

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**“Diseño Mecánico de un Husillo de Sujeción por Pinza para un
Torno de Uso Educativo”**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL
GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTOR

German Stefano Carreño Rojas

ASESOR:

Víctor Sergio Girón Medina

Lima, diciembre, 2020

RESUMEN

En una máquina herramienta la parte más importante es el husillo pues se encarga de sostener a la pieza o a la herramienta de corte. En el caso de los tornos, el husillo sostiene el material a mecanizar y lo hace girar a elevadas revoluciones mientras la herramienta de corte se aproxima a esta y arranca material para darle la forma deseada. Un husillo está conformado principalmente por tres partes: El eje, los rodamientos y la carcasa. El presente trabajo muestra los pasos y las consideraciones tomadas para el diseño de este.

Para comenzar el diseño del husillo primero se definen sus características generales como lo son el tipo y la forma de transmisión de potencia del motor. Basado en ello se partió con la idea de un husillo modular con un sistema de transmisión por fajas. Para conocer la potencia que el husillo necesitará durante el mecanizado se consideró un proceso de cilindrado con parámetros típicos en talleres de manufactura.

Dado que se trata de un husillo de sujeción por pinza ER es necesario conocer la geometría de estas para poder acoplarlas al eje. Las dimensiones de las pinzas ER son establecidas por la norma ISO 15488 y estas son el punto de partida para definir la geometría final del husillo. Siguiendo esta normativa se definió el tamaño necesario de los rodamientos, el tipo de estos y la distancia entre el apoyo fijo y libre para aumentar la rigidez de todo el conjunto. Finalmente se presenta la forma final del husillo y los planos necesarios para la fabricación de este.

AGRADECIMIENTOS

Le dedico este trabajo a mis padres por ser las personas que me brindaron su ayuda de forma incondicional a lo largo de toda mi vida y por brindarme las herramientas para convertirme en la persona que soy.



INDICE

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE	3
1.1 Principios del Mecanizado	3
1.2 Partes del Husillo	5
CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL HUSILLO	11
2.1 Procedimiento de Diseño	11
2.2 Cálculo de la Potencia del Husillo	14
2.3 Selección de Rodamientos	17
2.4 Geometría del Husillo	24
2.5 Aspectos que Afectan el Funcionamiento del Husillo	27
CAPÍTULO 3: COSTO DE FABRICACIÓN Y PLANOS	35
3.1 Lista de Planos	35
3.2 Estimación del Costo de Fabricación	35
CONCLUSIONES	38
RECOMENDACIONES	39
BIBLIOGRAFÍA	40
ANEXOS	42

INDICE DE FIGURAS

Figura 1:Husillo de Torno Extraído de http://www.herrekor.es/categorias.asp?key=8&key2=1	3
Figura 2: Ejes del Torno Extraído de https://sites.google.com/site/454cnc/home/codigo-g	3
Figura 3: Estructura del Husillo Extraído de (Kutlu, 2016).....	5
Figura 4: Eje del Husillo	5
Figura 5: Chuck de Tres Pinzas Extraído de https://cutt.ly/8hzETy3	6
Figura 6: Pinza ER Extraído de https://us.rego-fix.com/en/products	6
Figura 7: Rodamiento de Bolas y sus Partes Extraído de (SKF,2018).....	8
Figura 8: Carcasa del Husillo	8
Figura 9: Motor con Rotor de Jaula de Ardilla Extraído de https://maquinaselectricasblog.wordpress.com/motor-de-induccion/	9
Figura 10: Husillo con Motor Externo con Transmisión por Faja Extraído de Extraído de (Kutlu, 2016)	10
Figura 11:Husillo accionado por faja sincrónica. Extraído de http://www.anderswallin.net/2006/12/new-spindle-installed/	11
Figura 12:Husillo accionado por engranajes con varias relaciones de transmisión Extraído de http://www.colonialtool.com/gear-driven-spindles	12
Figura 13:Husillo acoplado directamente al eje de un motor Extraído de https://www.haascnc.com/productivity/spindles.html	12
Figura 14:Husillo con un motor integrado entre sus rodamientos. Extraído de (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009)	13
Figura 15:Husillo modular Extraído de http://www.sypeisa.com.mx/	13
Figura 16:Componentes de la fuerza resultante durante el torneado Extraído de www.pucp.edu.pe/AeIVeS	16
Figura 17:Extremo próximo a la Herramienta del Husillo Diseñado.	18
Figura 18:Traslación de la Fuerza de Corte al centro del eje	18
Figura 19:Rodamiento de Contacto Angular y de Rodillos Cilíndricos. Extraído de http://suministrosfurio.es/rodamientos-industriales/#rodamientos-de-rodillos	19
Figura 20:Rodamientos en disposición Espalda con Espalda Extraído de (Dynamax, 2012).....	20

Figura 21:Rodamientos en disposición Cara con Cara Extraído de (Dynomax, 2012)	20
Figura 22:Rodamientos en disposición Tándem Extraído de (Dynomax, 2012)	21
Figura 23:Precarga de Posición Extraído de (NSK, 2009)	22
Figura 24:Precarga a Presión Constante Extraído de (NSK, 2009)	22
Figura 25:Rodamiento de Bolas de contacto angular Extraído de https://cutt.ly/7fNSk1V	23
Figura 26:Rodamiento de rodillos cilíndricos Extraído de https://cutt.ly/MfNSzVY	23
Figura 27:Distancia entre los rodamientos más distantes “L” Extraído de https://cutt.ly/3fNSLnt	24
Figura 28:Esquema del Husillo diseñado	24
Figura 29:Modelo 3D del Husillo	25
Figura 30: Extremo del Husillo donde se sujeta la barra a mecanizar con la pinza y tuerca de sujeción.....	25
Figura 31:Parte central del husillo con salientes para restringir la posición axial de los rodamientos.	26
Figura 32: Extremo posterior del husillo con la polea de transmisión.....	27
Figura 33:Componentes de la deflexión en el extremo donde se sujeta la pieza a mecanizar. Extraído de (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009).....	29
Figura 34:Distancias de interés en el husillo	30
Figura 35:Curva Deformación radial vs Distancia “L”	31

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de la fuerza específica “kc” de corte de diversos materiales. Extraído de (Tschätsch, 2009)	15
Tabla 2: Rigidez Radial para los Rodamientos Seleccionados	30
Tabla 3: Planos y Codificación	35
Tabla 4: Costo de Diseño	36
Tabla 5: Costo de Materiales y Elementos Seleccionados.....	36
Tabla 6: Costo de Manufactura	37
Tabla 7: Costo de Fabricación del Husillo	37



INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia se han introducido nuevos métodos de manufactura, sin embargo, el método por arranque de viruta ha permanecido como uno de los más relevantes en el sector industrial. Este campo ha mejorado de forma continua con la finalidad de acelerar los procesos y mejorar la precisión de los productos finales, sin que esto necesariamente implique un aumento de los costos.

Las industrias actuales que trabajan con procesos de arranque por viruta siguen empleando los mismos principios desde hace varios años. La diferencia es que utilizan máquinas mucho más rápidas y precisas que les permiten alcanzar la demanda del mercado. Estas máquinas se componen de tres componentes básicos: El husillo, ejes móviles y herramientas de corte. Todas estas tienen un impacto sobre la precisión final del producto, Sin embargo, el elemento más determinante es el corazón de la misma máquina, el cual viene a ser el husillo.

