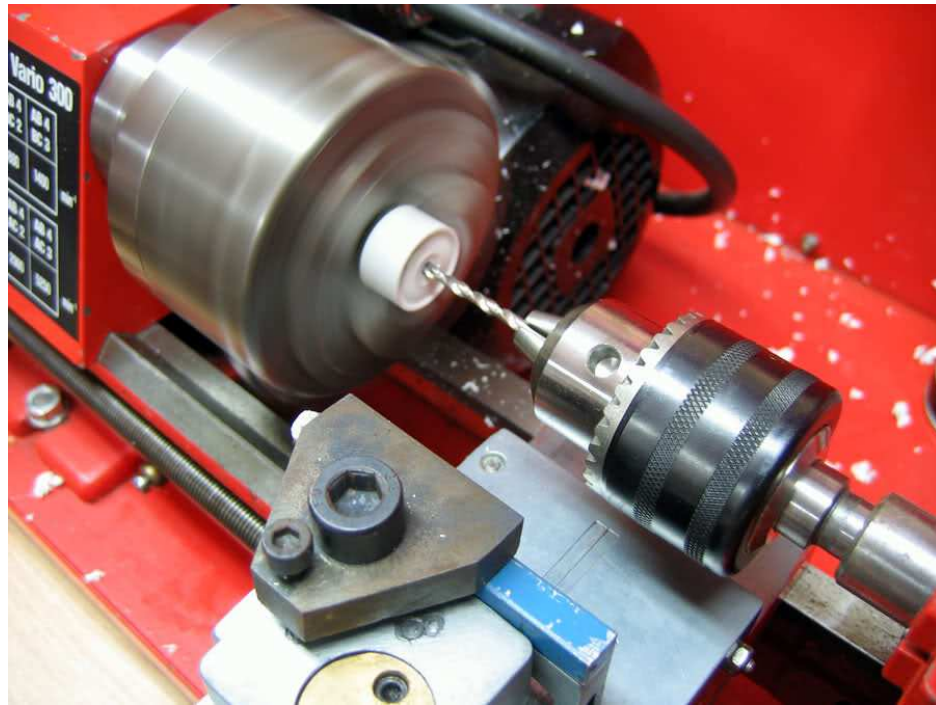


Fig. 4.9. Taladrado.

*Moleteado:* Consiste esta operación en imprimir en la superficie de la pieza un grabado, por medio de una herramienta especial denominada moleta, provista de una ruleta que lleva en su superficie el grabado deseado y que se aplica fuertemente sobre la pieza a moletear.

*Torneado cónico:* El torneado cónico tiene por objeto obtener troncos de conos, en lugar de cilindros, que es la pieza más corriente obtenible en el torno. El torneado cónico se puede realizar por tres procedimientos: Por inclinación del carro portaherramientas, por desplazamiento del contrapunto y con dispositivo copiador.

*Tronzado* (Fig. 4.10.): El tronzado es el seccionamiento de la barra o más generalmente de la pieza una vez terminada, utilizando una herramienta especialmente afilada denominada tronzadora.

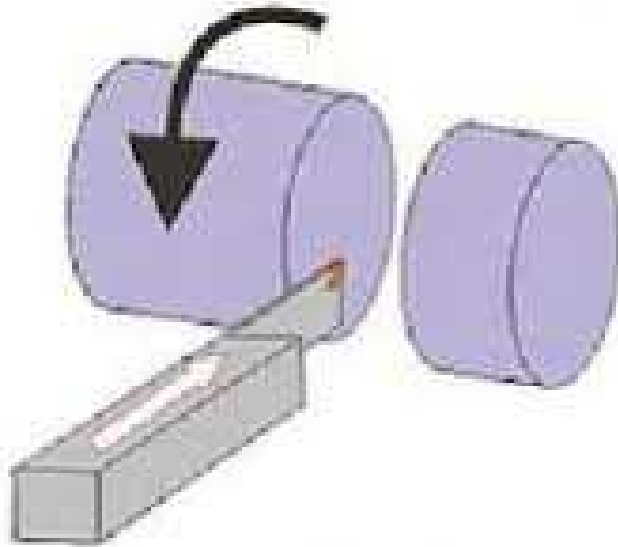


Fig. 4.10. Tronzado.

Existen distintas clases de tornos, como son: el torno cilíndrico, paralelo u horizontal, el torno al aire y el torno vertical. Además se construyen también tornos semiautomáticos (tornos con copiador y tornos revolver) y tornos automáticos.

El torno empleado (Fig. 4.11.) ha sido un torno paralelo marca Jashöne modelo M-215-260-E.

Este torno tiene un motor AJA de 5,593 kilovatios a 1500 rpm.

Su sistema de alimentación es trifásica de 220/380 Voltios a una frecuencia de 50 Hercios, así que esta máquina está conectada a 220 voltios.

Este modelo posee una distancia entre puntos de 1000 mm y un agujero de eje del cabezal de 104 mm.

Su nariz del eje es normal y tiene escote.

El torno paralelo en sí es del año 1981 y está modificado de la siguiente forma:

Se le han añadido protecciones anti-proyecciones de viruta en los puntos críticos.

Y, para mayor precisión, se ha adjuntado un visualizador Fagor.



Fig. 4.11. Torno paralelo.

#### 4.2.1.1.- Herramientas del torno

Las herramientas utilizadas en el torno han sido las siguientes:

- *Herramienta de refrentado*: herramienta de plaquita soldada de carburo de tungsteno (Fig. 4.12.).





Fig. 4.12. Herramienta de refrentado.

- *Herramienta de taladrado*: Broca de acero rápido de 20 mm de diámetro (Fig.4.13.).

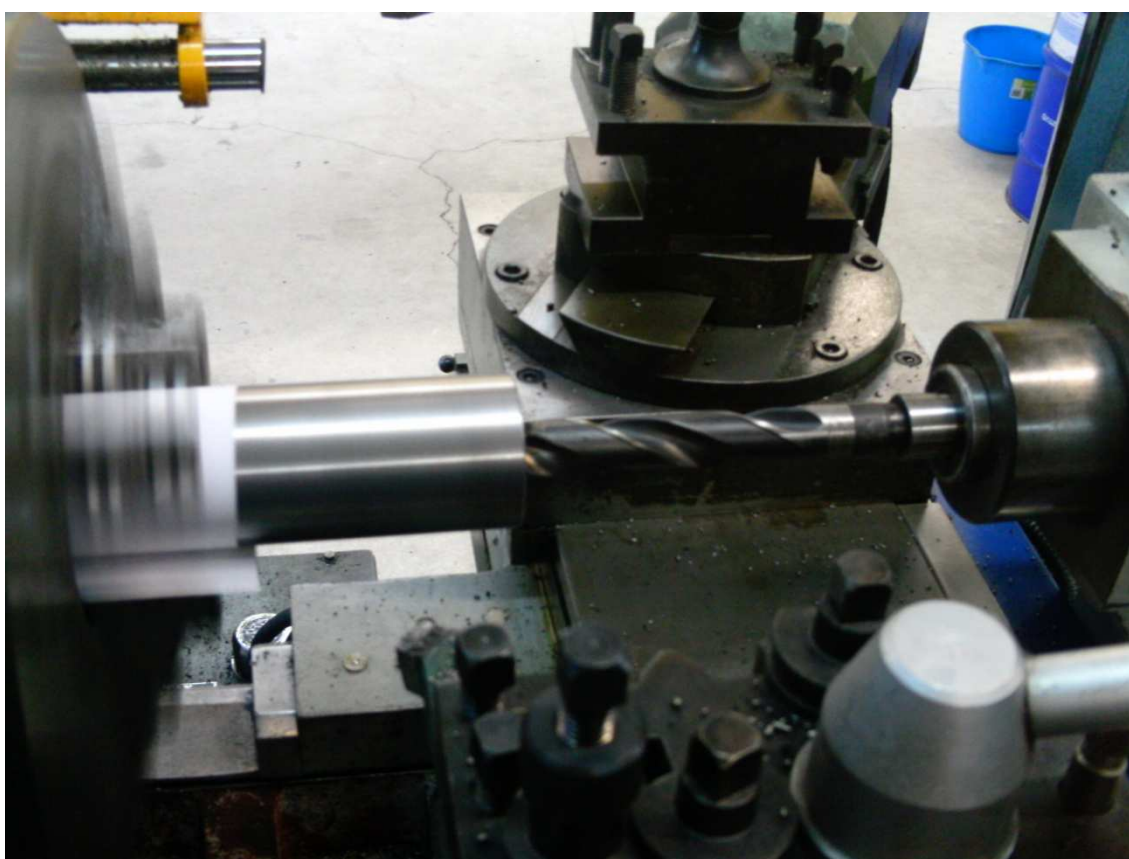


Fig. 4.13. Herramienta de taladrado.

- *Herramienta de cilindrado*: herramienta de plaquita soldada de carburo de tungsteno.

- *Herramienta de mandrinado*: herramienta de plaquita intercambiable de carburo de tungsteno (Fig. 4.14.).



Fig. 4.14. Herramienta de mandrinado.

- *Herramienta tronzadora*: Herramienta de plaquita intercambiable 10 PCS IC 808 (Fig. 4.15.), y sus características son:

P steel P15-P30

$V_c = 80 - 180$  m/min

260 590 sfm

$F_n = 0.10 - 0.30$  mm/t



Fig. 4.15. Herramienta tronzadora.

#### **4.2.2.- Fresadora**

Al igual que en el apartado anterior, antes de pasar a describir la fresadora empleada se dará una breve explicación de las fresadoras, tipos de fresadoras que existen, movimientos que tienen, operaciones que son capaces de realizar, sujeción de la herramienta y fijación de la pieza.

La fresadora es una máquina dotada de una herramienta característica, denominada fresa, que, animada de un movimiento de rotación, mecaniza superficies en piezas que se desplazan con movimiento rectilíneo bajo la herramienta.

Si el eje de la fresa se halla dispuesto paralelamente a la superficie a mecanizar, el fresado se denomina cilíndrico. En este caso, la fresa puede girar en sentido contrario al avance, denominándose fresado normal o en el mismo sentido, que es el fresado en concordancia.



Cuando el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de la pieza que se mecaniza, el fresado se denomina frontal.

Los movimientos de trabajo de la fresadora son:

*Movimiento de corte:* Por rotación de la fresa.

Para calcular la velocidad de corte de la fresadora se utiliza la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000}$$

Donde  $V$  es la velocidad de corte en m/min,  $D$  es el diámetro de la fresa en mm y  $n$  son las revoluciones por minuto de la máquina.

*Movimiento de avance:* Por desplazamiento rectilíneo de la pieza.

*Movimiento de profundidad de pasada:* Por desplazamiento vertical de la pieza.

Las fresadoras tienen mucho mayor rendimiento que las demás máquinas herramientas para las mismas operaciones, pues como cada diente o arista de la fresa no está en fase de trabajo y, por tanto, en contacto con la pieza más que una fracción del tiempo que dura una revolución de la fresa, experimenta ésta menos fatiga, tienen menor desgaste y trabaja a temperatura inferior que las cuchillas de los tornos, sin que pueda considerarse su trabajo intermitente, ya que siempre hay una arista de la fresa en fase de trabajo.

El modo de sujeción de las herramientas se basa en que el eje de las fresadoras es hueco y está atravesado por una varilla que rosca por un extremo en los mangos de las fresas alojadas en el portaherramientas cónico y, por el otro extremo también roscado, se fija con una tuerca o volante. De esta manera, quedan firmemente sujetas las herramientas. El procedimiento de sujeción de las fresas en el portaherramientas cónico de la fresadora, depende de la forma de éstas y del trabajo a realizar.

Las piezas se pueden fijar sobre la mesa por medio de tres procedimientos: por medio de bridas, por medio de mordazas y por medio de mesas circulares y platos.

El cabezal divisor es uno de los elementos de trabajo fundamentales de la fresadora. Se utiliza cuando se trata de fresar ruedas dentadas, machos de roscar, fresas, brocas, etc., y en general siempre se trate de mecanizar piezas regularmente talladas en su periferia.

Las principales operaciones que pueden realizar las fresadoras son las siguientes: planeado, ranurado (ya sea para ranuras rectas, ranuras de forma o chaveteros), corte, perfilado, fresado circular, fresado helicoidal, fresado de engranajes, taladrado, escariado, mandrinado y mortajado.

*Planeado:* Se realiza con fresas cilíndricas o frontales.

*Ranurado:* Pueden realizarse tres clases principales de ranuras:

Ranuras rectas: se utilizan fresas de tres cortes.

Ranuras de forma: Se emplean fresas de la forma adecuada a la ranura, que puede ser en forma de T, de cola de milano, etc.

Chaveteros: Se utilizan fresas con mango especial para este fin.

*Corte:* El corte se realiza con fresas sierras en forma de disco de 0.5 a 6 milímetros de espesor y hasta 300 milímetros de diámetro. Sus caras laterales están ligeramente vaciadas para evitar el rozamiento con la fresa.

*Perfilado:* Consiste esta operación en labrar una superficie de perfil determinado. Se emplean para esto fresas de línea periférica adecuada al perfil que se desea obtener.

*Fresado circular:* Esta operación, también denominada contorneado, se realiza en fresadoras provistas de un plato circular con movimiento de rotación automático. Se utilizan generalmente fresas cilíndricas en posición vertical.

*Fresado helicoidal:* Consiste esta operación en mecanizar una hélice sobre una superficie cilíndrica. Por este procedimiento se fresan brocas, escariadores, etc.

*Taladrado, escariado y mandrinado:* Montando brocas, escariadores o cabezales universales en el portaherramientas de las fresadoras, pueden realizarse operaciones de taladrado, escariado y mandrinado.

*Mortajado:* Las fresadoras pueden llevar un dispositivo mortajador que transforma el movimiento de rotación del eje en un movimiento vertical alternativo. De esta manera, y utilizando herramientas de mortajadora, pueden realizarse operaciones de mortajado, generalmente en pequeñas piezas.

El tallado de los engranajes por fresado, es decir, por movimiento de corte circular de una herramienta, aunque no se realice normalmente en las máquinas fresadoras convencionales, puede ser practicado por los siguientes procedimientos: Con fresas de módulo, con fresas de punta y por generación. El procedimiento empleado en este estudio ha sido con fresas de módulo, que es el que a continuación se describe.

*Tallado de engranajes por fresado con fresas de módulo (Fig. 4.16.):*  
Utilizando una fresa cuya sección cortante es idéntica al del intradiente se pueden tallar ruedas dentadas en fresadoras ordinarias.

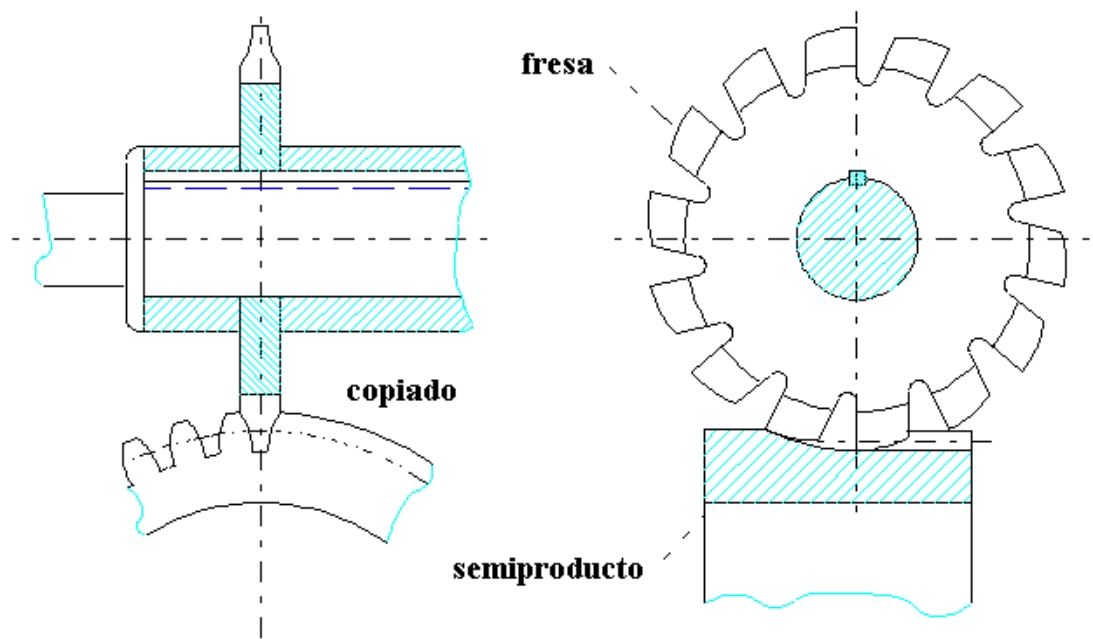


Fig. 4.16. Tallado de engranajes por fresado con fresas de módulo.