A pesar de que la forma del husillo pueda variar de acuerdo a la máquina-herramienta (tornos, fresadoras, etc.) todos tienen la misma función: Sostener el material a mecanizar o las herramientas de corte, y además girar a elevadas velocidades para permitir que el proceso de mecanizado pueda llevarse a cabo. Antes estos eran operados manualmente por personas o animales, pero actualmente funcionan con motores eléctricos y en casos especiales también requieren de sistemas hidráulicos y neumáticos.

El presente trabajo busca abordar los temas requeridos para el diseño de un husillo capaz de sujetar barras de hasta 1" de diámetro en un torno de uso didáctico. La sujeción de las piezas se realizará mediante pinzas ER cuya geometría está definida por la norma DIN 6499 (ISO 15488), la cual se ajusta a la capacidad requerida por el husillo.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un husillo de sujeción por pinza para un torno CNC de uso didáctico para el mecanizado de barras de 25mm de diámetro.

Objetivos Específicos

- Seleccionar los componentes del husillo.
- Definir las dimensiones finales del husillo.
- Realizar los planos de despiece y de ensamble del husillo.
- Estimar el costo de fabricación.



CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

El husillo es la parte del torno que provee el movimiento de rotación a la pieza de trabajo para poder realizar el proceso de mecanizado. Es considerada como para la parte más importante pues representa la unión entre la estructura de la máquina-herramienta y la pieza de trabajo. Tanto su resistencia, rigidez, propiedades térmicas, entre otras, tienen un impacto en la precisión y acabado final de la pieza (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009).



Figura 1: Husillo de Torno

Extraído de <http://www.herrekor.es/categorias.asp?key=8&key2=1>

1.1 Principios del Mecanizado

El mecanizado que se realiza en un torno es por arranque de viruta. El husillo hace girar la pieza a grandes velocidades mientras la herramienta de corte se aproxima de forma paralela o perpendicular al eje de giro para remover material y obtener la forma deseada. Un torno convencional presenta 2 ejes principales: El eje Z, el cual es paralelo al eje de giro del husillo y de la pieza a mecanizar; y el eje X, el cual es perpendicular a ese último.

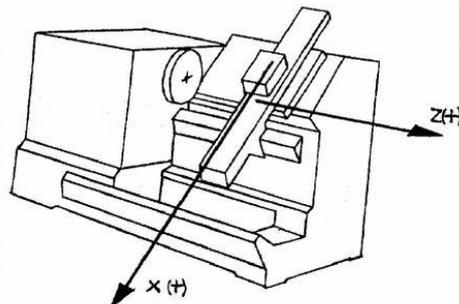


Figura 2: Ejes del Torno

Extraído de <https://sites.google.com/site/454cnc/home/codigo-g>

Todas las operaciones del torno dependen de los factores de corte. Estos son valores que el operador establece para obtener la forma deseado teniendo en cuenta la capacidad del torno, el material y el acabado superficial del producto final. Además, estos parámetros nos permitirán conocer el valor de las fuerzas que se generan sobre el husillo y la potencia que requerirá este para poder realizar el proceso de mecanizado. En total son tres:

- Velocidad de corte (m/min): Es la velocidad tangencial del punto de la pieza que entra en contacto con la herramienta de corte. Este es uno de los factores más importantes para determinar la vida de la herramienta. Altas velocidades de corte permiten un mecanizado más rápido, pero acelera el desgaste de la herramienta. Su valor depende de la velocidad de rotación de la pieza y del diámetro de esta.

$$V_c \left(\frac{m}{min} \right) = \frac{n \text{ (min}^{-1}\text{)} \times \pi \times D_c \text{ (mm)}}{1000 \left(\frac{mm}{m} \right)}$$

Donde “Vc” es la velocidad de corte, “n” es la velocidad de giro del husillo y “Dc” es el diámetro de la pieza antes del mecanizado.

- Velocidad de Avance (mm/rev): Es la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta. De esta depende la formación de la viruta y el acabado que se desee sobre el producto final. Cada herramienta puede trabajar dentro de un rango de velocidades de avance y estas se brindan en los catálogos de fabricantes. Su valor se obtiene del producto del avance por revolución y de la velocidad de rotación de la pieza.
- Profundidad de corte (mm): Es la distancia que ingresa la herramienta en la pieza a mecanizar. También se puede calcular como la semidiferencia entre el diámetro sin mecanizar y el diámetro de la pieza después del mecanizado.

1.2 Partes del Husillo

En este apartado se mencionarán las partes que componen un husillo y la función de cada una. El husillo se compone principalmente de tres partes: El eje, rodamientos y la carcasa (Kutlu, 2016). Además, también puede incluirse el motor que le permite funcionar.

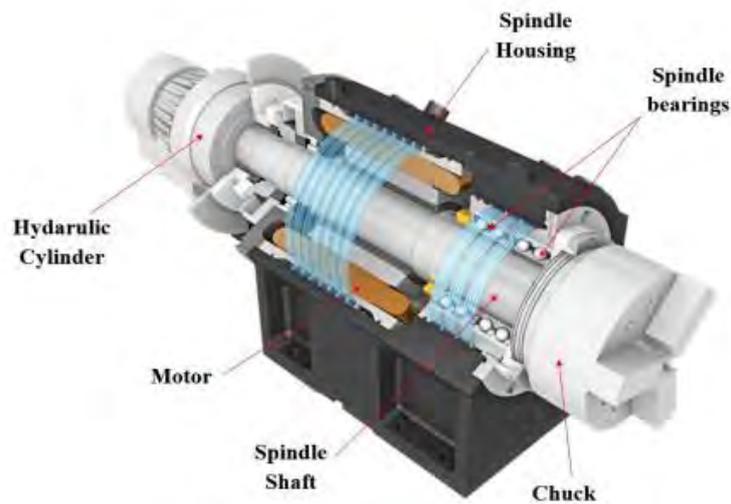


Figura 3: Estructura del Husillo
Extraído de (Kutlu, 2016)

1.2.1 Eje del Husillo

Es el elemento rotatorio principal del husillo el cual se apoya sobre los rodamientos. Es el primer elemento que soporta las fuerzas generadas por el mecanizado por lo que debe ser robusto para permitir el correcto funcionamiento de la máquina-herramienta.



Figura 4: Eje del Husillo

En el caso de los tornos, se encarga de sostener el material a mecanizar y esto lo puede realizar utilizando principalmente dos tipos de accesorios: Chuck de mandíbulas y pinzas.

- Los chucks de mandíbulas depende de tres o más mandíbulas para sujetar la pieza. Ofrecen un amplio rango de sujeción por lo que son ideales para el trabajo con piezas de gran tamaño o procesos que requieran el uso de barras con distintos diámetros. Los chucks son ideales para piezas de gran tamaño y para procesos en los que se emplean diversos diámetros.



Figura 5: Chuck de Tres Pinzas
Extraído de <https://cutt.ly/8hzETy3>

- Las Pinzas o collets son elementos flexibles con ranuras que se ajustan exteriormente para generar presión en la pieza que llevan en su interior, generando así fuerzas de fricción que impide el movimiento relativo entre estas. El modelo más comercial de pinzas de sujeción es el denominado “ER”, estandarizado con la norma DIN 6499 (ISO 15488). Fueron desarrolladas y patentadas en 1973 por la compañía REGO-FIX. La ventaja de un collet es que su forma cilíndrica provee de una mayor área de sujeción que un Chuck de tres mandíbulas lo que conlleva una mayor estabilidad. Sin embargo, su rango de sujeción es muy limitado por pinza y es por ello que se venden en kits con pinzas para distintos diámetros.



Figura 6: Pinza ER
Extraído de <https://us.rego-fix.com/en/products>

1.2.2 Rodamientos

Son los elementos de transición entre el eje y la carcasa del husillo los cuales actúan como puntos de apoyo por los que las fuerzas en el eje generadas por el proceso de mecanizado son transmitidas al resto de la máquina. Los rodamientos mantienen fijo el eje y a su vez permiten su rotación por lo que son los componentes que más influencia tienen sobre la vida útil del husillo.

Las partes del husillo son principalmente cinco: Anillo interior y exterior, elementos rodantes, jaula y sellos (SKF, 2018).

- Los anillos son elementos rectificadas y pulidos entre los que se albergan el resto de los componentes del rodamiento. Poseen pistas internas por las que los elementos rodantes se desplazan. El anillo exterior se sujeta a la carcasa del husillo y se mantiene fijo, mientras que el anillo interior se sujeta al eje y gira junto a este.
- Los elementos rodantes transfieren las cargas entre el anillo interior y exterior y ruedan a lo largo de las pistas de estos. De acuerdo al tipo de elemento rodante los rodamientos pueden clasificarse en rodamientos de bolas, de rodillos cilindros, de agujas, de rodillos cónicos entre otros.
- La jaula es el componente separador que mantiene los elementos rodantes de formar equidistante para optimizar la distribución de las cargas. Generalmente consiste en una chapa de metal perforada, aunque también pueden fabricarse con polímeros.
- Los sellos son partes fabricadas de metal o polímeros cuya función es evitar el ingreso de agentes contaminantes que puedan reducir el desempeño de los elementos rodantes, ya sea por la contaminación del lubricante o por daños en las superficies de los anillos.

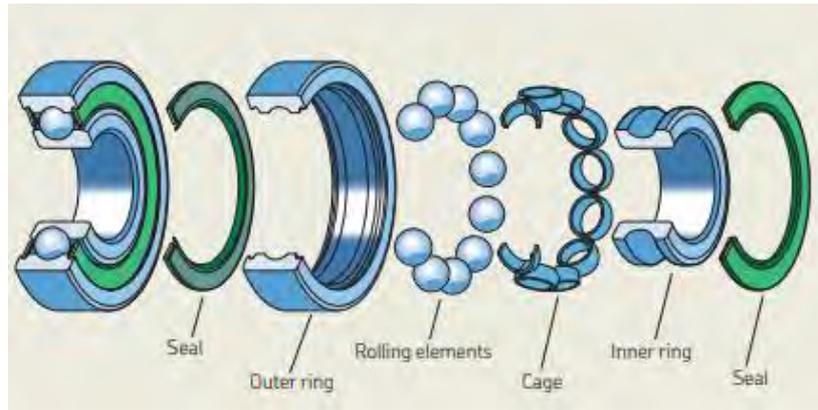


Figura 7: Rodamiento de Bolas y sus Partes
Extraído de (SKF,2018)

1.2.3 Carcasa del Husillo

Es el elemento en el que se ensambla el eje del husillo con sus rodamientos y se encarga de mantenerlos unidos. La carcasa puede estar integrada al cuerpo de la máquina herramienta o ser un elemento externo que puede ser ensamblado o retirado con facilidad. Generalmente se usa este último tipo de carcasa pues ofrece facilidad al mantenimiento ya que mientras el husillo es reparado, puede ser reemplazado por otro igual sin afectar considerablemente la producción. La carcasa debe ser robusta y rígida pues debe sostener y transmitir las fuerzas generadas en los rodamientos hacia el cuerpo de la máquina herramienta.



Figura 8: Carcasa del Husillo

1.2.4 Motor

Casi la totalidad de máquinas herramientas utilizan motores eléctricos para su funcionamiento. Estos pueden clasificarse por su tipo de rotor y por la forma en la que se acoplan a las demás partes del husillo.

Los tipos de motores eléctricos de acuerdo a su tipo de rotor son dos: Asíncronos y síncronos.

- Los motores asíncronos son aquellos en los que el estator gira a una velocidad distinta que el campo magnético generado en el estator. Esto se debe a que el campo magnético del estator debe inducir primero un campo en el rotor para que se lleve a cabo el giro lo que produce un desfase entre ambos. El modelo más fabricado de ese tipo es el motor de jaula de ardilla.

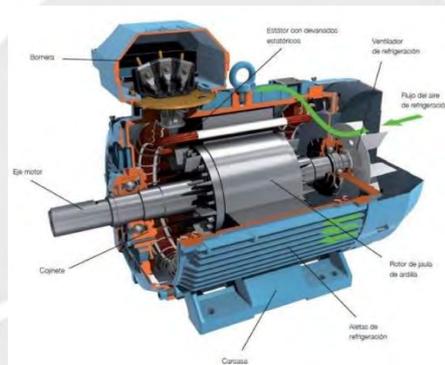


Figura 9: Motor con Rotor de Jaula de Ardilla

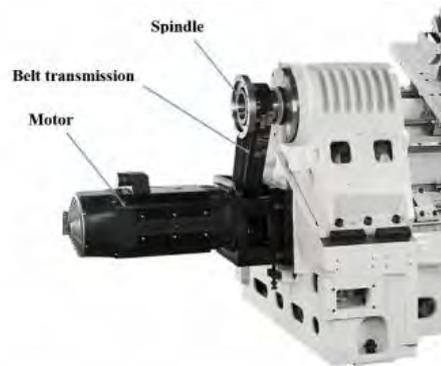
Extraído de <https://maquinaselectricasblog.wordpress.com/motor-de-induccion/>

- Los motores síncronos poseen estatores fabricados con imanes permanentes por lo que no experimentan un retraso respecto al campo magnético del estator. Estos motores tienen una eficiencia mayor que los asíncronos porque generan menos calor al existir menor fricción magnética entre rotor y estator. Sin embargo, por sus costos más elevados no son tan utilizados en máquinas herramientas.

Los tipos de motores de acuerdo a la forma en la que se acoplan con el resto del husillo son dos: Externos e internos.

- Los motores externos son completamente independientes al sistema del husillo. La transmisión de potencia se lleva a cabo mediante elementos auxiliares como fajas o engranajes. Este tipo de motores permite una

mayor flexibilidad a la hora de diseñar la estructura de una máquina herramienta por lo que son los más empleados.



*Figura 10: Husillo con Motor Externo con Transmisión por Faja
Extraído de Extraído de (Kutlu, 2016)*

- Los motores internos son ensamblados dentro de la carcasa y alrededor del eje del husillo. Esto permite diseños más compactos y dado que no existen fuerzas adicionales en los rodamientos debido a sistemas externos de transmisión, estos pueden alcanzar mayores velocidades de rotación. La desventaja de estos es que los diseños son más complejos pues debe existir un sistema de enfriamiento por el aumento del calor generado y por ende resultan más costosos de fabricar.

CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL HUSILLO

2.1 Procedimiento de Diseño

Hay muchos aspectos que involucran el diseño de un husillo. El procedimiento para el diseño de este puede dividirse en 5 pasos (Dynamax, 2012):

- a. **Elegir el Tipo de Transmisión:** Si será accionado por una faja, engranaje, si se acoplará directamente al motor o si tendrá un motor integrado.
 - i. Husillo accionado por faja: El movimiento del motor se transmite al husillo mediante una correa en V o sincrónica. Es de las más empleadas dado su bajo costo y buena eficiencia (alrededor del 95%). Puede alcanzar moderadas velocidades de giro (15000 rpm) y buen torque a velocidades más bajas (1000 rpm). Sus principales desventajas son su considerable expansión térmica (debido al contacto constante entre la faja y polea), el ruido generado por el movimiento de la correa y la generación de una fuerza radial en el eje que reduce el tiempo de vida útil de los rodamientos.



*Figura 11: Husillo accionado por faja sincrónica.
Extraído de <http://www.anderswallin.net/2006/12/new-spindle-installed/>*

- ii. Husillo accionado por engranaje: El movimiento del motor se lleva a cabo usando uno o varios engranajes. Pueden alcanzar grandes torques a bajas revoluciones y generalmente tienen varias relaciones de transmisión. Su principal desventaja es su limitación de velocidad, pues a elevadas rpm genera vibraciones considerables y la energía

que no se transmite al husillo (eficiencia alrededor del 90%) se convierte en calor, produciendo expansión térmica y con ello reduciendo la precisión de la máquina-herramienta. Por esto es que su uso está casi limitado a operaciones de trabajo pesado en las que las velocidades son bajas.



*Figura 12: Husillo accionado por engranajes con varias relaciones de transmisión
Extraído de <http://www.colonialtool.com/gear-driven-spindles>*

- iii. Husillo acoplado al motor: El eje de husillo está acoplado directamente al eje del motor. Su eficiencia es casi del 100% al no requerir de un intermediario para la transmisión de la potencia. Trabajan muy bien a altas velocidades, pero a bajo torque. Generan muy pocas vibraciones por lo que se pueden conseguir buenos acabados superficiales a grandes velocidades.



*Figura 13: Husillo acoplado directamente al eje de un motor
Extraído de <https://www.haascnc.com/productivity/spindles.html>*

- iv. Husillo con Motor integrado: También se les conoce como electro-husillos. El motor se integra en la carcasa del husillo entre sus rodamientos frontales y posteriores, de esta forma las vibraciones y el ruido se reduce, lo que permite realizar operaciones a elevadas rpm (de 15000 en adelante). Uno de los mayores inconvenientes de este

arreglo es el control de la transferencia de calor y de su expansión térmica, para lo cual se requieren sistemas auxiliares de enfriamiento y monitoreo de temperatura, lo que los convierte en productos de alto precio, pero con muy buen rendimiento mecánico.



Figura 14: Husillo con un motor integrado entre sus rodamientos.
Extraído de (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009)

- b. **Decidir el tipo de alojamiento:** Determinar si va a ser un módulo para instalar en la bancada o si va a ser parte integral de esta. La ventaja de un husillo modular es la facilidad para el mecanizado y su mantenimiento pues puede ser retirado fácilmente de la máquina. Además, al ser producido por separado, las tolerancias requeridas para el trabajo a altas velocidades son más fáciles de obtener.



Figura 15: Husillo modular
Extraído de <http://www.sypeisa.com.mx/>

- c. **Seleccionar los rodamientos del husillo:** De acuerdo a las velocidades y tipo de trabajo se seleccionarán rodamientos que soporten las cargas con un adecuado tiempo de vida. En un torno se busca que estos tengan un nivel de rigidez considerable y buena precisión.

- d. **Seleccionar el motor del husillo:** La potencia mínima de selección se determina estableciendo un caso hipotético de trabajo que represente una gran carga para el torno. Esto se realiza asumiendo el mecanizado de un material de interés y establecido los parámetros de la operación, como la velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad, rpm del husillo, entre otros.
- e. **Definir la geometría del eje del husillo:** Determinar el diámetro, largo, ubicación de rodamientos, sistemas de refrigeración o aceite y lo necesario para que el husillo trabaje de forma correcta.

Muchas veces estos pasos no siguen un orden establecido. En este caso se calculará primero la potencia necesaria en el husillo para seleccionar el motor. Posteriormente se decidirá el estilo y el tipo de alojamiento del husillo para empezar el diseño preliminar de la geometría de este y con las dimensiones se escogerán los rodamientos que mejor puedan desempeñarse en esta labor.

2.2 Cálculo de la Potencia del Husillo

Para el cálculo de la potencia requerida por el husillo se utilizará el diámetro mayor que este puede sostener, es decir, 25mm. La operación a emplear será un cilindrado con las siguientes especificaciones:

- Velocidad de avance **f=0.35 mm/rev**
- Profundidad de corte **b=2mm**
- Régimen de giro **n=600 rpm**

Los cuales son valores asumidos después de la observación de procesos similares en talleres de manufactura. Con estos hallaremos las velocidades de operación:

-Calculamos la velocidad de corte (V_c):

$$V_c = \frac{\pi * \emptyset * n}{1000} = \frac{\pi * 25 * 600}{1000} \rightarrow V_c = 47.1 \frac{m}{min}$$

-Calculamos la velocidad de Avance (V_a):

$$V_a = \frac{n * f}{1000} = 0.21 \frac{m}{min}$$

Para el mecanizado de un determinado material se necesita conocer la resistencia que este da ante el intento del cambio de forma. Esta se obtiene mediante la propiedad llamada "Fuerza Específica de Corte". A continuación, se mostrará un cuadro con el valor de esta propiedad para diversos tipos de materiales (Tschätsch, 2009):

Tabla 1: Valores de la fuerza específica "kc" de corte de diversos materiales.
Extraído de (Tschätsch, 2009)

Work material	Specific cutting force k_{c1} (N/mm ³)
Structural steels	1,600–1,800
Alloy steels	1,950–2,900
Cast iron	900–1,100
Titanium alloy	1,300–1,400
Aluminium alloy	400–700

Se aprecia que la fuerza específica de corte es más bien un rango de valores. Dado que el eje a mecanizar será de aluminio, emplearemos el valor máximo que nos presentan en la tabla (700 N/mm²) para el cálculo de la potencia máxima.