Los principales tipos de fresadoras son los siguientes: fresadoras horizontales, fresadoras verticales, fresadoras universales y fresadoras especiales.

La fresadora empleada (fig. 4.17.) ha sido una fresadora universal marca FEXAC con modelo SBT-013-X.



Fig. 4.17. Fresadora universal.

Esta fresadora viene equipada con plato divisor (fig. 4.18.) para facilitar el tallado de los dientes de engranaje.

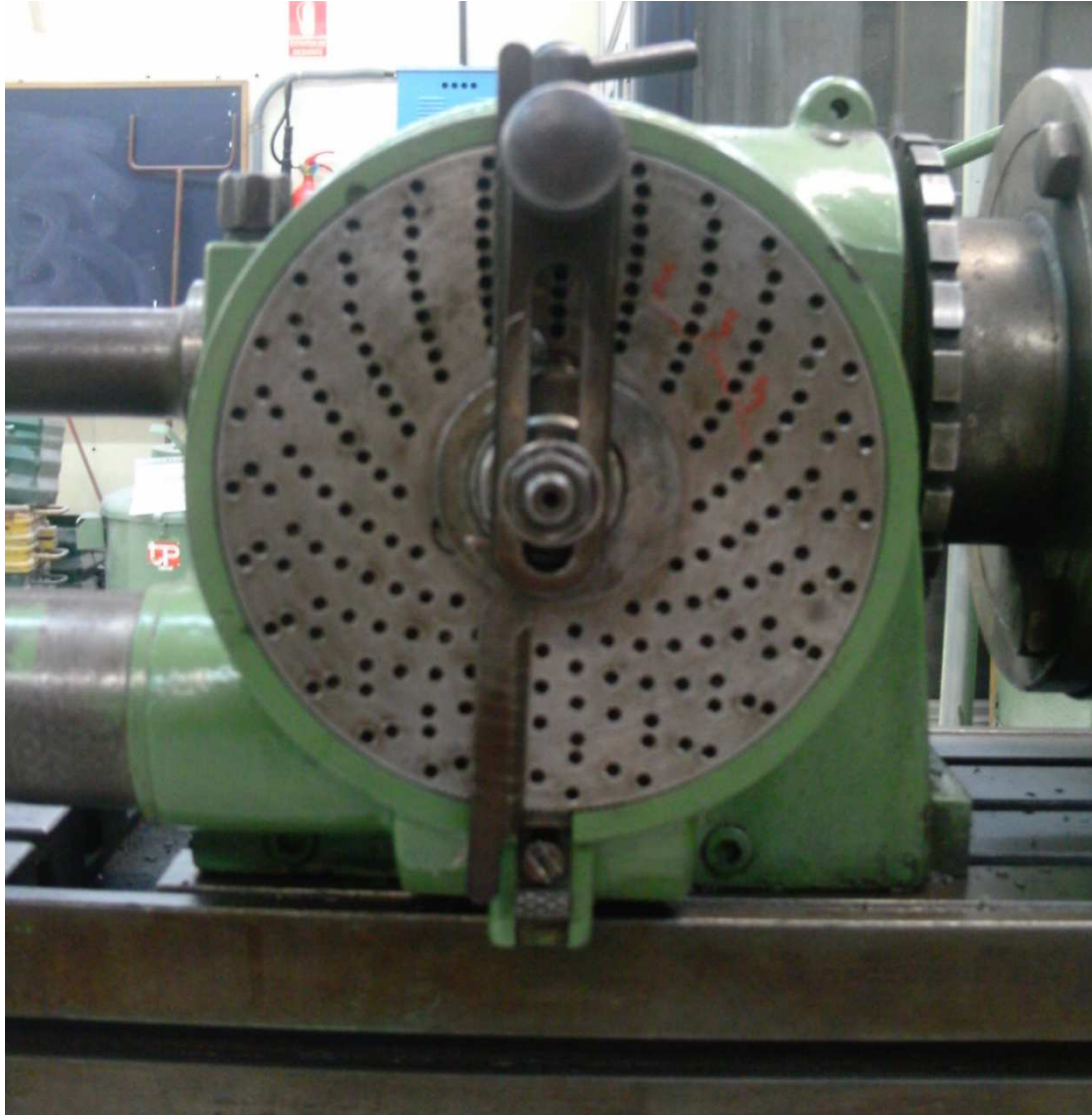


Fig. 4.18. Plato divisor.

#### 4.2.2.1.- Herramientas de la fresadora

La única herramienta utilizada en la fresadora ha sido la *fresa de módulo 3 N° 2* (Fig. 4.19.) por ser el engranaje de 16 dientes.



Fig. 4.19. Fresa de módulo 3 N° 2.

Esto es así porque lo marca la tabla de fresas para los distintos dientes y módulos (Fig. 4.20.).



# Tallado de ruedas rectas con dentado evolvente

## JUEGO DE FRESAS

8 fresas por juego, utilizadas para Módulo 1 - 10

N.º 1 para ruedas de 12 - 13 dientes	N.º 5 para ruedas de 26- 34 dientes
» 2 » 14 - 16 »	» 6 » 35- 54 »
» 3 » 17 - 20 »	» 7 » 55-134 »
» 4 » 21 - 25 »	» 8 » 135-cremallera

15 fresas por juego, utilizadas para Módulo 11 y mayores

N.º 1 para ruedas de 12 dientes	N.º 4 1/2 para ruedas de 23- 25 dientes
» 1 1/2 » 13 »	» 5 » 26- 29 »
» 2 » 14 »	» 5 1/2 » 30- 34 »
» 2 1/2 » 15-16 »	» 6 » 35- 41 »
» 3 » 17-18 »	» 6 1/2 » 35- 54 »
» 3 1/2 » 19-20 »	» 7 » 55- 79 »
» 4 » 21-22 »	» 7 1/2 » 80-134 »

Núm. 8, para ruedas de 135 dientes hasta cremallera

### FRESAS PARA «DIAMETRAL PITCH»

Si el cálculo para engranajes se efectúa según Diámetro o Circular Pitch, el número de fresas por juego es como sigue:

8 fresas por juego, utilizadas para Diámetro Pitch 36 - 2 1/2

N.º 1 para ruedas de 135 dientes a cremallera	N.º 5 para ruedas de 21-25 dientes
» 2 » 55-134 dientes	» 6 » 17-20 »
» 3 » 35- 54 »	» 7 » 14-16 »
» 4 » 26- 34 »	» 8 » 12-13 »

15 fresas por juego, utilizadas para Diámetro Pitch 2 1/2 - 1

Núm. 1, para ruedas de 135 dientes a cremallera

N.º 1 1/2 para ruedas de 80-134 dientes	N.º 5 para ruedas de 21-25 dientes
» 2 » 55- 79 »	» 5 1/2 » 19-20 »
» 2 1/2 » 42- 54 »	» 6 » 17-18 »
» 3 » 35- 41 »	» 6 1/2 » 15-16 »
» 3 1/2 » 30- 34 »	» 7 » 14 »
» 4 » 26- 29 »	» 7 1/2 » 13 »
» 4 1/2 » 23- 25 »	» 8 » 12 »

Se advierte que las dos tablas últimas se dan a conocer porque en América (U. S. A.) e Inglaterra marcan las fresas con números a la inversa del sistema de Módulo.

Fig. 4.20. Tabla de elección de fresas.



### 4.3.- Análisis de fabricación en maquinas herramienta

En este punto se trata el proceso de fabricación del engranaje desglosado en dos partes, cada una de ellas dedicada a la máquina herramienta correspondiente que se utiliza:

*-Análisis del proceso de fabricación en el torno*

*-Análisis del proceso de fabricación en la fresadora*

#### 4.3.1.- Análisis del proceso de fabricación en el torno

El proceso de fabricación da comienzo colocando la preforma en el plato de garras del torno (Fig. 4.21.). En este paso se fija correctamente la preforma, para asegurar que la pieza esté centrada, lo que significa que las vibraciones por excentricidad serán mínimas. Aún así, debido a que se va a cilindrar la pieza, se pueden corregir errores debido a una fijación poco apropiada.

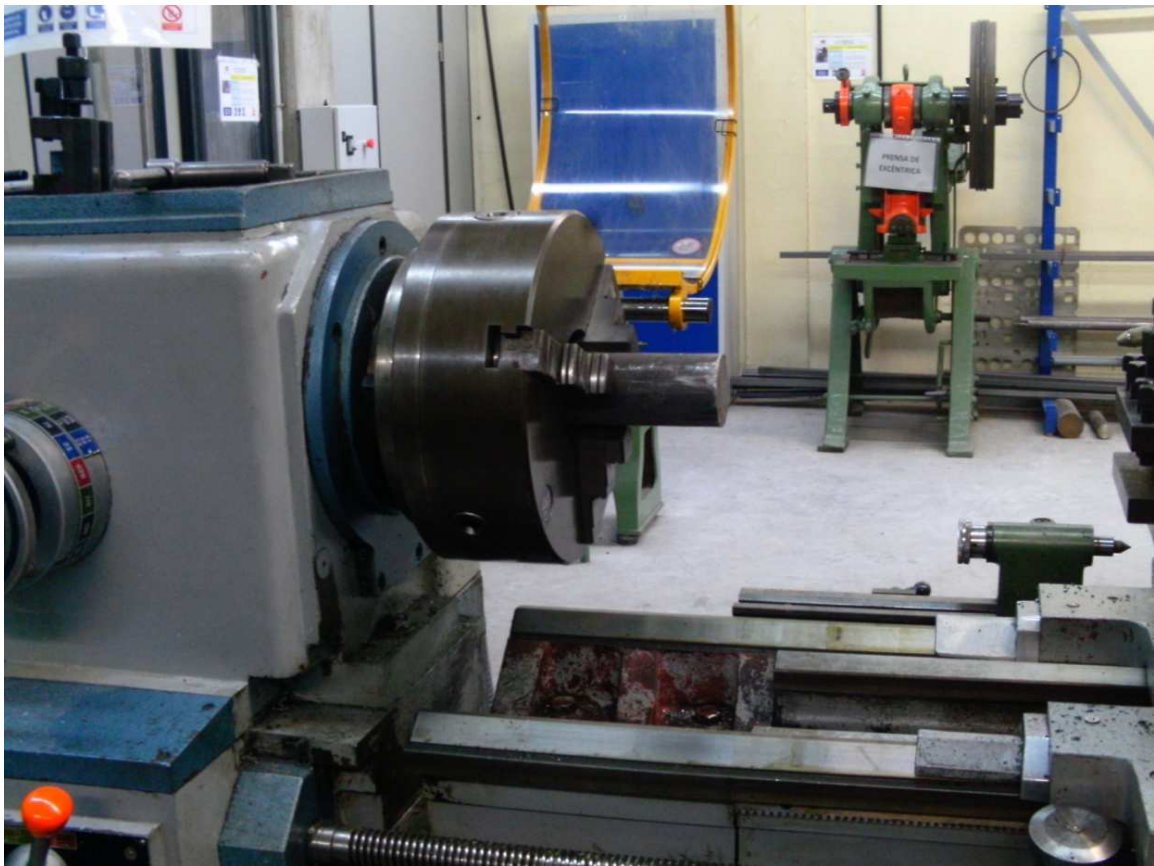


Fig. 4.21. Fijación de la preforma.

Seguidamente, se centra la herramienta a la altura del contrapunto. Se pone en marcha el torno para un refrentado y limpiado de la cara (Fig. 4.22.). Este procedimiento permite, a mayores, corregir un posible mal posicionado de la preforma en el plato de garras y se realiza a 620 rpm con un avance de 0.043 mm/vuelta. A partir de la fórmula del apartado 4.2.1., es posible calcular la velocidad de corte:

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000} = \frac{\pi \times 65 \times 620}{1000} = 126.54 \text{ m/min}$$



Fig. 4.22. Refrentado.

Antes de cilindrar es necesario realizar un pequeño taladrado en el centro de la cara para apoyar el contrapunto y de esta forma evitar pandeo indeseado que daría lugar a piezas defectuosas. Para realizar el alojamiento del contrapunto, se utiliza una broca de acero rápido (Fig. 4.23.). Una vez realizado el alojamiento ya es posible asegurar la pieza colocando el contrapunto (Fig. 4.24.).



Fig. 4.23. Taladrado del alojamiento del contrapunto.



Fig. 4.24. Colocado del contrapunto.

Se confirma que la herramienta para cilindrar esté afilada para una correcta realización de esta operación y, a continuación, se cilindra para dejar la pieza al diámetro deseado, pero sólo se mecaniza la longitud mínima ya calculada de 235mm.

Se realizan varias pasadas cilindrando para dejar la preforma con un diámetro de 64mm (Fig. 4.25. y Fig. 4.26.). Las pasadas se realizan a 620 rpm con un avance de 0.12 mm/vuelta y una profundidad de 0.5 mm. La velocidad de corte es la misma que en el refrentado, 126,54 m/min.



Fig. 4.25. Cilindrado.



Fig.4.26. Cilindrado (2).



Una vez se tiene cilindrada la preforma, cortamos la parte mecanizada utilizando una sierra con ayuda de taladrina (Fig. 4.27.) para obtener la preforma (Fig. 4.28.) de la que se conseguirán las piezas terminadas.



Fig. 4.27. Corte de la preforma.



Fig. 4.28. Preforma (2).

Seguidamente se coloca la preforma en el plato de garras para un refrentado de la cara de corte (Fig. 4.29.). Como se puede observar en la figura 4.28., el proceso de corte ha dejado unas rebabas que deben eliminarse, aprovechando el refrentado se practica un chaflán a  $45^\circ$  de 1mm al diámetro exterior de la cara.

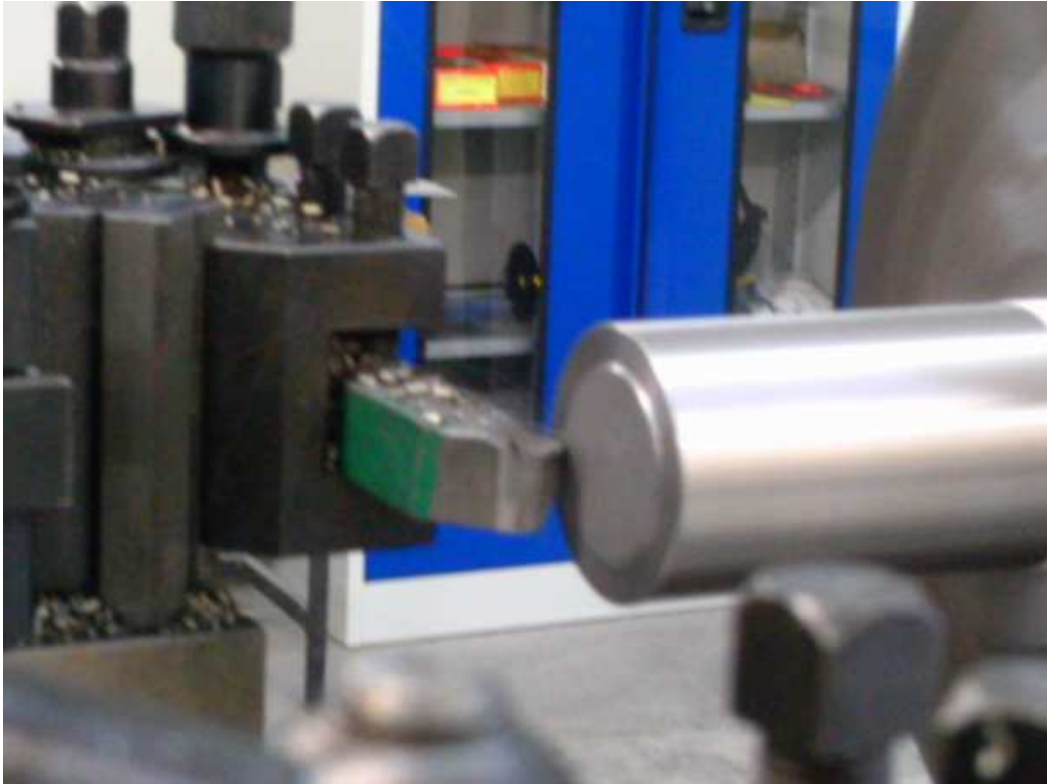


Fig. 4.29. Refrentado (2).