-Calculamos el área de la viruta sin deformar (A_v):

$$A_v = p * f = 2 * 0.35 = 0.7 \text{ mm}^2$$

-Calculamos la "Fuerza de Corte" o fuerza tangencial (F_c):

$$F_c = A_v * k = 0.7 * 700 = 490 \text{ N}$$

La fuerza resultante (R) que se genera durante el cilindrado se descompone en tres direcciones:

- Fuerza de Corte o fuerza tangencial (F_c)
- Fuerza de Empuje o fuerza radial (F_e)
- Fuerza de Avance o fuerza axial (F_a)

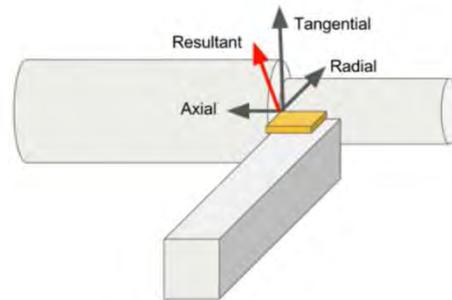


Figura 16: Componentes de la fuerza resultante durante el torneado
Extraído de www.pucp.edu.pe/AelVeS

La relación de magnitud entre cada una de ellas es aproximadamente (Tschätsch, 2009):

$$F_c : F_a : F_e = 4 : 1 : 2$$

Con ello, obtenemos el valor del resto de las fuerzas y de la resultante (R) conociendo ya la magnitud de la fuerza de corte ($F_c=490$ N):

- Fuerza de Empuje (F_e) = 245 N
- Fuerza de Avance (F_a) = 122.5 N
- Fuerza Resultante (R): $R = \sqrt{F_c^2 + F_a^2 + F_e^2} = 561.36$ N

-Calculamos la potencia resultante de la fuerza de corte (P_c):

$$P_c = \frac{F_c * V_c}{60 * 1000} = \frac{490 * 47.1}{60000} = 0.384 \text{ kW}$$

-Calculamos la potencia resultante de la fuerza de avance (P_a) (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009):

$$P_a = \frac{F_a * V_a}{60 * 1000} = \frac{122.5 * 0.21}{60000} = 4.28 * 10^{-4} kW$$

Se puede apreciar que el valor de la potencia obtenida a partir de la velocidad de avance es muy pequeña comparada a la generada por la fuerza de corte. Esto se debe a la diferencia de magnitud entre las velocidades y las fuerzas. La potencia de avance equivale aproximadamente a 1/900 de la potencia de corte, y es por ello generalmente se le suele obviar al calcular la potencia requerida por el husillo.

-Finalmente calculamos la potencia requerida por el husillo (P_h):

$$P_h = P_c + P_a = 0.385 kW$$

2.3 Selección de Rodamientos

Se emplearán tres criterios para la selección de los rodamientos del husillo:

- Identificación del diámetro interior requerido.
- Determinación del tipo de rodamiento.
- Determinación de las condiciones de uso.

Para el primer criterio se debe conocer el diámetro del eje en el que se instalará el rodamiento. Para la sujeción de la barra a mecanizar se usará una pinza ER40, sus dimensiones las extraemos del catálogo de Rego-Fix (Rego-Fix, n.d.-a) y con ellas determinamos que el extremo donde se apoyará la pinza debe tener un diámetro externo de 50mm.

Las pinzas ER40 requieren de una tuerca de sujeción para poder fijarse en el eje y poder ajustar la pieza que van a sostener. La rosca que estas tienen se brinda en catálogos y corresponden al valor M50x1.5 (Rego-Fix, n.d.-b). No podemos

emplear rodamientos con un diámetro interno de 50mm pues la sección roscada del eje dañaría la pista interior de estos durante la instalación. Dado que el aumento de las dimensiones de los rodamientos se da de 5 en 5, la opción más compacta es entonces un rodamiento con diámetro interior de 55mm

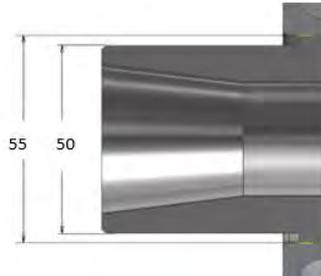


Figura 17: Extremo próximo a la Herramienta del Husillo Diseñado.

Para el segundo criterio se debe conocer la dirección de las fuerzas que tendrán que soportar los rodamientos. Como se mencionó en capítulos anteriores, existen tres fuerzas en distinta dirección durante el cilindrado:

- Fuerza de Corte o fuerza tangencial (F_c)
- Fuerza de Empuje o fuerza radial (F_e)
- Fuerza de Avance o fuerza axial (F_a)

La fuerza de corte es tangencial, pero puede desplazarse el centro del eje, de esa forma se convierte en un momento torsor y en una fuerza con dirección radial. Esta fuerza, junto a la fuerza de empuje, nos permite obtener la fuerza resultante en la dirección radial.

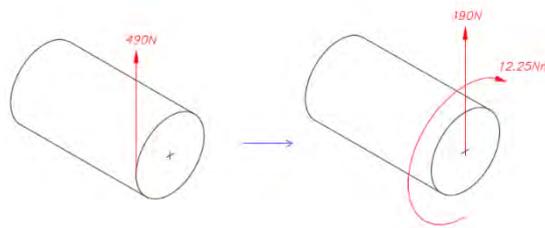


Figura 18: Traslación de la Fuerza de Corte al centro del eje

-Calculamos la fuerza radial equivalente (F_r):

$$F_r = \sqrt{F_c^2 + F_e^2} = \sqrt{490^2 + 245^2} = 547.84 \text{ N}$$

La única fuerza en dirección axial es la fuerza de avance, por ello la fuerza equivalente axial (F_{ae}) tiene su misma magnitud:

$$F_{ae} = F_a = 122.5 \text{ N}$$

Ahora que conocemos las fuerzas, podemos tener una mejor idea de los tipos de rodamientos a emplear. De los rodamientos montados sobre un eje, solo uno debe ser fijo y se debe emplear para fijar el eje axialmente. Este debe ser capaz de soportar tanto cargas axiales como radiales. Los más usados para este fin son los **rodamientos de contacto angular** debido a que son capaces de trabajar con un alto rango de precisión a grandes RPM. Por otro lado, el resto de los rodamientos deben ser libres y solo se les hará trabajar bajo carga radial. Para esta aplicación los rodamientos más comunes son los de **rodillos cilíndricos** y de agujas (Dynomax, 2012).



Figura 19: Rodamiento de Contacto Angular y de Rodillos Cilíndricos.
Extraído de <http://suministrosfurio.es/rodamientos-industriales/#rodamientos-de-rodillos>

Para el tercer criterio se deben conocer las condiciones en las que trabajará nuestro husillo. Los rodamientos son lubricados con grasa y esta debe mantenerse alejada de grandes concentraciones de suciedad. Por ello, existe la alternativa de conseguir rodamientos con sellos que mantengan la grasa limpia durante todo el tiempo de vida de rodamiento.

Se espera que el uso no sea de carácter pesado para que las partículas producidas por el mecanizado no lleguen a afectar el correcto funcionamiento de los rodamientos. Sin embargo, resulta conveniente proteger con sellos a los rodamientos más próximos al extremo donde se localice la herramienta del torno.

2.3.1 Disposición de Rodamientos de Contacto Angular

A continuación se mostrarán las disposiciones usadas para ensamblar dos o más rodamientos de contacto angular en los ejes (Dynomax, 2012):

- Espalda con Espalda: Soportan cargas axiales en ambos sentidos. La holgura que aparece cuando se usan dos rodamientos juntos se elimina aplicando una precarga sobre el anillo interior. Es una disposición de rodamientos rígida.

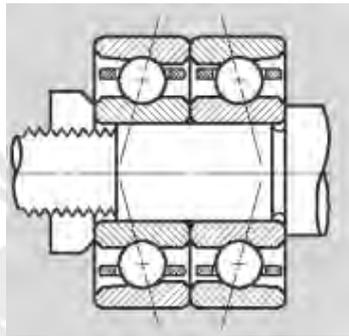


Figura 20: Rodamientos en disposición Espalda con Espalda
Extraído de (Dynomax, 2012)

- Cara con Cara: Soportan cargas axiales en ambos sentidos. La precarga se aplica sobre los anillos exteriores para eliminar la holgura entre la pareja de rodamientos. No es una disposición tan rígida como la de espalda con espalda, pero son menos sensibles al desalineamiento.