A continuación se procede a un taladrado (Fig. 4.30.), cambiando el contrapunto por un portabrocas con una broca de 20 mm de diámetro de acero rápido; previa afilada de la broca en el esmeril de acero rápido. Se escoge una velocidad de giro de 215 rpm y se taladra la longitud mínima calculada, es decir, toda la preforma. El proceso se lleva a cabo con un avance de 0.20 mm/vuelta y la velocidad de corte se obtiene mediante la fórmula antes utilizada:

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000} = \frac{\pi \times 20 \times 215}{1000} = 13.5 \text{ m/min}$$



Fig. 4.30. Taladrado.

Seguidamente se realiza un tronzado (Fig. 4.31.) con una herramienta de plaquita soldada P. steel P15 – P30 de 4mm de espesor, con lo que obtenemos la pieza deseada a falta de un único proceso y las operaciones de tallado de dientes en la fresadora. El tronzado se realiza cada 20 mm previo refrentado y chaflanado. De esta forma se eliminan las rebabas que deja el proceso de tronzado en la cara de la pieza siguiente.

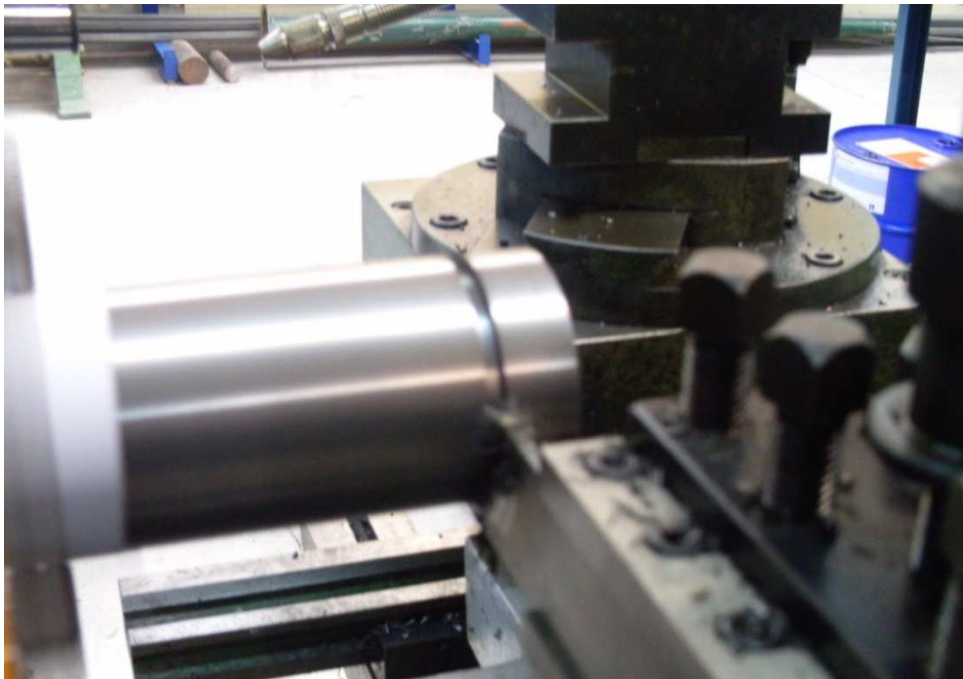


Fig. 4.31. Tronzado.



Debido al margen de error, el material sobrante se reutilizó para realizar la pieza número 11 que se incluye en los cálculos.

A continuación se procede al refrentado de la cara de tronzado (Fig. 4.32.) para eliminar rebabas y rugosidades no deseadas. Para ello la pieza se sujeta la pieza en el plato de garras blandas (Fig. 4.33.), que nos permite una sujeción idéntica para toda la serie.

Se procede con dos pasadas de 0.5mm seguido de un chaflanado del diámetro exterior, para que las dos caras de la pieza queden iguales. Una vez terminado este proceso se mandrina cada pieza, previo afilado de la herramienta. El mandrinado (Fig. 4.34.) se realiza a 620 rpm en dos pasadas, o lo que es lo mismo, una profundidad de 0.5 mm; con la herramienta de plaquita intercambiable, realizando así el mandrinado o cilindrado interior con un diámetro interior de 22mm. Se aprovecha para realizar un chaflán en el diámetro interior a 45°, al igual que en el diámetro exterior. La velocidad de corte del mandrinado se obtiene mediante la fórmula de la velocidad de corte:

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000} = \frac{\pi \times 20 \times 620}{1000} = 38.94 \text{ m/min}$$



Fig. 4.32. Refrentado (3).



Fig. 4.33. Plato de garras blandas.



Fig. 4.34. Mandrinado.

Este último proceso se repite para todas las piezas.

#### ***4.3.2.- Análisis del proceso de fabricación en la fresadora***

Una vez que los procesos a realizar en el torno han sido concluidos se tendrá una preforma de engranaje a la cual sólo le faltan los dientes por tallar. Para este fin, se utiliza la fresadora.

El primer punto que debe atenderse es la elección de la fresa a emplear.

Se elige la fresa de módulo 3 N° 2, la cual está destinada para el rango de dientes que el engranaje a fabricar tiene como puede apreciarse en la tabla de la figura 4.20.

A continuación se calcula el N° de vueltas de la manivela y plato de agujeros del aparato divisor. Como la constante  $K$  es 40, o lo que es lo mismo  $360/40 = 9^\circ$  por vuelta, y el engranaje tiene 16 dientes, o 16 huecos, se determina que deben darse 2 vueltas y media para tallar cada división.

Una vez se tienen estos datos se puede comenzar a tallar los dientes del engranaje.

En primer lugar se coloca la fresa (Fig. 4.35.) y la pieza (Fig. 4.36.) y se prepara el plato divisor (Fig. 4.37.), que es de división directa, así que se deja el manubrio fijo en el círculo de 60 y se quita el juego del plato. Se centra la mesa a continuación, para ello se utiliza el gramil, se saca el contrapunto y se pone para que este cerca del centro dejando un espacio, se vuelve a colocar el contrapunto, se marca a un lado y a otro de la pieza y se gira la pieza  $180^\circ$ , se vuelve a marcar, se gira la pieza de nuevo, esta vez para que las marcas queden arriba y abajo y se coloca la mesa para que la fresa quede entre los 2 trazos.



Fig. 4.35. Fresa.

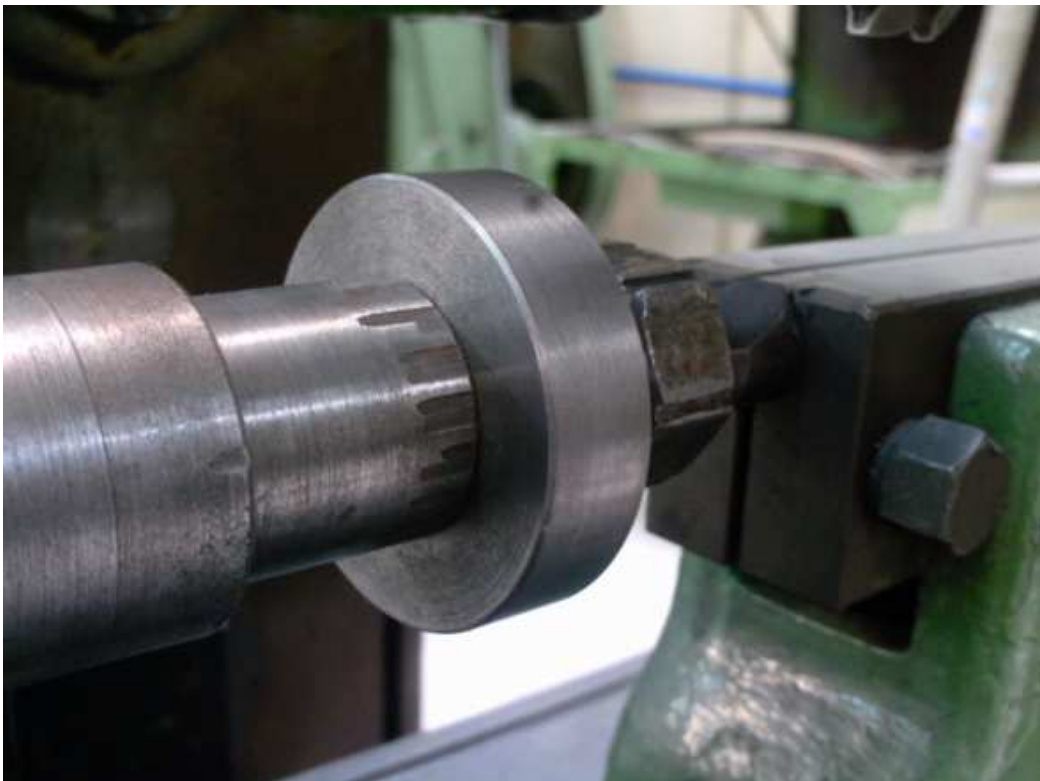


Fig. 4.36. Pieza fijada en la fresadora.

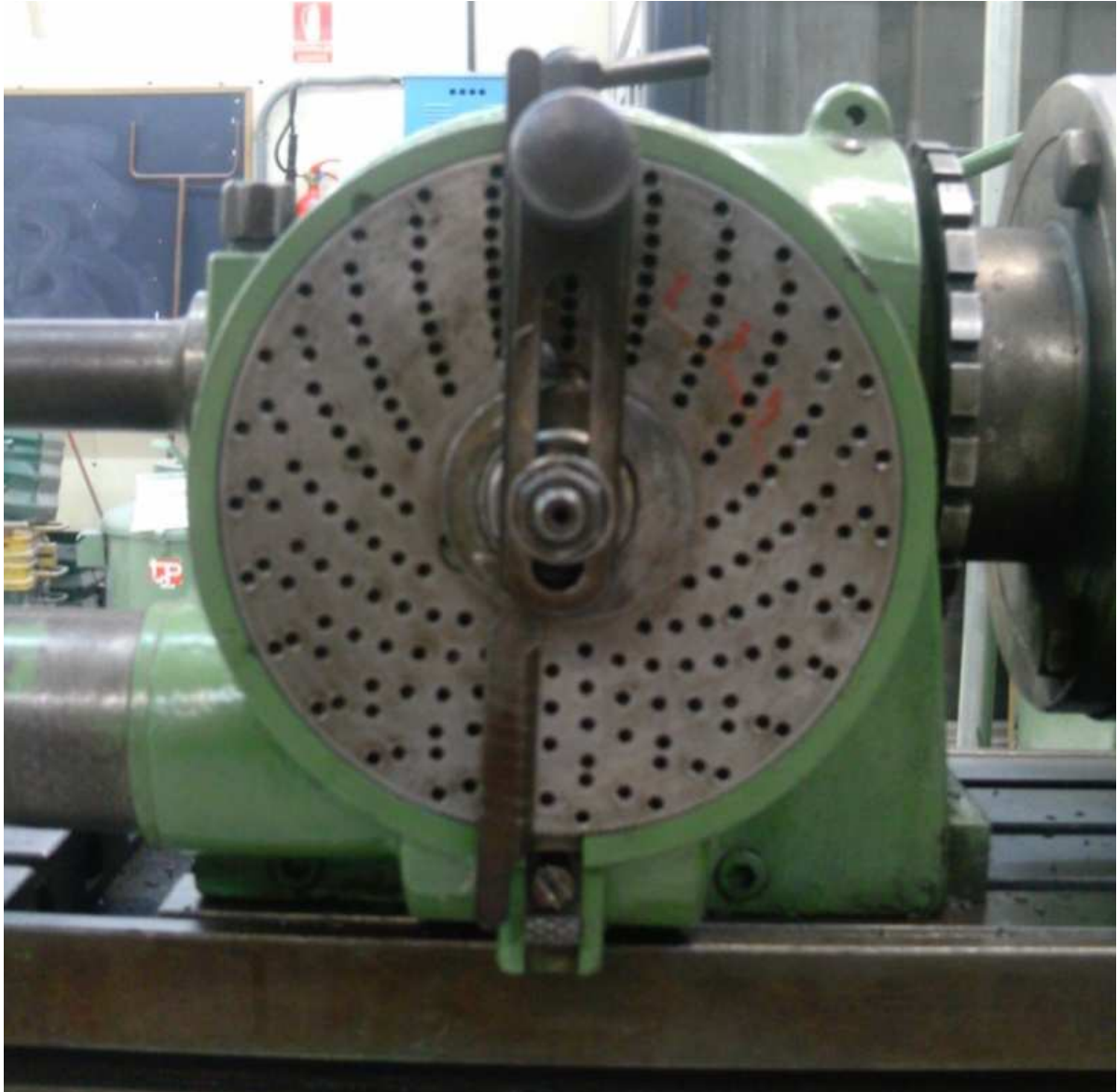


Fig. 4.37. Plato divisor.

Se elige una velocidad de 269 rpm, se utiliza el reloj comparador para medir el error del carro vertical y corregirlo. El avance es de 45 mm/min y la velocidad de corte se obtiene por la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi \times D \times n}{1000} = \frac{\pi \times 25 \times 269}{1000} = 21.12 \text{ m/min}$$

Se empieza a mecanizar en seco y, al terminar el primer hueco, se gira el círculo de 60 el ángulo que se ha marcado de 2 vueltas y media. A continuación se mecaniza el 2º hueco, y así uno tras otro hasta mecanizar los 16 huecos o, lo que es lo mismo, los 16 dientes.



Para terminar se limpia la pieza y ya se tiene la pieza mecanizada (Fig. 4.38.).



Fig. 4.38. Engranaje terminado.

#### **4.4.- Descripción de las máquinas de medida**

Para la obtención de los datos se han empleado 2 máquinas distintas:

- *Máquina de medida 3D*
- *Proyector de perfiles*

A continuación se describen dichas máquinas.

##### ***4.4.1.- Descripción de máquina de medida 3D***

Las máquinas de medición por coordenadas son máquinas que emplean componentes móviles, los cuales se trasladan a lo largo de guías con recorridos ortogonales, para medir una pieza por determinación de las coordenadas X, Y y Z de los puntos de la misma.

Las coordenadas de los puntos se determinan con un palpador, ya sea este de contacto o no) y un sistema de medición de desplazamiento, que se encuentra en cada uno de los ejes de la máquina.

Las máquinas de medición por coordenadas son instrumentos que sirven para realizar mediciones dimensionales y de desviaciones de la regularidad geométrica de objetos, ya sean estos de forma simple o compleja.

Básicamente las máquinas de medición por coordenadas miden puntos en el espacio.

Es de primordial importancia la determinación de un origen de coordenadas para la determinación de la posición de cada punto.

La potencia de las máquinas de medición por coordenadas deriva de su capacidad para calcular, a partir de los puntos registrados, una gran variedad de magnitudes dimensionales como:

- Distancias.
- Posiciones relativas.
- Ángulos.
- Formas, etc.

Por máquina de medición por coordenadas se suele entender generalmente las máquinas de 3 coordenadas o 3 ejes (Fig. 4.39.).



Fig. 4.39. Máquina de medición por coordenadas de 3 ejes Mitutoyo Crysta Apex S.



Existen también máquinas de una única coordenada horizontal (Fig. 4.40.).

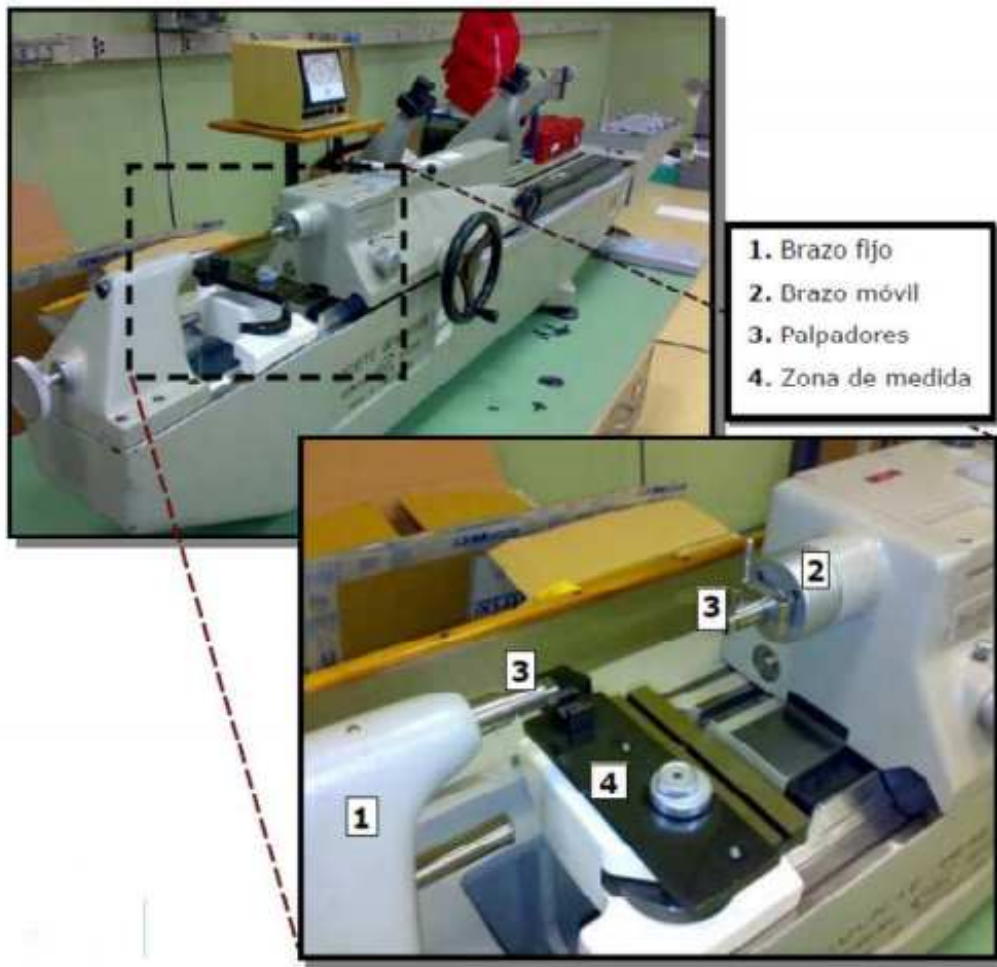


Fig. 4.40. Máquina de medición de una coordenada horizontal.

También existen las máquinas de una única coordenada vertical (Fig. 4.41.).



Fig. 4.41. Máquina de medición de una coordenada vertical.

Y por último, se encuentran las máquinas de dos coordenadas o bidimensionales (Fig. 4.42.).



Fig. 4.42. Máquina de medición bidimensional Mitutoyo.

Todos los tipos de máquinas de medición por coordenadas pueden ser manuales o automáticas.



Fig. 4.43. Máquina de medida por coordenadas 3D.

La máquina de medida por coordenadas 3D manual (Fig. 4.43.) es un sistema de medida de mesa fija y palpador móvil con 3 grados de libertad, los cuales son los 3 ejes de coordenadas cartesianas XYZ.

La máquina de medida 3D empleada ha sido Coordinate measuring machine de uso manual, marca Mitutoyo, modelo C-806-10, con una capacidad de medida de 2000x600x800 milímetros.

El palpador (Fig. 4.44.) está equipado con un detector de contacto que, mediante un LED, avisa cuando una medida ha sido realizada y registrada.

El palpador empleado ha sido un Mitutoyo MRP-1 Renishaw.

Es capaz de medir desviaciones en todas direcciones, lo que permite una gran versatilidad a la hora de medir.

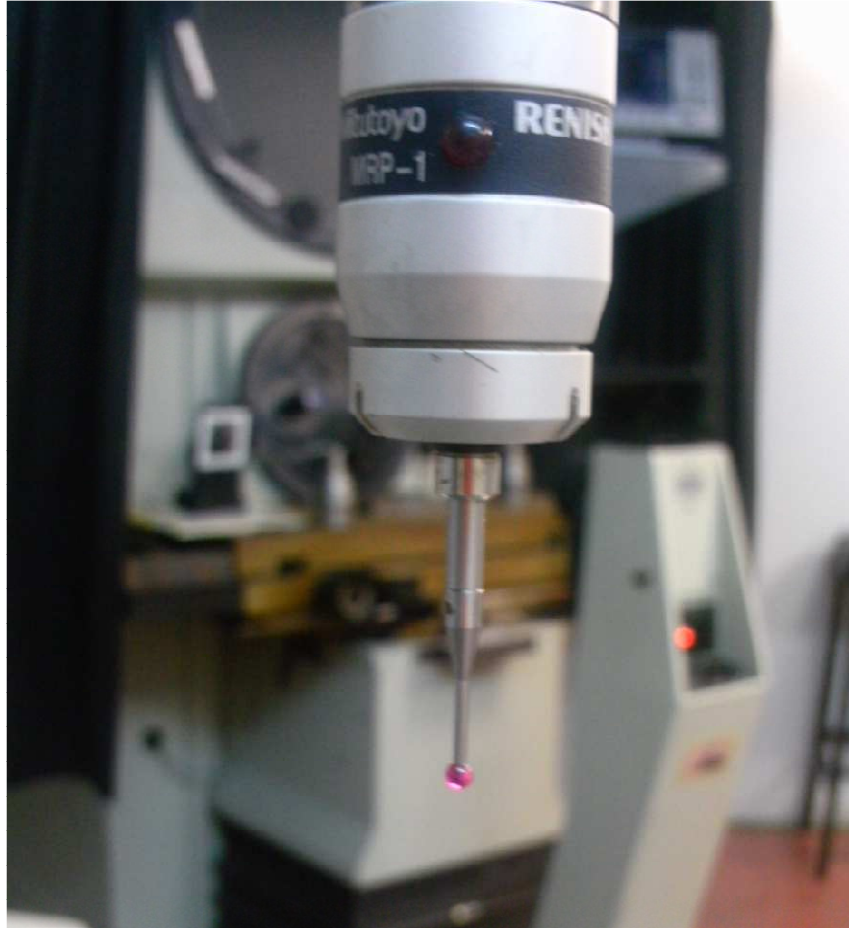


Fig. 4.44. Palpador.

Cada grado de libertad está controlado por una ruleta manual con un sistema de bloqueo independiente (Fig. 4.45.), lo que nos permite medir en el mismo plano bloqueando una coordenada, o en el mismo eje, bloqueando dos coordenadas.





Fig. 4.45. Controladores manuales.

Esta máquina está conectada a un ordenador que recibe y analiza los movimientos que el palpador efectúa y los registra para su uso informático.

El software utilizado ha sido el MCOSMOS (Geopak), el cual tiene sistema de reglaje, para el que hay que utilizar la esfera patrón (Fig. 4.46.). También dispone de representación gráfica y programas de cálculo automático a partir de valores obtenidos, lo que facilita la obtención de medidas indirectas.



Fig.4.46. Esfera patrón.

#### **4.4.2.- Descripción de proyector de perfiles**

El proyector de perfiles es una máquina de medida que utiliza la óptica para aumentar los perfiles de los objetos a medir y así obtener mayor precisión.

Los proyectores de perfiles son aparatos cuyo funcionamiento se basa en la verificación de perfiles por comparación, en la proyección de la sombra del perfil de una pieza, o de una parte de ella, sobre una pantalla, con un factor de ampliación conocido, que suelen oscilar de 10 x a 100 x (aumentos). De esta forma es posible comparar el perfil de la pieza con una plantilla, o con un dibujo patrón y detectar, e incluso medir, las variaciones existentes.

Suelen disponer de dos sistemas de proyección:

**Proyección episcópica**, en la cual la imagen obtenida es el perfil en negro (opaco) de la pieza (Fig. 4.47.).



Fig. 4.47. Proyector de perfiles con proyección episcópica proyector de perfiles horizontal deltronic dh216.



**Proyección diascópica**, en la cual la imagen que se obtiene es de la superficie de la pieza, donde se pueden apreciar todos los detalles, incluso la calidad de dicha superficie (Fig. 4.48.).



Fig. 4.48. Proyección diascópica.

A mayores del sistema de proyección empleado los proyectores de perfiles pueden dividirse en:

**Proyector de perfiles de eje vertical.** En este tipo de proyectores el haz luminoso incide verticalmente en el elemento a medir. La pieza suele situarse sobre mesas de cristal, a través de las cuales se transmite el haz luminoso (Fig. 4.49.).



Fig. 4.49. Proyector de perfiles de eje vertical.

**Proyectores de perfiles de eje horizontal.** En este tipo de proyectores el haz luminoso incide horizontalmente sobre el elemento a medir. Estos proyectores poseen campos de medida mayores, adecuados para piezas grandes y pesadas, que se sitúan sobre mesas de acero dotadas de ranuras y elementos de fijación (Fig. 4.50.).



Fig. 4.50. Proyector de perfiles de eje horizontal.



Fig. 4.51. Proyector de perfiles empleado.



El proyector de perfiles empleado (Fig. 4.51.) es un proyector de perfiles de eje horizontal con proyección episcópica de marca Sigma modelo HF 500. Dispone de mesa móvil en 3 dimensiones, 2 para desplazar la pieza y medir distintos puntos y otra para enfocar la pieza y obtener valores fiables al observar nítidamente los contornos de las piezas. En la figura 4.52. se puede ver la pieza lista para ser medida.



Fig. 4.52. Pieza situada para medir.

Un haz de luz blanca, obtenido mediante una lámpara de 24 voltios y 150 vatios de potencia, se emite desde la máquina en dirección a un conjunto de espejos, los cuales se encargan de invertir dos veces la imagen para que se muestre correctamente y aumentar la imagen. Al colocar una pieza bloqueando parcialmente el haz de luz, se podrá observar en la pantalla la pieza aumentada y en negativo, o lo que es lo mismo, la sombra de su perfil.

El proyector de perfiles está unido a un dispositivo digital Quadra-Chek 200 (Fig. 4.53.) de la marca Metronics Inc, que permite almacenar datos para cálculos rápidos, que registra los movimientos de la mesa en el plano de medida, lo que nos permite con mayor facilidad y de manera más fiable obtener los datos requeridos.



Fig. 4.53. Visualizador Quadra-Chek 200.



## 5.- Resultados

En este apartado se mostraran los datos obtenidos con las distintas máquinas de medida utilizadas, así como los resultados que de los datos se obtienen.

### 5.1.- Datos obtenidos

#### Verificación del perfil del diente

A diferencia del resto de características medidas del engranaje, el perfil de evolvente no disponía de un programa asignado para el cálculo de su error. Por ello se explica el procedimiento utilizado para la obtención de los datos que se utilizarán en este estudio de cara a esta característica.

Los pasos que se realizaron para la verificación del diente fueron los siguientes:

- Insertar el perfil del diente a verificar en el archivo autocad donde se encuentra el engranaje ideal.
- Superponer ambos perfiles (Fig. 5.1), para ello, en cada perfil del diente se anotaron las coordenadas del centro del engranaje para hacerlos coincidir con el centro del engranaje ideal.

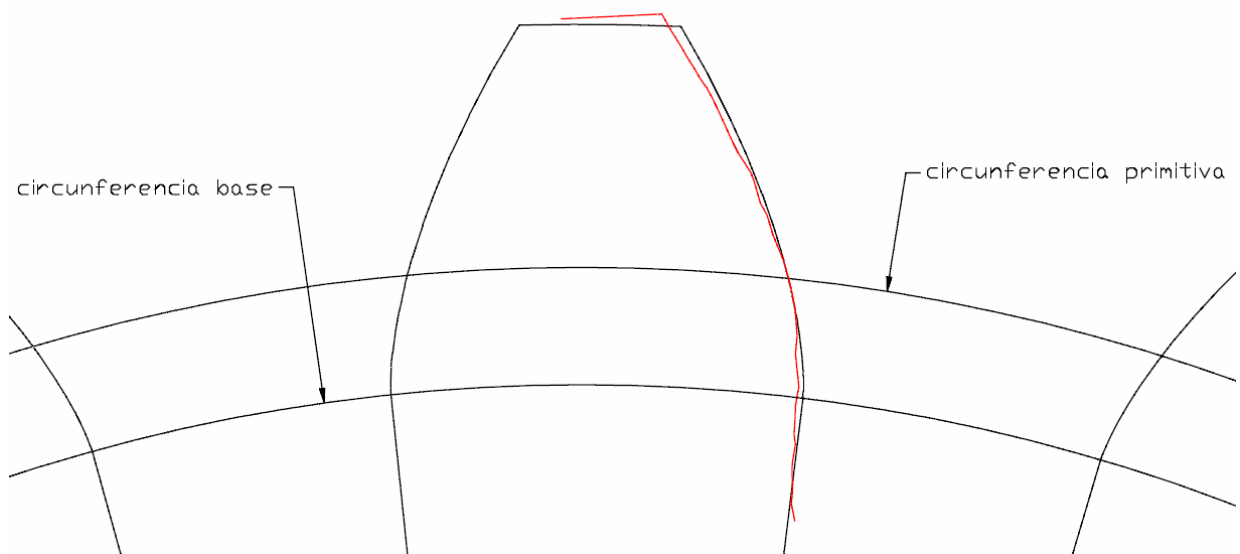


Fig. 5.1 Superposición de perfil ideal y perfil medido.



- Girar el perfil del diente a verificar hasta que el punto de corte con la circunferencia primitiva coincida con el del ideal.
- El error del perfil, es la diferencia positiva o negativa que existe entre el perfil del diente a verificar con el ideal. Para hallar el respectivo error se toma como cero de origen la intersección del perfil y de la circunferencia primitiva del engranaje ideal.
- El error negativo del perfil se determina desde el punto de intersección de la circunferencia primitiva con el perfil del engranaje ideal hasta la trocoide o raíz del diente.
- El error positivo del perfil se determina desde el punto de intersección de la circunferencia primitiva con el perfil del engranaje ideal hasta la parte superior del perfil del flanco del diente (evolvente).

El principio que se utiliza para la verificación del perfil de evolvente del diente es el siguiente:

- Por cada punto del perfil medido, se dibuja una línea que pasa por ese punto y es tangente a la circunferencia base (Fig. 5.2).

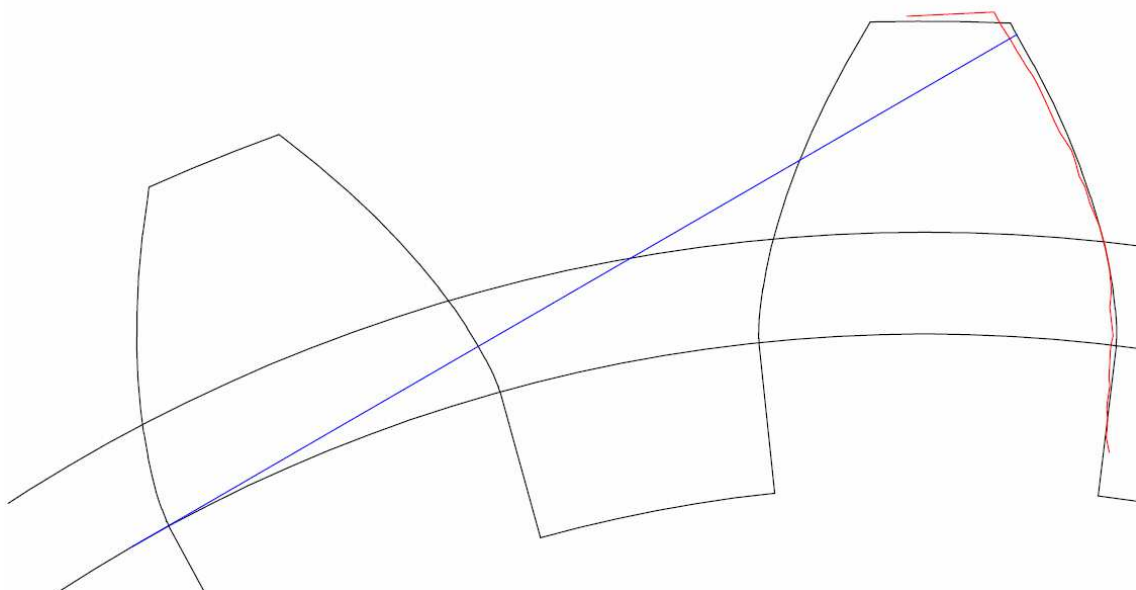


Fig. 5.2 Tangente (azul) a la circunferencia base que pasa por un punto medido.

- El error de perfil es la distancia entre el punto medido y el punto que forman la intersección de la tangente con el perfil teórico.