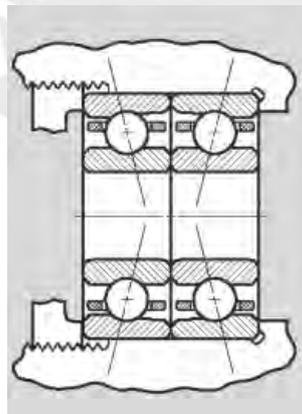


Figura 21: Rodamientos en disposición Cara con Cara
Extraído de (Dynomax, 2012)

- Tándem: Cuando la carga axial en un sentido es elevada, se usa este tipo de arreglo. Sin embargo, si existen fuerzas axiales en ambos sentidos, se requiere de otro(s) rodamiento(s) apuntado hacia el sentido opuesto.

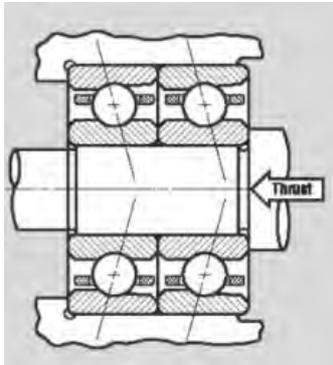


Figura 22: Rodamientos en disposición Tándem
Extraído de (Dynomax, 2012)

Para aumentar la precisión del husillo necesitamos que sea lo más rígido posible, por ello se escogerá la **disposición espalda con espalda**.

2.3.2 Precarga de Rodamientos de Contacto Angular

Cuando se trabajan con máquinas herramientas, se recomienda que los rodamientos de contacto angular sean sometidos a una precarga. Algunas de las ventajas de esto son las siguientes (NSK, 2009):

- Fija la posición axial de los rodamientos
- Aumenta la rigidez de los rodamientos
- Disminuye el ruido generado por vibraciones axiales

Existen dos métodos para precargar los rodamientos (NSK, 2009):

- La primera es la denominada **precarga de posición**. Es la más común, en esta se utilizan elementos sólidos para impedir el movimiento axial del rodamiento. Estos elementos sólidos pueden ser otros rodamientos, separadores o la geometría del eje o de la carcasa. Se utiliza **cuando se necesita rigidez**.

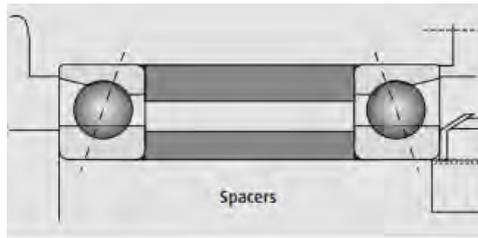


Figura 23: Precarga de Posición
Extraído de (NSK, 2009)

- El segundo método es el llamado **precarga a presión constante**, consiste en el uso de muelles que generen una fuerza constante sobre el rodamiento. No es tan rígida como la precarga de posición, pero se desempeña muy bien en **trabajos que requieren de elevadas velocidades**.

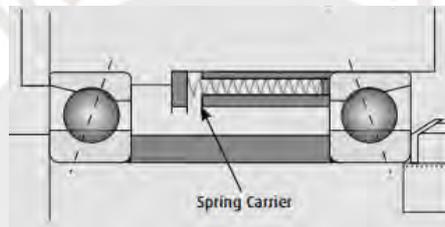


Figura 24: Precarga a Presión Constante
Extraído de (NSK, 2009)

Como nuestra prioridad es que el husillo trabaje con la mayor rigidez posible, la opción más conveniente es la **precarga de posición**.

2.3.3 Selección con Catálogo

Conociendo los rodamientos a usar, su disposición y la forma en la que deben estar precargados usamos el catálogo de SKF y seleccionamos los siguientes rodamientos.

- Rodamiento fijo: Se utilizarán dos rodamientos de contacto angular en posición espalda con espalda con sellos protectores. **Código SKF: 7211 BE-2RZP.**

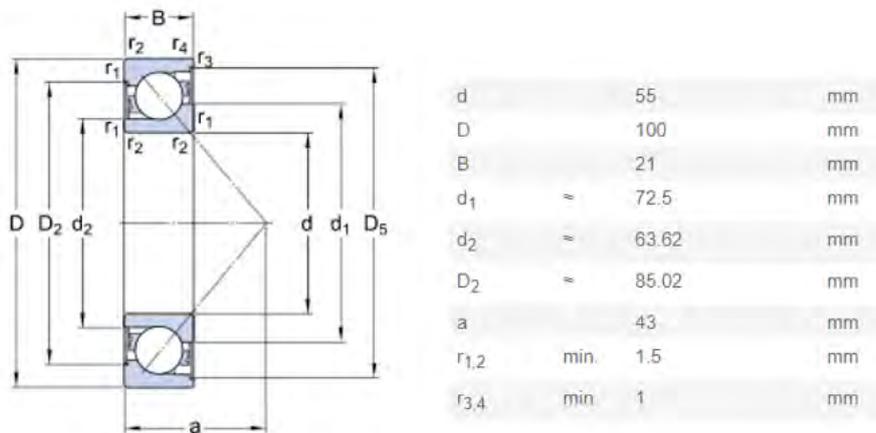


Figura 25: Rodamiento de Bolas de contacto angular
Extraído de <https://cutt.ly/7fNSk1V>

- Rodamiento libre: Se usará un rodamiento de rodillos cilíndricos. **Código SKF: N 211 ECP.**

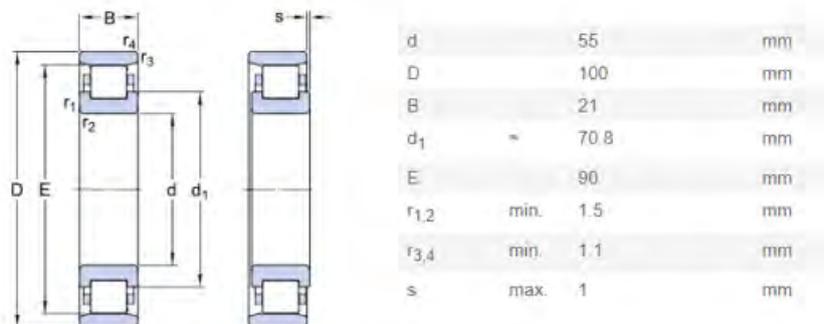


Figura 26: Rodamiento de rodillos cilíndricos
Extraído de <https://cutt.ly/MfNSzVY>

2.4 Geometría del Husillo

Para determinar la geometría preliminar del husillo hay dos parámetros que debemos considerar:

- El diámetro mínimo de nuestro eje será de 50mm. Pues para la sujeción de las pinzas se requiere de una tuerca M50.
- Por recomendación de SKF, para mejorar la precisión y rigidez del husillo, la distancia entre la hilera de rodamientos en el extremo de la herramienta y la hilera del extremo opuesto debe ser alrededor de 3 a 3.5 veces el diámetro del anillo interno de los rodamientos. (SKF, n.d.-b). Comenzaremos el diseño asumiendo una distancia de $L=165\text{mm}$.