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla (todos los datos se encuentran expresados en milímetros):

Diente 1	Diente 2	Diente 3	Diente 4	Diente 5	Diente 6	Diente 7	Diente 8
0,0915	0,1412	0,1577	0,0338	0,0679	0,0397	0,0844	0,2374
0,0917	0,1474	0,1327	0,0285	0,0893	0,0965	0,1032	0,2026
0,09	0,1477	0,1497	0,0325	0,0909	0,086	0,1164	0,2093
0,1077	0,1666	0,1326	0,0288	0,0845	0,1043	0,1194	0,2121
0,1151	0,1492	0,1172	0,023	0,0804	0,0836	0,1045	0,2001
0,0928	0,1411	0,1028	0,0162	0,0611	0,0658	0,0847	0,1863
0,0918	0,1044	0,0884	0,0281	0,0698	0,0627	0,0796	0,1142
0,0984	0,0818	0,1083	0,037	0,0638	0,0587	0,0692	0,1328
0,086	0,0983	0,0761	0,0408	0,0662	0,048	0,0712	0,1452
0,0768	0,0893	0,0878	0,0365	0,0592	0,0508	0,0648	0,152
0,0699	0,1036	0,0878	0,0364	0,0226	0,0426	0,0496	0,1406
0,0581	0,0929	0,082	0,0343	0,0163	0,0237	0,05	0,1362
0,0523	0,0984	0,065	0,0444	0,0252	0,0041	0,0507	0,1271
0,0422	0,0755	0,0732	0,0417	0,0317	0,0173	0,0466	0,1226
0,0293	0,0557	0,0633	0,0314	0,0062	0,0151	0,0507	0,0902
0,0044	0,0582	0,0477	0,0405	0,0039	0,0273	0,0387	0,0452
0,0065	0,0376	0,0058	0,0517	0,001	0,013	0,0092	0,0066
0	0,0412	0,0102	0,0501	0,0021	0,0051	0,0133	0,0219
0,0069	0,0068	0,0036	0,0469	0,0027	0,0056	0,0068	0,0653
0	0	0	0,0676	0,0156	0,0227	0,0037	0,0026
0,0143	0,0061	0,0098	0,057	0,0275	0,0169	0,0224	0,0033
0,0201	0,0177	0,0053	0,0299	0,0204	0,015	0,0173	0,0063
0,0837	0,0091	0,0044	0,025	0,0539	0,0492	0,0324	0,0401
0,0719	0,283	0,0079	0,0984	0,0532	0,0755	0,0079	0,0437
0,059	0,0052	0,0111	0,0887	0,0543	0,0749	0,0097	0,0217
0,0508	0,0076	0,0249	0,1055	0,0646	0,0967	0,0192	0,016
0,0227	0,024	0,0313	0,1434	0,0502	0,0881	0,0105	0,0426
0,0077	0,0129	0,0261	0,0953	0,035	0,088	0,0252	0,017
0,032	0,0216	0,0128	0,0906	0,0177	0,0607	0,0063	0,0235
0,0318	0,0394	0,0041	0,043	0,0175	0,0576	0,018	0,0618
0,058	0,0415	0,0173	0,0569	0,0162	0,0596	0,0195	0,067
	0,051	0,0161	0,0375	0,0212	0,0531	0,0277	0,1847
	0,0611	0,0421		0,0119	0,0185	0,0303	0,1208
		0,0766		0,0165	0,0186	0,0417	0,1233
				0,0138	0,0488	0,0487	
Diente 9	Diente 10	Diente 11	Diente 12	Diente 13	Diente 14	Diente 15	Diente 16
0,0538	0,0423	0,1019	0,0667	0,1163	0,1313	0,1144	0,1209
0,1275	0,0961	0,0599	0,021	0,1136	0,1134	0,1257	0,1201
0,1476	0,1255	0,0593	0,0202	0,088	0,104	0,1175	0,1115
0,1124	0,1205	0,0762	0,0384	0,097	0,0666	0,1162	0,1059
0,1211	0,1234	0,074	0,0082	0,0987	0,06	0,1161	0,0868
0,0797	0,1351	0,0385	0,0106	0,0996	0,0646	0,1074	0,0841
0,101	0,119	0,0567	0,0112	0,0963	0,0655	0,1121	0,0868
0,1242	0,0963	0,0532	0,0008	0,0805	0,0785	0,0742	0,0913

0,1081	0,11	0,0534	0,0225	0,0716	0,0533	0,063	0,0954
0,1132	0,0951	0,0528	0,0247	0,0408	0,066	0,0656	0,0884
0,1095	0,0751	0,0323	0,0089	0,0385	0,0756	0,067	0,0339
0,0697	0,0853	0,0326	0,0255	0,0294	0,0759	0,0578	0,0354
0,0755	0,0838	0,0257	0,0363	0,0205	0,0688	0,061	0,0603
0,0144	0,0812	0,0416	0,0603	0,0353	0,0328	0,0512	0,032
0,0034	0,076	0,0264	0,0522	0,0032	0,0348	0,028	0,0396
0	0,0317	0,0072	0,0504	0,0067	0,0258	0,0201	0,0038
0,0126	0,0506	0,0029	0,0736	0,0091	0,0109	0,0106	0,0022
0,0488	0,0043	0,0059	0,0758	0,0297	0,0098	0,0317	0,001
0,106	0,0147	0,0111	0,066	0,0178	0,0162	0,0307	0,0307
0,1132	0,0018	0,0037	0,0074	0,0168	0,0244	0,0032	0,0795
0,0885	0,258	0,0059	0,1116	0,0063	0,0497	0,024	0,0555
0,0234	0,0112	0,0126	0,1069	0,052	0,0549	0,0572	0,077
0,0433	0,015	0,0601	0,1256	0,0558	0,0916	0,062	0,079
0,0354	0,0093	0,0519	0,0822	0,0824	0,0695	0,046	0,0653
0,038	0,0156	0,0305	0,0846	0,0855	0,0979	0,0041	0,0543
0,0247	0,0482	0,009	0,0798	0,0587	0,0897	0,0079	0,0245
0,0901	0,0058	0,0204	0,0752	0,0629	0,0634	0,0079	0,0324
0,0093	0,0096	0,0205	0,0945	0,0457	0,0608	0,009	0,0255
0,0031	0,105	0,0111	0,1316	0,0097	0,0631	0,0428	0,0069
0,0138	0,126	0,0246	0,1397	0,0101	0,0664	0,1033	0,0059
0,0035	0,0369	0,0333	0,1609	0,0117	0,0086	0,146	0,0132
0,0123	0,0376	0,0404	0,143	0,0243	0,0284	0,1718	0,0145
		0,0377	0,1411	0,0346	0,0139	0,1769	0,0834
		0,0656	0,1452				
			0,1614				

## Diámetro del agujero

El diámetro del agujero del engranaje se ha medido de 4 formas distintas, de 3 formas con la máquina de medida 3D y de otra con el proyector de perfiles.

El diámetro del agujero tomando 5 puntos de la circunferencia en la máquina de medida 3D tiene los siguientes datos:

Pieza	Dagj
1	20,51 mm
2	20,513 mm
3	20,519 mm
4	22,014 mm
5	22,006 mm
6	22,01 mm
7	21,992 mm
8	22,019 mm
9	22,002 mm
10	22,021 mm
11	22,035 mm

El diámetro del agujero tomando 4 puntos de la circunferencia en la máquina de medida 3D tiene los siguientes datos:

Pieza	Dagj
1	20,515 mm
2	20,515 mm
3	20,52 mm
4	21,973 mm
5	22,024 mm
6	22,015 mm
7	22,008 mm
8	22,01 mm
9	21,995 mm
10	22,017 mm
11	22,016 mm

El diámetro del agujero utilizando la sección del cilindro que forma el hueco del agujero interior del engranaje en la máquina de medida 3D tiene los siguientes datos:

Pieza	Dagj
1	20,515 mm
2	20,102 mm
3	20,515 mm
4	22,027 mm
5	21,991 mm
6	22,043 mm
7	22,006 mm
8	22,027 mm
9	21,998 mm
10	22,029 mm
11	21,997 mm

El diámetro del agujero medido a través del proyector de perfiles utilizando 5 puntos de referencia tiene los siguientes datos:

Pieza	Dagj
1	21,972 mm
2	21,994 mm
3	22,027 mm
4	22,062 mm
5	22,125 mm
6	22,037 mm
7	21,937 mm
8	22,037 mm
9	21,994 mm
10	22,015 mm
11	22,003 mm

## Diámetro Exterior

El diámetro exterior del engranaje se ha medido de 4 formas distintas, de 3 formas con la máquina de medida 3D y de otra con el proyector de perfiles.

El diámetro exterior tomando 5 puntos de la circunferencia en la máquina de medida 3D tiene los siguientes datos:

Pieza	Dext
1	55,498 mm
2	55,51 mm
3	55,504 mm
4	54,011 mm
5	53,98 mm
6	54,018 mm
7	54,009 mm
8	53,996 mm
9	54,014 mm
10	53,998 mm
11	54,002 mm

El diámetro exterior tomando 4 puntos de la circunferencia en la máquina de medida 3D tiene los siguientes datos:

Pieza	Dext
1	55,492 mm
2	55,508 mm
3	55,498 mm
4	54,013 mm
5	54,009 mm
6	54,002 mm
7	53,985 mm
8	53,995 mm
9	54,016 mm
10	53,979 mm
11	54,017 mm

El diámetro exterior utilizando la sección del cilindro que forma el exterior del engranaje en la máquina de medida 3D tiene los siguientes datos:

Pieza	Dext
1	55,495 mm
2	55,506 mm
3	55,482 mm
4	53,978 mm
5	54,021 mm
6	54,012 mm
7	54,011 mm
8	54,024 mm
9	54,028 mm
10	53,998 mm
11	54,004 mm

El diámetro exterior medido a través del proyector de perfiles utilizando 5 puntos de referencia tiene los siguientes datos:

Pieza	Dext
1	54,088 mm
2	54,087 mm
3	53,961 mm
4	53,941 mm
5	53,8 mm
6	53,86 mm
7	53,991 mm
8	53,944 mm
9	54,003 mm
10	53,973 mm
11	53,958 mm

## **Anchura del engranaje**

La anchura del engranaje se ha medido de 2 formas distintas, una con cada máquina de medida.

La anchura del engranaje utilizando la máquina de medida 3D mediante la distancia entre 2 rectas contenidas en 2 planos paralelos tiene los siguientes datos:

Pieza	Anchura
1	15,015 mm
2	15,015 mm
3	15,021 mm
4	15,063 mm
5	15,106 mm
6	15,044 mm
7	15,072 mm
8	15,016 mm
9	15,032 mm
10	15,109 mm
11	15,005 mm

La anchura del engranaje utilizando el proyector de perfiles mediante la distancia de 2 rectas paralelas tiene los siguientes datos:

Pieza	Anchura
1	14,938 mm
2	14,952 mm
3	14,978 mm
4	14,938 mm
5	14,961 mm
6	14,844 mm
7	14,945 mm
8	14,984 mm
9	14,903 mm
10	14,856 mm
11	14,899 mm

Los datos obtenidos de la máquina de medida 3D se tomaron a 25°C. Mientras que los datos obtenidos del proyector de perfiles se tomaron a 21°C.

### **Pieza por control numérico**

De la pieza por control numérico se han obtenido los siguientes datos a través de la máquina de medida 3D:



Pieza	Conicidad					Radio de curvatura	
	ángulo del cono	intervalo forma del cono	Dsup	Dinf	error	radio	error
1	14.8406 °	0,019	15,335mm	20,539mm	0,034	2,04mm	0,001
2	15.6428 °	0,019	15,548mm	20,517mm	0,007	2,016mm	0,001
3	14.2189 °	0,017	15,432mm	20,504mm	0	2,015mm	0,007
4	14.8478 °	0,026	15,532mm	20,501mm	0,009	2,04mm	0,012
5	14.6506 °	0,011	15,234mm	20,53mm	0	2,015mm	0
6	14.6506 °	0,011	15,325mm	20,503mm	0,003	2,022mm	0,001
7	14.3767 °	0,018	15,456mm	20,497mm	0,034	2,007mm	0
8	14.6756 °	0,007	15,503mm	20,505mm	0,005	2,012mm	0,001
9	14.5034 °	0,045	15,338mm	20,476mm	0,002	2,028mm	0
10	14.6828 °	0,009	15,671mm	20,485mm	0,003	2,029mm	0
11	14.6978 °	0,011	15,659mm	20,484mm	0,001	2,014mm	0,001
12	14.6372 °	0,005	15,82mm	20,48mm	0,002	2,023mm	0,001
13	14.6006 °	0,001	15,821mm	20,468mm	0,011	2,019mm	0,002
14	14.6200 °	0,003	15,82mm	20,518mm	0,003	2,01mm	0,001
15	14.6606 °	0,012	15,81mm	20,48mm	0,001	1,97mm	0,006
16	14.6783 °	0,004	15,807mm	20,483mm	0	1,988mm	0,019
17	14.4039 °	0,001	15,863mm	20,49mm	0,003	2,026mm	0,001
18	14.6933 °	0,002	15,81mm	20,481mm	0,005	2,012mm	0,001
19	14.6872 °	0,009	15,809mm	20,491mm	0,001	2,016mm	0,001
20	14.5944 °	0,009	15,821mm	20,493mm	0,003	2,004mm	0,006

## 5.2.- Cálculo de la capacidad

Como se ha visto en el apartado 2.2., uno de los indicadores de la capacidad que se va a emplear es el indicador de capacidad simple, que sigue la siguiente fórmula:

$$Cap = Cp = \frac{\text{intervalo de tolerancia}}{\text{dispersión global del proceso}} = \frac{IT}{6\sigma}$$

Como se ha mostrado este indicador se utiliza generalmente para leyes de distribución normales.

Según esta fórmula, para saber si un proceso puede tener la capacidad justa, sin tener en cuenta que el proceso pueda estar descentrado, el intervalo de tolerancia y la dispersión global del proceso deberían ser iguales, o lo que es lo mismo,

Cap = 1; sin embargo, se podrá tener capacidad suficiente siempre y cuando el intervalo de tolerancia sea mayor que la dispersión global del proceso lo que se consigue si se cumple la relación de Cap > 1.

Aún así, suele tomarse un margen de seguridad para tener una mayor certeza, por lo que se tomará la siguiente relación para este estudio: Cap > 1.33.

Otro indicador de capacidad que se ha explicado en el apartado 2.2., es el indicador de la capacidad para procesos centrados, el cual sigue las siguientes fórmulas:

$$Cpk- = \frac{\text{media} - \text{tolerancia inferior}}{3\sigma}$$
$$Cpk+ = \frac{\text{tolerancia superior} - \text{media}}{3\sigma}$$

Este indicador también se utiliza para leyes de distribución normales.

Este indicador tiene dos fórmulas debido a que la distribución global del proceso se divide en dos partes a partir de la cota nominal. Estas fórmulas indican las capacidades de esas dos partes y si el proceso está centrado o no. De esta forma se puede conocer en qué dirección está descentrado el proceso y, si lo está, si es necesario un reglaje del proceso.

Al igual que en el indicador anterior, para una capacidad justa se tendrá Cpk- = 1 y Cpk+ = 1, de la misma forma, se necesita una capacidad suficiente, porque si el proceso se desvía lo más mínimo, obtendremos casi de inmediato piezas defectuosas; lo que determina las siguientes relaciones: Cpk- > 1 y Cpk+ > 1.

Para operar con este indicador, se considerará la relación que sea menor, es decir, si, por ejemplo, se da el caso de que Cpk- es menor que Cpk+ se trabajará con Cpk-; y si ocurre al contrario, se trabajará con Cpk+.

Para un reglaje ideal se debería cumplir lo siguiente:  $Cap = Cpk$ .

La dispersión global de proceso es  $6\sigma$  y  $\sigma$  es desviación tipo de la muestra que viene dada por la siguiente fórmula estadística:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X_i - m)^2}{N}} = \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{N} - m^2}$$

### ***5.2.1.- Cálculo de capacidad de las máquinas herramienta***

Para el cálculo de la capacidad es necesario conocer la dispersión de las medidas, por ello se calculan a continuación las medias y las desviaciones estándar de cada conjunto de medidas obtenidos por los distintos métodos.

Y puesto que se desconoce el intervalo de tolerancia del engranaje para cada una de sus características, lo que se perseguirá en estos cálculos es saber para qué intervalos tenemos o podemos tener capacidad o no.