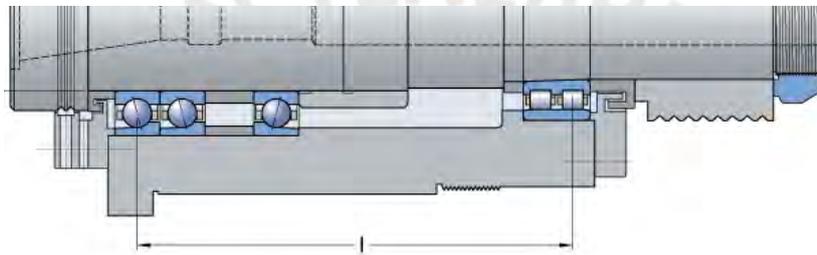


Figura 27: Distancia entre los rodamientos más distantes "L"
Extraído de <https://cutt.ly/3fNSLNt>

A continuación, se muestra el diseño preliminar del husillo, sin la pinza de sujeción ni su tuerca correspondiente; y se explicarán las consideraciones tomadas:

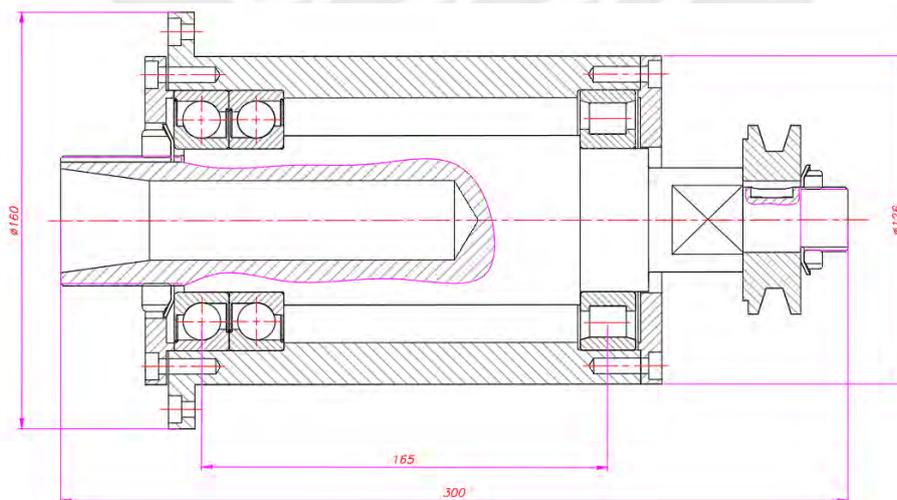


Figura 28: Esquema del Husillo diseñado



Figura 29: Modelo 3D del Husillo

- El extremo de la herramientas (donde se encuentran la pareja de rodamientos de contacto angular) posee una rosca M50 y tiene una agujero cónico cuyas dimensiones se extrajeron de la norma DIN 6499 B/ ISO 15488 (International Organization of Standardization, 2006). La rosca se utilizará para el ajuste de la pinza mediante el uso de una tuerca de sujeción. Además, dicho agujero tiene un diámetro interno de 30mm y continúa recto. Esto se hizo con la finalidad de aligerar el eje además de permitir el mecanizado de barras más largas.

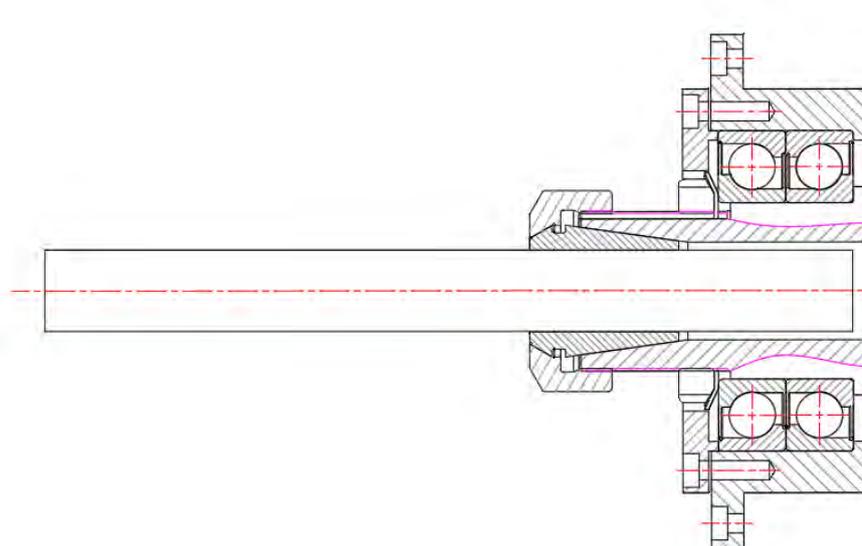


Figura 30: Extremo del Husillo donde se sujeta la barra a mecanizar con la pinza y tuerca de sujeción.

- La sección central de eje posee unas salientes que restringen la posición axial del anillo interior de los rodamientos. Como se mencionó anteriormente, se utilizará el método de precarga de posición para aumentar la rigidez de los rodamientos de contacto angular. Esto se logra mediante la saliente del eje y el uso de una tuerca de seguridad. Esta empuja uno de los extremos del rodamiento (el cual cuenta con una pequeña zona en levadizo para que la tuerca pueda entrar en contacto). Por otro lado, la fijación del anillo exterior se logra mediante el uso de una saliente de la carcasa del husillo y el uso de una tapa, la cual cuenta con una protuberancia que empuja al rodamiento mientras la fijamos con pernos.

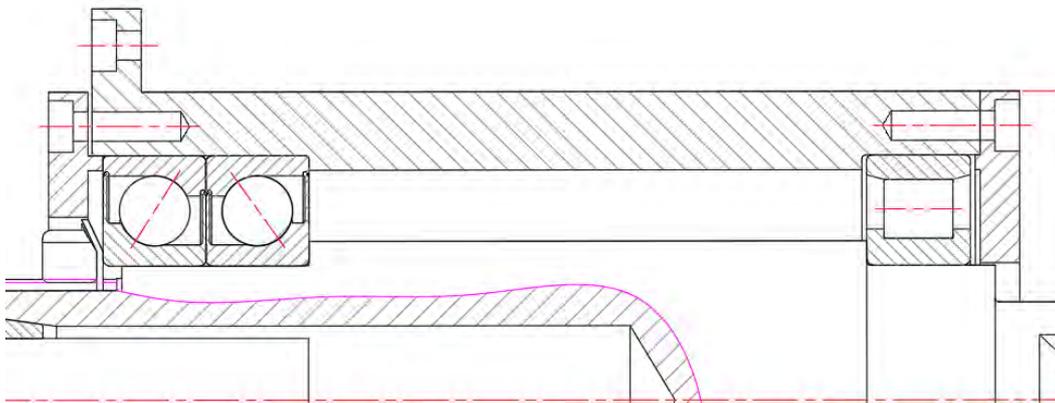


Figura 31: Parte central del husillo con salientes para restringir la posición axial de los rodamientos.

- La zona posterior del eje posee una sección mecanizada con dos lados rectos. Esto, con la finalidad de brindarle una zona de agarre al operario para que este pueda ajustar adecuadamente la tuerca de seguridad y de sujeción.
- Finalmente, para la transmisión de la potencia desde el motor al eje se decidió emplear una polea en V. Esta se conecta con el eje mediante una chaveta y se fija axialmente mediante el uso de una tuerca de seguridad.