## Perfil de evolvente

En primer lugar se selecciona el valor más alto de error de perfil de cada diente.

Y con estos datos mostrados en la siguiente tabla es con los que se opera.

Diente	Error máximo
1	0.1151 mm
2	0.1666 mm
3	0.1577 mm
4	0.0984 mm
5	0.0909 mm
6	0.1043 mm
7	0.1194 mm
8	0.2374 mm
9	0.1476 mm
10	0.1351 mm
11	0.1019 mm
12	0.1609 mm
13	0.1163 mm
14	0.1313 mm
15	0.1769 mm
16	0.1209 mm

A continuación se calcula la desviación tipo y la media para esta característica:

$$\sigma = 0.0363 \text{ mm}$$

$$m = 0.1363 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.2178 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow IT > \mathbf{0.2897 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow IT > \mathbf{0.2178 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow TI < \mathbf{0.0274 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow TS > \mathbf{0.2452 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow IT > \mathbf{0.2897 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI \rightarrow TI < \mathbf{-0.008537 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m \rightarrow TS > \mathbf{0.2811 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

No se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

## Diámetro del agujero

Como primer paso se muestran los datos en forma de tabla para los distintos métodos de medidas:

Pieza	5 pts. - 3D	4 pts. - 3D	Sección - 3D	Proyector
1	20,51 mm	20,515 mm	20,515 mm	21,972 mm
2	20,513 mm	20,515 mm	20,102 mm	21,994 mm
3	20,519 mm	20,52 mm	20,515 mm	22,027 mm
4	22,014 mm	21,973 mm	22,027 mm	22,062 mm
5	22,006 mm	22,024 mm	21,991 mm	22,125 mm
6	22,01 mm	22,015 mm	22,043 mm	22,037 mm
7	21,992 mm	22,008 mm	22,006 mm	21,937 mm
8	22,019 mm	22,01 mm	22,027 mm	22,037 mm
9	22,002 mm	21,995 mm	21,998 mm	21,994 mm
10	22,021 mm	22,017 mm	22,029 mm	22,015 mm
11	22,035 mm	22,016 mm	21,997 mm	22,003 mm

Como se puede apreciar, las 3 primeros valores del método de 5 puntos, el método de 4 puntos y el método de la sección utilizados en la máquina de medida 3D no concuerdan con el resto de valores obtenidos en cada método, esto puede ser debido a un error de sujeción de la pieza o un error de calibración de la máquina de medida; por ello no se utilizaran dichas medidas en los cálculos.

A continuación se calcula la desviación tipo y la media de la muestra para cada método de medida.

### Método de 5 puntos en la máquina de medida 3D:

$$\sigma = 0.012257 \text{ mm}$$

$$m = 22.01238 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow IT > \mathbf{0.0735 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow IT > \mathbf{0.0978 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow IT > \mathbf{0.0735 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow TI < \mathbf{21.9756 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow TS > \mathbf{22.0492 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow IT > \mathbf{0.0978 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI \rightarrow TI < \mathbf{21.9635 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m \rightarrow TS > \mathbf{22.0613 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de Cap y Cpk puesto que idealmente debería cumplirse que Cap = Cpk.

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

#### **Método de 4 puntos en la máquina de medida 3D:**

$$\sigma = 0.01518 \text{ mm}$$

$$m = 22.00725 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un Cap > 1 se tendrá lo siguiente:

$$\text{Cap} \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0911 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un Cap > 1.33 se tendrá lo siguiente:

$$\text{Cap} \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.1211 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.



Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} Cap \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.0911 \text{ mm}} \\ Cpk- \rightarrow & 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 21.9617 \text{ mm}} \\ Cpk+ \rightarrow & 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 22.0528 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} Cap \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.1211 \text{ mm}} \\ Cpk- \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 21.9467 \text{ mm}} \\ Cpk+ \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 22.0678 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

### Método de la sección en la máquina de medida 3D:

$$\sigma = 0.01781 \text{ mm}$$

$$m = 22.01475 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.1069 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.1421 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.1069 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 21.9613 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 22.0682 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lcl} \text{Cap} \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.1421 \text{ mm}} \\ \text{Cpk-} \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 21.9437 \text{ mm}} \\ \text{Cpk+} \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 22.0858 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

### **Mediante el proyector de perfiles:**

$$\sigma = 0.046951 \text{ mm}$$

$$m = 22.01845 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$\text{Cap} \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \quad \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.2817 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow IT > \mathbf{0.3747 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow IT > \mathbf{0.2817 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow TI < \mathbf{21.8776 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow TS > \mathbf{22.1593 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow IT > \mathbf{0.3747 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI \rightarrow TI < \mathbf{21.8311 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m \rightarrow TS > \mathbf{22.2058 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

Se puede apreciar una variación significativa en los resultados del caso de los datos obtenidos con el proyector de perfiles, esto puede ser debido a un error en la fijación de la pieza a la hora de realizar las mediciones o un error de enfoque de la pieza.

Los datos obtenidos con la máquina de medida 3D son todos del mismo orden, y por consiguiente los resultados también. Esta diferencia con los datos obtenidos por medio del proyector de perfiles puede ser debido a un error metódico en alguna de las dos máquinas de medida. En este caso se puede tomar el caso más desfavorable como representante de la capacidad del proceso y así no disminuir la calidad de las piezas una vez se tomen las decisiones pertinentes. En el apartado de conclusiones se desarrollará esta cuestión.

## Diámetro Exterior

Al igual que en el caso anterior se empieza por mostrar los datos de los distintos métodos en una tabla para poder hallar las medias y las desviaciones estándar de los distintos métodos para trabajar con ellos.

Pieza	5 pts. - 3D	4 pts. - 3D	Sección - 3D	Proyector
1	55,498 mm	55,492 mm	55,495 mm	54,088 mm
2	55,51 mm	55,508 mm	55,506 mm	54,087 mm
3	55,504 mm	55,498 mm	55,482 mm	53,961 mm
4	54,011 mm	54,013 mm	53,978 mm	53,941 mm
5	53,98 mm	54,009 mm	54,021 mm	53,8 mm
6	54,018 mm	54,002 mm	54,012 mm	53,86 mm
7	54,009 mm	53,985 mm	54,011 mm	53,991 mm
8	53,996 mm	53,995 mm	54,024 mm	53,944 mm
9	54,014 mm	54,016 mm	54,028 mm	54,003 mm
10	53,998 mm	53,979 mm	53,998 mm	53,973 mm
11	54,002 mm	54,017 mm	54,004 mm	53,958 mm

Como se puede apreciar, los 3 primeros datos de los métodos de empleados en la máquina 3D, no concuerdan con el resto de las series, esto puede ser debido a un error de sujeción de la pieza o un error de calibración de la máquina de medida; por ello no se utilizarán dichas medidas en los cálculos, ya que si se incluyen en los cálculos, falsearán los resultados.

A continuación se calcula la desviación tipo y la media de la muestra para los datos obtenidos por el **método de 5 puntos en la máquina de medida 3D**.

$$\sigma = 0.011446 \text{ mm}$$

$$m = 54,0035 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0687 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.0913 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0687 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 53.9692 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 54.0378 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{llll} Cap & \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow & IT > \mathbf{0.0913 \text{ mm}} \\ Cpk- & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow & TI < \mathbf{53.9578 \text{ mm}} \\ Cpk+ & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow & TS > \mathbf{54.0492 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

A continuación se calcula la desviación tipo y la media de la muestra para los datos obtenidos por el **método de 4 puntos en la máquina de medida 3D**.

$$\sigma = 0.0135 \text{ mm}$$

$$m = 54,002 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow IT > \mathbf{0.081 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.1077 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.081 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 53.9615 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 54.0425 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.1077 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 53.9481 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 54.0559 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .



Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

A continuación se calcula la desviación tipo y la media de la muestra para los datos obtenidos por el **método de la sección en la máquina de medida 3D**.

$$\sigma = 0.015199 \text{ mm}$$

$$m = 54,0095 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0911 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.1213 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{llll} Cap & \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma & \rightarrow & IT > \mathbf{0.0911 \text{ mm}} \\ Cpk- & \rightarrow & 3\sigma > m - TI & \rightarrow & TI < \mathbf{53.9639 \text{ mm}} \\ Cpk+ & \rightarrow & 3\sigma > TS - m & \rightarrow & TS > \mathbf{54.0551 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{llll} Cap & \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow & IT > \mathbf{0.1213 \text{ mm}} \\ Cpk- & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow & TI < \mathbf{53.9489 \text{ mm}} \\ Cpk+ & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow & TS > \mathbf{54.0701 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

A continuación se calcula la desviación tipo y la media de la muestra para los datos obtenidos en el **proyector de perfiles**.

$$\sigma = 0.08063 \text{ mm}$$

$$m = 53.9642 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.4839 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.6434 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.4839 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 53.7223 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 54.2061 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{llll} \text{Cap} & \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow & \mathbf{IT > 0.6434 \text{ mm}} \\ \text{Cpk-} & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow & \mathbf{TI < 53.6425 \text{ mm}} \\ \text{Cpk+} & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow & \mathbf{TS > 54.2859 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

Los datos obtenidos con la máquina de medida 3D son todos del mismo orden, y por consiguiente los resultados también. Esta diferencia con los datos obtenidos por medio del proyector de perfiles puede ser debido a un error metódico en alguna de las dos máquinas de medida. En este caso se puede tomar el caso más desfavorable como representante de la capacidad del proceso y así no disminuir la calidad de las piezas una vez se tomen las decisiones pertinentes. En el apartado de conclusiones se desarrollará esta cuestión.

## **Anchura del engranaje**

Al igual que en los casos anteriores se comienza por presentar en forma de tabla los datos obtenidos para poder hallar las medias y las desviaciones estándar de los datos obtenidos por los distintos métodos y calcular los límites de tolerancia.

Pieza	3D	Proyector
1	15,015 mm	14,938 mm
2	15,015 mm	14,952 mm
3	15,021 mm	14,978 mm
4	15,063 mm	14,938 mm
5	15,106 mm	14,961 mm
6	15,044 mm	14,844 mm
7	15,072 mm	14,945 mm
8	15,016 mm	14,984 mm
9	15,032 mm	14,903 mm
10	15,109 mm	14,856 mm
11	15,005 mm	14,899 mm

A continuación se calcula la desviación estándar y la media de la muestra de los datos obtenidos mediante la **máquina de medida 3D**.

$$\sigma = 0.03549 \text{ mm}$$

$$m = 15.0453 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.2129 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.2832 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} \text{Cap} \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.2129 \text{ mm}} \\ \text{Cpk-} \rightarrow & 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 14.9388 \text{ mm}} \\ \text{Cpk+} \rightarrow & 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 15.1518 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} \text{Cap} \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.2832 \text{ mm}} \\ \text{Cpk-} \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 14.9037 \text{ mm}} \\ \text{Cpk+} \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 15.1869 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

A continuación se calcula la desviación estándar y la media de la muestra de los datos obtenidos mediante el **proyector de perfiles**.

$$\sigma = 0.0442 \text{ mm}$$

$$m = 14.9271 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.2652 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.3527 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.2652 \text{ mm}}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 14.7945 \text{ mm}}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 15.0597 \text{ mm}}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{llll} Cap & \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow & IT > \mathbf{0.3527 \text{ mm}} \\ Cpk- & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow & TI < \mathbf{14.7507 \text{ mm}} \\ Cpk+ & \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow & TS > \mathbf{15.1035 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Como en el cálculo anterior, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

En esta característica ambos resultados son del mismo orden, lo que puede indicar que no se han cometido errores en la medida de la misma. Esto también se desarrollará más adelante en el apartado correspondiente.

### ***5.2.2.- Cálculo de capacidad del centro de mecanizado***

En este apartado se calcula la capacidad sobre la conicidad de la parte troncocónica de la pieza fabricada en el centro de mecanizado, así como la capacidad sobre el radio de curvatura de la muesca de la misma pieza.

## **Conicidad**



Teniendo en cuenta que la conicidad se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$c = \frac{D_2 - D_1}{h}$$

Donde  $c$  es la conicidad,  $D_2$  es uno de los diámetros del tronco del cono,  $D_1$  es el otro diámetro del tronco del cono y  $h$  es la altura del tronco del cono.

Y teniendo en cuenta que el ángulo del cono cumple la siguiente ecuación:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{c}{2}$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo del cono.

En primer lugar se obtienen las tangentes de los ángulos del cono medidos, para, a continuación, multiplicar los resultados por 2. Con esto, se habrán obtenido las conicidades de cada pieza, restando hacer la media aritmética y calcular la desviación tipo.

Pieza	Ángulo del cono	Tan $\alpha$	Tan $\alpha \times 2$
1	14.8406°	0.2650	0.5300
2	15.6428°	0.2800	0.5600
3	14.2189°	0.2534	0.5068
4	14.8478°	0.2651	0.5302
5	14.6506°	0.2614	0.5228
6	14.6506°	0.2614	0.5228
7	14.3767°	0.2563	0.5126
8	14.6756°	0.2619	0.5238
9	14.5034°	0.2587	0.5174
10	14.6828°	0.2620	0.5240
11	14.6978°	0.2623	0.5246
12	14.6372°	0.2612	0.5224
13	14.6006°	0.2605	0.5210
14	14.6200°	0.2608	0.5216
15	14.6606°	0.2616	0.5232
16	14.6783°	0.2619	0.5238
17	14.4039°	0.2568	0.5136
18	14.6933°	0.2622	0.5244
19	14.6872°	0.2621	0.5242
20	14.5944°	0.2604	0.5208

$$\sigma = 0.009936$$

$$m = 0.5235$$

Ahora se ha de calcular el intervalo de tolerancias de la conicidad, para ello se dan valores a los parámetros que intervienen en la fórmula de la conicidad dependiendo de cómo maximizar o minimizar la tolerancia. De esta forma se obtienen los siguientes valores:

$$T_s = 0.5152 \quad T_i = 0.4851 \quad c = 0.5_{-0.015}^{+0.015}$$

Para el caso de requerir únicamente el indicador de capacidad simple se tendría lo siguiente:

$$Cap = \frac{IT}{6\sigma} = \frac{0.03}{0.05962} = \mathbf{0.5032}$$

En este caso no se cumple la premisa de  $Cap > 1$ , y mucho menos la premisa de coeficiente de seguridad de  $Cap > 1.33$ , lo que indica que no se puede tener capacidad suficiente para este proceso.

Para el caso de requerir de los indicadores de capacidad centrada se tendría lo siguiente:

$$Cpk- = \frac{m - T_i}{3\sigma} = \frac{0.5235 - 0.4851}{0.002981} = \mathbf{12.8816}$$

$$Cpk+ = \frac{T_s - m}{3\sigma} = \frac{0.5152 - 0.5235}{0.002981} = \mathbf{-2.7843}$$

Esto daría un  $Cpk = -2.7843$ , lo cual no cumple con la relación necesaria para tener capacidad suficiente:  $Cpk > 1$ , y menos aún con la relación que incluye el coeficiente de seguridad:  $Cpk > 1.33$ , lo que indica que el proceso no tiene capacidad suficiente y que el proceso está descentrado en dirección al límite de tolerancia superior.

Para el caso de necesitar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes se tendría lo siguiente:

$$C_{pm} = \frac{C_{ap}}{\sqrt{1 + 9 \times (C_{ap} - C_{pk})^2}} = \frac{0.5032}{\sqrt{1 + 9 \times (0.5032 - -2.7843)^2}} = 0.05076$$

En este caso tampoco se cumpliría la premisa, con o sin coeficiente de seguridad, que indicarían una capacidad suficiente para este proceso y característica

En el apartado de conclusiones se desarrollarán estos resultados.

## Radio de curvatura

En este apartado se calcula la capacidad del centro de mecanizado para producir las piezas dadas en relación con el radio de curvatura de la muesca.

Pieza	Radio
1	2,04 mm
2	2,016 mm
3	2,015 mm
4	2,04 mm
5	2,015 mm
6	2,022 mm
7	2,007 mm
8	2,012 mm
9	2,028 mm
10	2,029 mm
11	2,014 mm
12	2,023 mm
13	2,019 mm
14	2,01 mm
15	1,97 mm
16	1,988 mm
17	2,026 mm
18	2,012 mm
19	2,016 mm
20	2,004 mm

En primer lugar se calculan tanto la media aritmética como la desviación tipo de la muestra:

$$\sigma = 0.0156 \text{ mm}$$

$$m = 2.0153 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta que las tolerancias para esta medida son de +0.025 y -0.025, ambas expresadas en milímetros, se puede empezar a calcular la capacidad para esta característica:

Para el caso de que sólo se necesite el indicador de capacidad simple se tendrá lo siguiente:

$$Cap = \frac{IT}{6\sigma} = \frac{0.05}{0.0936} = \mathbf{0.5342}$$

Este resultado no cumple con la relación de  $Cap > 1$ , y mucho menos con la relación que incluye el coeficiente de seguridad  $Cap > 1.33$ , por lo que este proceso no puede tener la capacidad suficiente.

Para el caso de ser necesarios los índices de capacidad centrada se tendrá lo siguiente:

$$Cpk_{-} = \frac{m - T_i}{3\sigma} = \frac{2.0153 - 1.975}{0.0468} = \mathbf{0.8611}$$

$$Cpk_{+} = \frac{T_s - m}{3\sigma} = \frac{2.025 - 2.0153}{0.0468} = \mathbf{0.2073}$$

Esto daría un  $Cpk = 0.2073$ , lo cual no cumple con la relación necesaria para tener capacidad suficiente:  $Cpk > 1$ , y menos aún con la relación que incluye el coeficiente de seguridad:  $Cpk > 1.33$ , lo que indica que el proceso no tiene capacidad suficiente y que el proceso está descentrado en dirección al límite de tolerancia superior.

Para el caso de necesitar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes se tendría lo siguiente:

$$C_{pm} = \frac{Cap}{\sqrt{1 + 9 \times (Cap - C_{pk})^2}} = \frac{0.5342}{\sqrt{1 + 9 \times (0.5342 - 0.2073)^2}} = \mathbf{0.3814}$$

En este caso tampoco se cumpliría la premisa, con o sin coeficiente de seguridad, que indicarían una capacidad suficiente para este proceso y característica

En el apartado de conclusiones se desarrollarán estos resultados.

### **5.3.- Comparación de las capacidades de las máquinas herramienta y el centro de mecanizado**

Dado que el estudio de capacidad ha sido distinto en ambas series y dado que en la serie de piezas fabricadas por el centro de mecanizado no han llegado a una capacidad satisfactoria, se puede obtener el intervalo de tolerancias para el cual, el proceso tiene una capacidad suficiente y así poder comparar las dos series.

#### **Conicidad**

En el apartado anterior ya se calcularon tanto la desviación tipo como la media de la muestra para la conicidad.

$$\sigma = 0.009936$$

$$m = 0.5235$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0596}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.0793}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0596}$$

$$Cpk- \rightarrow 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 0.4937}$$

$$Cpk+ \rightarrow 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 0.5533}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.0793}$$

$$Cpk- \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI \rightarrow \mathbf{TI < 0.4839}$$

$$Cpk+ \rightarrow 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m \rightarrow \mathbf{TS > 0.5631}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

De la misma forma que en cálculos anteriores, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

## Radio de curvatura

En el apartado anterior ya se calcularon tanto la desviación tipo como la media de la muestra para el radio de curvatura de la muesca de la pieza fabricada en el centro de mecanizado

$$\sigma = 0.0156 \text{ mm}$$

$$m = 2.0153 \text{ mm}$$

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple con un  $Cap > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma \rightarrow \mathbf{IT > 0.0936 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar únicamente el índice de capacidad simple pero con un  $Cap > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$Cap \rightarrow \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 \rightarrow \mathbf{IT > 0.1245 \text{ mm}}$$

Si se cumple esta condición el proceso podrá tener capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1$  y un  $Cpk > 1$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} Cap \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1 \rightarrow IT > 6\sigma & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.0936 \text{ mm}} \\ Cpk- \rightarrow & 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 1.9685 \text{ mm}} \\ Cpk+ \rightarrow & 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 2.0621 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

Para el caso de utilizar el índice de capacidad centrada con un  $Cap > 1.33$  y un  $Cpk > 1.33$  se tendrá lo siguiente:

$$\begin{array}{lll} Cap \rightarrow & \frac{IT}{6\sigma} > 1.33 \rightarrow IT > 6\sigma \cdot 1.33 & \rightarrow \quad \mathbf{IT > 0.1245 \text{ mm}} \\ Cpk- \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > m - TI & \rightarrow \quad \mathbf{TI < 1.9531 \text{ mm}} \\ Cpk+ \rightarrow & 1.33 \cdot 3\sigma > TS - m & \rightarrow \quad \mathbf{TS > 2.0775 \text{ mm}} \end{array}$$

Si se cumplen las 3 condiciones el proceso tendrá capacidad suficiente.

De la misma forma que en cálculos anteriores, no se consideran otras combinaciones de  $Cap$  y  $Cpk$  puesto que idealmente debería cumplirse que  $Cap = Cpk$ .

Y puesto que se está calculando el intervalo de tolerancia y los límites de tolerancia a partir de los cuales el proceso tiene capacidad suficiente, no procede utilizar el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes.

Si se utilizaran los indicadores de capacidad simple de máquina y capacidad centrada de máquina los resultados serían exactamente los mismos que sus homónimos, por ello, no se emplean en este estudio.

Los resultados de las características obtenidas mediante las máquinas convencionales se pueden encontrar en el apartado 5.2.1., pero para una mejor



visualización se mostrarán a continuación todos los resultados ordenados por casos en sus correspondientes tablas.

Para el caso de necesitar únicamente el indicador de capacidad simple conjunto a  $Cap > 1$  como criterio de poder tener capacidad suficiente se presenta la siguiente tabla:

		IT >	
Centro de mecanizado	Conicidad	0.0596	
	Radio	0.0936 mm	
Máquinas herramienta convencionales	Perfil	0.2178 mm	
	Dagj	Método de 5 pts.	0.0735 mm
		Método de 4 pts.	0.0911 mm
		Método de sección	0.1069 mm
		Proyector de perfiles	0.2817 mm
	Dext	Método de 5 pts.	0.0687 mm
		Método de 4 pts.	0.081 mm
		Método de sección	0.0911 mm
		Proyector de perfiles	0.4839 mm
	Anchura	Máquina 3D	0.2129 mm
Proyector de perfiles		0.2652 mm	

Como puede observarse, la conicidad es la que tiene un menor intervalo de tolerancia requerido para tener capacidad suficiente, y, dependiendo del método de medida elegido, está seguida por el diámetro exterior, diámetro del agujero, radio de curvatura, anchura del engranaje y perfil de evolvente respectivamente.

Si se toma el caso más desfavorable, el orden quedaría de la siguiente forma: conicidad, radio de curvatura, perfil de evolvente, anchura del engranaje, diámetro del agujero y, finalmente, diámetro exterior.

Teniendo en cuenta que se han podido producir errores sistemáticos en una máquina de medida o en la otra, la elección de uno de los dos casos no está clara. Ya que si se desprecian los resultados obtenidos a partir del proyector de perfiles, y escogiendo para la comparativa el caso más desfavorable, el orden se vería modificado de la siguiente manera: conicidad, diámetro exterior, radio de curvatura, diámetro del agujero, perfil de evolvente y anchura del engranaje.

Para el caso de necesitar únicamente el indicador de capacidad simple conjunto a  $Cap > 1.33$  como criterio de poder tener capacidad suficiente se presenta la siguiente tabla:

		IT >	
Centro de mecanizado	Conicidad	0.0793	
	Radio	0.1245 mm	
Máquinas herramienta convencionales	Perfil	0.2897 mm	
	Dagj	Método de 5 pts.	0.0978 mm
		Método de 4 pts.	0.1211 mm
		Método de sección	0.1421 mm
		Proyector de perfiles	0.3747 mm
	Dext	Método de 5 pts.	0.0913 mm
		Método de 4 pts.	0.1077 mm
		Método de sección	0.1213 mm
		Proyector de perfiles	0.6434 mm
	Anchura	Máquina 3D	0.2832 mm
Proyector de perfiles		0.3527 mm	

En este caso, al ser afectado de un coeficiente de seguridad, la comparativa es la misma que en el caso anterior. Por lo tanto se remite al caso anterior para la discusión de los resultados.

Para el caso de necesitar los indicadores de capacidad centrada conjunto a  $Cpk > 1$  como criterio de capacidad suficiente se presenta la siguiente tabla:

		IT >	TI <	TS >	
Centro de mecanizado	Conicidad	0.0596	0.4937	0.5533	
	Radio	0.0936 mm	1.9685 mm	2.0621 mm	
Máquinas herramienta convencionales	Perfil	0.2178 mm	0.0274 mm	0.2452 mm	
	Dagj	Método de 5 pts.	0.0735 mm	21.9756 mm	22.0492 mm
		Método de 4 pts.	0.0911 mm	21.9617 mm	22.0528 mm
		Método de sección	0.1069 mm	21.9613 mm	22.0682 mm
		Proyector de perfiles	0.2817 mm	21.8776 mm	22.1593 mm
	Dext	Método de 5 pts.	0.0687 mm	53.9692 mm	54.0378 mm
		Método de 4 pts.	0.081 mm	53.9615 mm	54.0425 mm
		Método de sección	0.0911 mm	53.9639 mm	54.0551 mm
		Proyector de perfiles	0.4839 mm	53.7223 mm	54.2061 mm
	Anchura	Máquina 3D	0.2129 mm	14.9288 mm	15.1518 mm
Proyector de perfiles		0.2652 mm	14.7945 mm	15.0597 mm	

Como puede observarse, si se presta atención al intervalo de tolerancia, las relaciones entre los distintos métodos de medida, del diámetro del agujero, el diámetro exterior y la anchura del engranaje, se mantienen exactamente igual que para el caso de necesitar únicamente el indicador de capacidad simple, ya que el intervalo de tolerancia se obtiene de este indicador. La única diferencia que se obtiene de examinar esta tabla es que, al utilizar el indicador de capacidad centrada, estos datos reflejan que a partir de ellos mismos, el proceso tendrá capacidad suficiente, en lugar de poder tener capacidad suficiente como en el caso anterior.

No se puede utilizar los límites de tolerancia inferior o superior para realizar una comparativa de capacidad, ya que cada una de las características a medir tiene su propio orden de medida y no tiene sentido decir que, por el método de medida de 5 puntos, el diámetro exterior posee el límite de tolerancia inferior más alto y por ello tendría mayor capacidad en ese aspecto o que la conicidad tiene el límite de tolerancia superior más bajo, y por ello tendría mayor capacidad en ese aspecto.

Los criterios siguen siendo los mismos que en los dos casos anteriores y se discutirán en el apartado de conclusiones.

Para el caso de necesitar los indicadores de capacidad centrada conjunto a  $C_{pk} > 1.33$  como criterio de capacidad suficiente se presenta la siguiente tabla:

		IT >	TI <	TS >	
Centro de mecanizado	Conicidad	0.0793	0.4839	0.5631	
	Radio	0.1245 mm	1.9531 mm	2.0775 mm	
Máquinas herramienta convencionales	Perfil	0.2897 mm	-0.00854 mm	0.2811 mm	
	Dagj	Método de 5 pts.	0.0978 mm	21.9635 mm	22.0613 mm
		Método de 4 pts.	0.1211 mm	21.9467 mm	22.0678 mm
		Método de sección	0.1421 mm	21.9437 mm	22.0858 mm
		Proyector de perfiles	0.3747 mm	21.8311 mm	22.2058 mm
	Dext	Método de 5 pts.	0.0913 mm	53.9578 mm	54.0492 mm
		Método de 4 pts.	0.1077 mm	53.9481 mm	54.0559 mm
		Método de sección	0.1213 mm	53.9489 mm	54.0701 mm
		Proyector de perfiles	0.6434 mm	53.6425 mm	54.2859 mm
	Anchura	Máquina 3D	0.2832 mm	14.9037 mm	15.1869 mm
Proyector de perfiles		0.3527 mm	14.7505 mm	15.1035 mm	

Estos datos son equivalentes a los datos del apartado anterior ya que simplemente están afectados de un coeficiente de seguridad, más concretamente de  $C_{pk} > 1.33$  para que se considere una capacidad suficiente, por lo que la comparativa de los resultados es la misma que en el apartado anterior.



## **6.- Conclusiones**

Con los resultados obtenidos en este estudio, así como con el proceso de cálculo utilizado en él se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

El estudio de la capacidad es un buen indicador de la calidad del producto y del estado del proceso, por lo que es muy recomendable utilizarlo para este fin.

La metodología aquí expuesta no requiere de sistemas de cálculo avanzado ni un gran nivel de destreza para llevarla a cabo, lo que facilita su implantación. Aunque la interpretación de los resultados, en contraste, sí que necesita de ciertos conocimientos de los procesos. Esto hace de esta metodología una opción casi necesaria para las pequeñas y medianas empresas, más concretamente en los pequeños talleres, puesto que, la inversión necesaria para la implantación de esta metodología no va más allá de la recogida de datos, que de todas formas es obligatoria para un control de calidad, y una mínima formación por parte de los encargados del control de calidad para realizar los cálculos acorde a las fórmulas dadas y realizar una interpretación válida de los mismos.

Los distintos usos del estudio de capacidad, como comprobar si un proceso está preparado para una futura serie o examinar el estado del reglaje del proceso o las máquinas a la vez que se comprueba la calidad, hacen que sea muy recomendable su implantación.

El beneficio de las pequeñas y medianas empresas se vería realizado al otorgarles un control de calidad regulado que puede ser certificado, sin necesidad de una inversión importante para ello, abriendo el mercado de dichas empresas a la competitividad con las grandes empresas.

Todos los conocimientos sobre las máquinas, tanto herramienta como de medición, mostrado en este estudio no es realmente necesario para un estudio de capacidad, puesto que en los talleres que decidan implementar esta metodología ya poseen los conocimientos necesarios para la utilización de sus máquinas, sin embargo, en este estudio se ha decidido mostrarlos, puesto que un estudio de capacidad puede ser sobre cualquier proceso o máquina y sobre cualquier característica medible, lo cual hace prácticamente indispensable de una

explicación de todos los conceptos para una mejor interpretación de la metodología aquí expuesta.

En otro orden de cosas, y teniendo en cuenta los datos y los resultados obtenidos en el ejemplo práctico que aquí se ha dado, se puede observar que las máquinas convencionales aquí utilizadas no se diferencian tanto del centro de mecanizado por control numérico empleado, teniendo en cuenta la capacidad para ciertas características.

Como se puede apreciar en las tablas del apartado 5.3., la conicidad es la característica que tiene un menor intervalo de tolerancia requerido para tener capacidad suficiente, y, dependiendo del método de medida elegido, en el caso más favorable, está seguida por el diámetro exterior, diámetro del agujero, radio de curvatura, anchura del engranaje y perfil de evolvente respectivamente. Teniendo en cuenta que tanto el diámetro exterior y el diámetro del agujero son características que se han obtenido mediante las máquinas convencionales, podría decirse que las máquinas herramienta del taller de la Escuela de Ingeniería Industrial con sede en Francisco Mendizábal tienen una capacidad comparable al centro de mecanizado del taller de la Escuela de Ingeniería Industrial con sede en Paseo del Cauce, dependiendo de para qué características se utilice.

Caso más favorable	
Característica	Intervalo de tolerancia mínimo
Conicidad (CM)	0.0596
Diámetro exterior (T)	0.0687mm
Diámetro del agujero (T)	0.0735mm
Radio de curvatura (CM)	0.0936mm
Anchura del engranaje (T)	0.2129mm
Perfil de evolvente (F)	0.2178mm
Leyenda: (CM) = Centro de mecanizado, (T) = Torno y (F) = Fresadora	

Si se toma el caso más desfavorable, se puede observar en las tablas del apartado 5.3., que las características obtenidas con el centro de mecanizado del taller de paseo del Cauce tienen una mayor capacidad que las características obtenidas por medio de las máquinas convencionales del taller de Francisco Mendizábal.

Caso más desfavorable	
Característica	Intervalo de tolerancia mínimo
Conicidad (CM)	0.0596
Radio de curvatura (CM)	0.0936mm
Perfil de evolvente (T)	0.2178mm
Anchura del engranaje (T)	0.2652mm
Diámetro del agujero (T)	0.2817mm
Diámetro exterior (T)	0.4839mm
Leyenda: (CM) = Centro de mecanizado, (T) = Torno y (F) = Fresadora	

Como se ha podido observar, la diferencia entre el caso más favorable frente al caso más desfavorable, es considerable. Esto deja dos posibles opciones como explicación:

- Un error de sujeción de la pieza en la máquina de medición por coordenadas manual empleada, lo que hubiera provocado un desplazamiento de la pieza a la hora de realizar la medición, ya que el palpador hubiera empujado la pieza en el momento del contacto, falseando así los resultados. Teniendo en cuenta que se utilizó una sujeción magnética en el caso de la toma de datos con la máquina de medición por coordenadas, no parece muy plausible.
- Un error en la orientación o el enfoque de la pieza a la hora de medir con el proyector de perfiles hubiera falseado los datos, lo cual es bastante posible debido a una sujeción quizás inadecuada, que se empleó en la toma de datos con el proyector de perfiles, ya que era prácticamente inviable utilizar la misma sujeción que en la máquina de medición por coordenadas ya que modificaba y obstruía la proyección del perfil.

Se puede decir entonces que los datos obtenidos con el proyector de perfiles no son fiables y, por lo tanto, que las capacidades de las máquinas empleadas, máquinas convencionales y centro de mecanizado, tienen una capacidad semejante, siempre dependiendo de la característica a fabricar. Como se puede observar en las tablas del apartado 5.3., tomando los valores más desfavorables, sin tener en cuenta los obtenidos con el proyector de perfiles, el orden de capacidad de mayor a menor queda como sigue: Conicidad (Centro de mecanizado), Diámetro exterior (Torno), Radio de la ranura (Centro de mecanizado), Diámetro del agujero (Torno), Anchura del engranaje (Torno) y perfil de evolvente (Fresadora). Esto nos indica que el torno empleado puede rivalizar con el centro de mecanizado, pero no se puede decir lo mismo de la fresadora, aunque esta, tampoco dista demasiado de las otras dos máquinas.



Caso más desfavorable (revisado)	
Característica	Intervalo de tolerancia mínimo
Conicidad (CM)	0.0596
Diámetro exterior (T)	0.0911mm
Radio de la ranura (CM)	0.0936mm
Diámetro del agujero (T)	0.1069mm
Anchura del engranaje (T)	0.2129mm
Perfil de evolvente (F)	0.2178mm
Leyenda: (CM) = Centro de mecanizado, (T) = Torno y (F) = Fresadora	

Las máquinas convencionales, torno y fresadora, del taller de la Escuela de Ingeniería Industrial con sede en Francisco Mendizábal, tienen capacidad suficiente para realizar pequeñas series de piezas, siempre y cuando se respete los materiales mecanizables de estas y los límites de tolerancia que se han calculado para las distintas características.

Sin embargo, teniendo en cuenta la diferencia de temperaturas a la hora de emplear la máquina de medición por coordenadas (25°C) y el proyector de perfiles (21°) se puede afirmar que los valores obtenidos con esta última máquina deberían ser menores que con la primera. Esto sería causa de la capacidad que tienen los materiales para variar sus dimensiones en función de la temperatura. Teniendo en cuenta que únicamente la anchura del engranaje cumple esta premisa, se puede afirmar que los datos obtenidos para esta característica en el proyector de perfiles son válidos, en contraposición con los datos del resto de características del engranaje. Esto modificaría de la siguiente forma los datos más desfavorables:

Caso más desfavorable (revisado II)	
Característica	Intervalo de tolerancia mínimo
Conicidad (CM)	0.0596
Diámetro exterior (T)	0.0911mm
Radio de la ranura (CM)	0.0936mm
Diámetro del agujero (T)	0.1069mm
Perfil de evolvente (F)	0.2178mm
Anchura del engranaje (T)	0.2652mm
Leyenda: (CM) = Centro de mecanizado, (T) = Torno y (F) = Fresadora	

Estos resultados serán los que se tomen en el caso más desfavorable.

Como se pudo observar en el cálculo de la capacidad para la conicidad y el radio de curvatura de la ranura en la pieza obtenida en el centro de mecanizado, no se consiguió capacidad suficiente con ninguno de los indicadores:

Indicador	Conicidad	Radio de la ranura
Cap	0.5032	0.5342
Cpk-	12.8816	0.8611
Cpk+	-2.7843	0.2073
Cpk	-2.7843	0.2073
Cpm	0.05076	0.3814

Como se ve en la tabla de arriba, ningún indicador es mayor que uno, salvo el Cpk- de la conicidad, pero al tener un Cpk+ menor, se utiliza este y no el otro indicador como Cpk. Se puede determinar que el centro de mecanizado no dispone de capacidad suficiente para estas dos características, ya que, de primeras, no se puede tener capacidad suficiente como muestra el indicador de capacidad simple, el proceso esta descentrado como apunta el indicador de capacidad de proceso centrado y, en conjunto, el indicador de pérdida de capacidad debido a desajustes nos señala que no se tiene capacidad suficiente para llevar a cabo estas dos características en concreto. Esto podría ser debido a dos cosas completamente distintas:

- La primera opción es que el centro de mecanizado de la Escuela de Ingeniería Industrial con sede en paseo del cauce, se encuentra en una situación de descentrado y a mayores, no dispone de precisión suficiente para llevar a cabo la pieza de revolución de este estudio, o al menos, las dos características que se han puesto a prueba de dicha pieza.
- La segunda opción es que se han cometido errores sistemáticos a la hora de la recogida de datos para el estudio, lo que falsearía los resultados y daría una idea equivocada del estado de la máquina y la pieza en cuestión.

Por desgracia no se disponen de datos suficientes para asegurar cualquiera de las dos opciones, por lo tanto, la medida a emplear más sensata sería repetir la toma de datos para las piezas de revolución obtenidas mediante el centro de mecanizado y volver a calcular, con los nuevos datos, la capacidad para estas

dos características. En el caso de que los nuevos datos apoyaran una de las dos opciones dadas, esta se tomaría por válida.

Si se hubiera dispuesto de unas tolerancias para los engranajes, su podría realizar una comparación de capacidades, sin embargo, como los índices de capacidad son directamente proporcionales a los intervalos de tolerancia, no sería justo una comparación para intervalos de tolerancia de distinto orden. Claramente es mucho más sencillo lograr una capacidad suficiente para un intervalo de tolerancias amplio que para otro más estricto. Por ello es aconsejable realizar un cálculo de a partir de qué intervalos de tolerancia se tiene o se puede tener capacidad suficiente, ya que indicaría el orden de los intervalos de tolerancia de las distintas características.

Aparte de las conclusiones de este estudio, no se elimina la función principal de las máquinas herramienta tradicionales empleadas en el mismo, ya que su función principal es educativa.

## **7.- Bibliografía**

Desnoyer, F. y Vincent, R.; *Mémento sur la notion de capabilité.*

Fernández Cárdenas, A. y Girón Medina, V. (2010); *Verificación de engranajes cilíndricos de dientes rectos con maquina de medición de coordenadas.* Lima – Perú.

UNE-ISO/TR 10017; *Orientación sobre las técnicas estadísticas para la Norma ISO 9001:2000.*

UNE-ISO/TS 16949; *Sistemas de gestión de calidad, requisitos particulares para la aplicación de la Norma ISO 9001:2008 para la producción en serie y de piezas de recambio en la industria del automóvil.*

Palencia Mongín, C. y Martín Panero, A.; *Fiabilidad y Calidad Tomo I.* Valladolid: Escuela Universitaria Politécnica universidad de Valladolid.

Palencia Mongín, C. y Martín Panero, A.; *Fiabilidad y Calidad Tomo II.* Valladolid: Escuela Universitaria Politécnica universidad de Valladolid.

Centro Español de Metrología; *Procedimiento DI-001 para la calibración de proyectores de perfiles.* Edición digital 1.

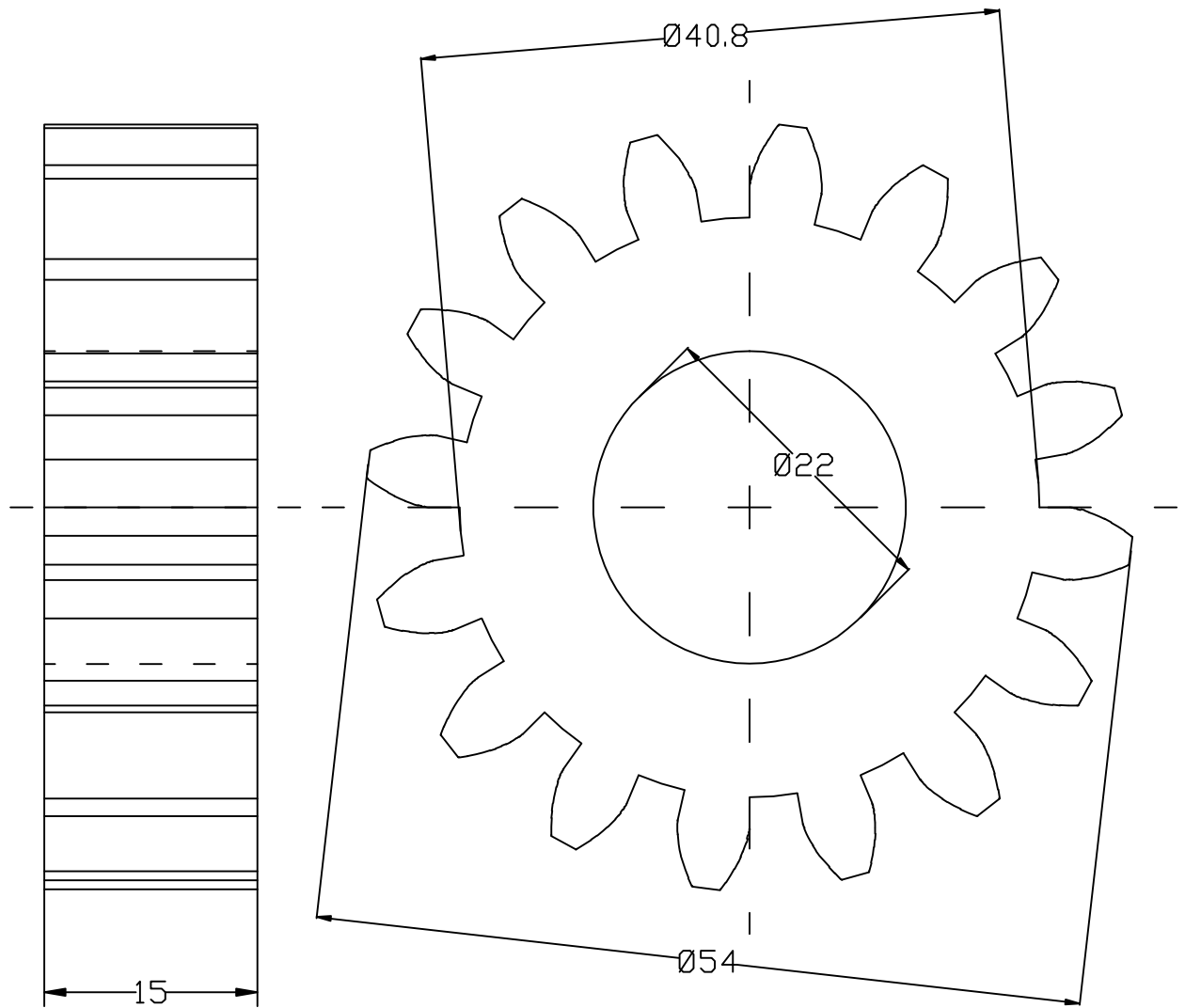
Ventura, A. y Sanabria, J. (2005); *Metrotecnia en la ingeniería mecánica.* Valladolid: Universidad de Valladolid, Secretariado de Publicaciones e Intercambio Editorial.

Lasheras Esteban, J.; *Tecnología mecánica y metrotecnia volumen II.* San Sebastián: Editorial Donostiarra, S.A.



# ANEXO I: PLANOS





**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**  
**ESC.INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**AREA I.P.F.**  
**OFICINA TECNICA**

**DENOM. PLANO**

**PROYECTO DE CAPACIDAD**  
**PLANO DEL ENGRANAJE**

**PLANO N°:**  
**1**

**EL INGENIERO TECNICO:**

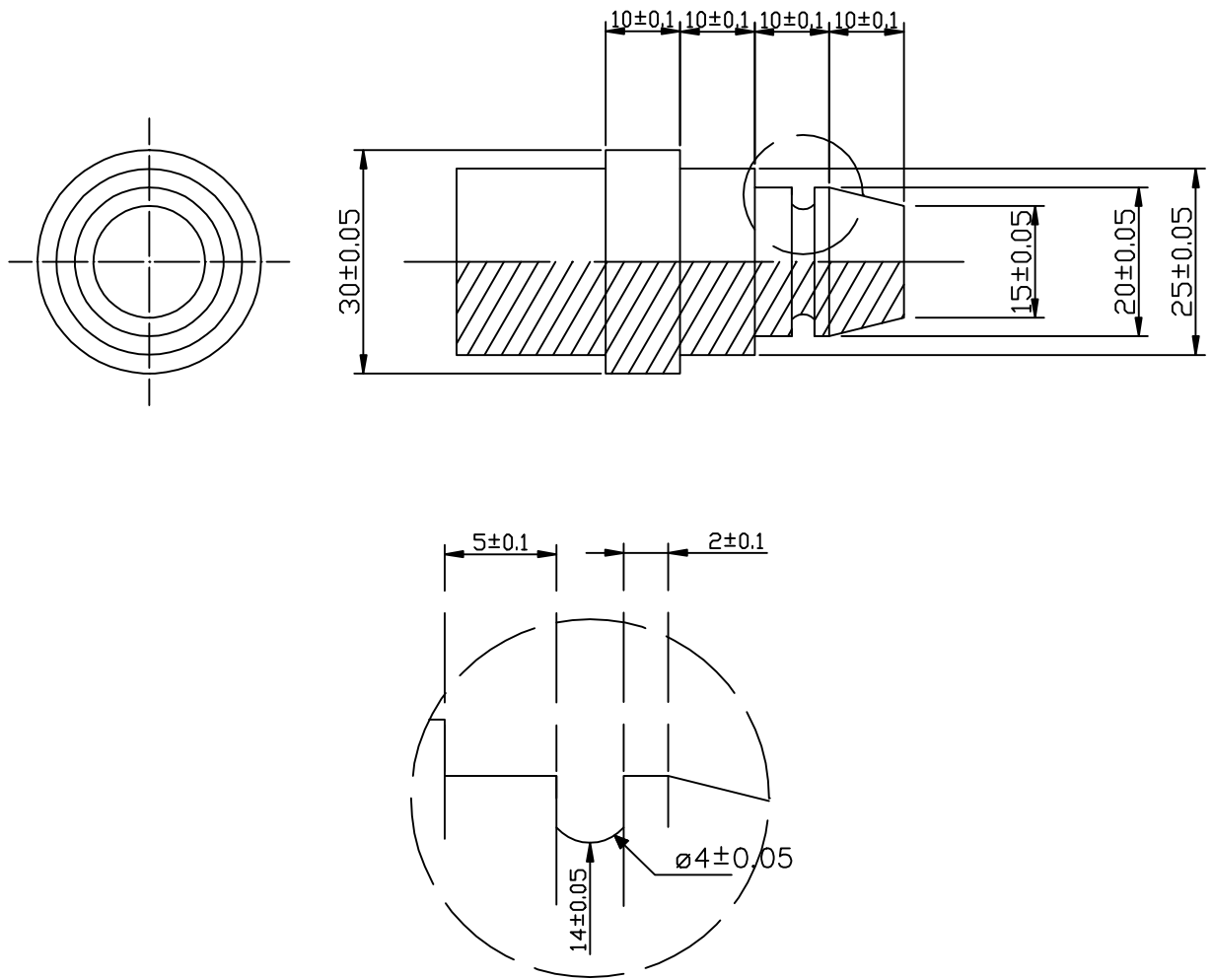
**ESCALA: 2:1**

**BORJA GARCIA HERNANDO**

**FECHA: 16/4/13**







**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**  
**ESC.INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**AREA I.P.F.**  
**OFICINA TECNICA**

**DENOM. PLANO**

**PROYECTO DE CAPACIDAD**  
**PLANO DE LA PIEZA POR CONTROL NUMERICO**

**PLANO N°:**  
**2**

**EL INGENIERO TECNICO:**

**ESCALA: 1:1**

**BORJA GARCIA HERNANDO**

**FECHA: 16/4/13**