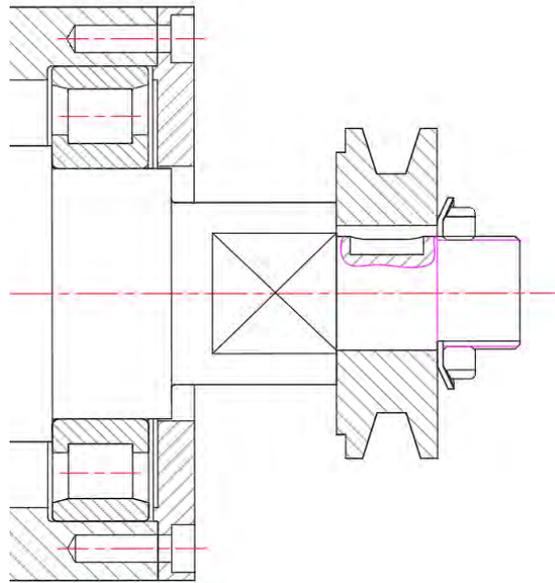


Figura 32: Extremo posterior del husillo con la polea de transmisión.

Sobre el diseño mostrado, realizaremos la evaluación de los efectos que reducen la precisión del husillo. Estimaremos los valores y se darán recomendaciones para futuras mejoras.

2.5 Aspectos que Afectan el Funcionamiento del Husillo

Los errores sobre las dimensiones deseadas en el mecanizado se deben a fuentes como las dilataciones térmicas, las deformaciones causadas por las fuerzas de corte, los errores geométricos de los componentes de la máquina, el sistema de sujeción de la pieza, errores cinemáticos, vibraciones, entre otros (Marañón, 2013)-(Li et al., 2015).

Ya que la cantidad de variables para determinar los errores de precisión son tan numerosas, es conveniente analizar solo aquellas que son las más representativas en el husillo: Deflexión por las fuerzas de corte y dilataciones térmicas.

2.5.1 Deflexión por las fuerzas de corte

El comportamiento del husillo se rige por la deformación que sufre el extremo que sujeta la herramienta debido a las fuerzas que se generan durante el torneado. La deflexión total del husillo se debe principalmente a tres aspectos (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009): la deflexión del eje, la flexibilidad de los rodamientos y la flexibilidad de la disposición de los rodamientos en la carcasa del husillo.

Asumiendo que el eje es de sección constante, la deflexión del extremo de este se puede calcular con la siguiente expresión (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009):

$$\delta_s = \frac{Fba^2}{3IE} \left(1 + \frac{a}{b} \right)$$

Siendo “E” el módulo elástico del material del eje, “I” la inercia de la sección de este y “F” la fuerza resultante entre la fuerza de corte y la radial. Los términos “a” y “b” representan distancias determinadas por la posición de los rodamientos (véase figura 33).

La deformación producida por la flexibilidad de los rodamientos se puede calcular con la siguiente expresión (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009):

$$\delta_b = \frac{F}{b^2} \left(\frac{(a+b)^2}{k_F} + \frac{a^2}{k_R} \right)$$

Siendo k_f y k_r la rigidez radial del rodamiento(s) delantero(s) y del posterior, respectivamente. Estos valores pueden variar si regulamos la precarga de los rodamientos. La importancia de la rigidez, especialmente en los rodamientos delanteros, es un punto clave para la selección de estos.

El efecto debido a la flexibilidad del arreglo de los rodamientos en el husillo (δ_h) es muy complejo de calcular con modelos simples, por lo que generalmente se calcula mediante simulaciones con FEM. Por razones prácticas, y por su menor

influencia respecto a los dos efectos mencionados anteriormente, este valor no se tendrá en cuenta (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009).

Con las consideraciones mencionadas, se tiene que la deflexión total sobre el extremo del husillo es la siguiente:

$$\delta = \delta_s + \delta_b + \delta_h \approx \delta_s + \delta_b$$

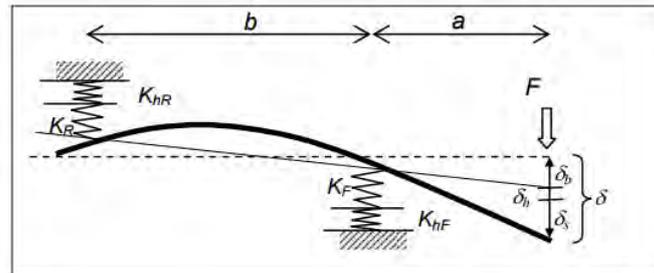


Figura 33: Componentes de la deflexión en el extremo donde se sujeta la pieza a mecanizar.
Extraído de (Lopez de Lacalle & Lamikiz, 2009)

Otro aspecto para resaltar es que la longitud de la pieza y su sujeción nos permitirán considerarlos como prolongaciones del eje pues no se requieren de puntos intermedios de sujeción en la bancada para evitar deflexiones causadas por el mismo material.

- **Cálculo de la Deformación**

El primer paso para el cálculo es determinar la rigidez radial de los rodamientos que vamos a emplear. La rigidez radial es una relación entre la fuerza radial que se aplica en un rodamiento, y la distancia que este se deforma. No es un valor constante pues depende de la aplicación, pero se dan valores orientativos para los cálculos (SKF, n.d.-a). El catálogo de SKF provee valores referenciales para los distintos tipos de rodamientos y las disposiciones en las que se instalan.

Tabla 2: Rigidez Radial para los Rodamientos Seleccionados

Tipo de Rodamiento	k (N/μm)
Pareja de Rodamientos de Bolas de Contacto Angular en disposición espalda con espalda	190
Rodamiento de Rodillos Cilíndricos	180

A continuación, definiremos las distancias a y b que necesitamos para los cálculos. Consideraremos que la aplicación de las fuerzas se da en un punto muy cercano al extremo de la herramienta del husillo. Entonces, la distancia “a” será igual a **64mm** y la distancia “b” igual a **154.5 mm** (véase la siguiente figura).

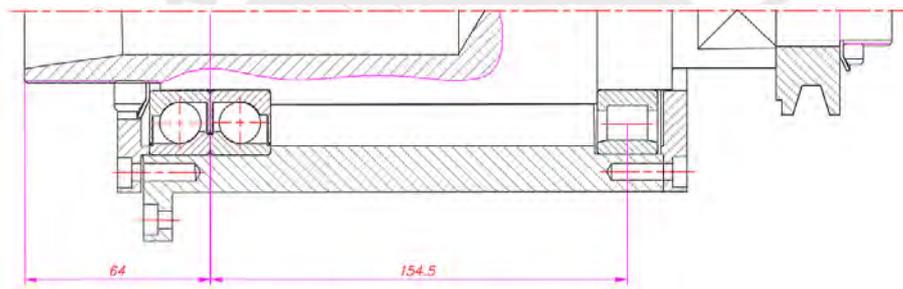


Figura 34: Distancias de interés en el husillo

Consideraremos que todo el eje tiene un diámetro de 50 mm y no cuenta con cavidades. Con ello obtenemos el valor de la inercia:

$$I = \frac{\pi * \varnothing^4}{32} = 613592.3 \text{ mm}^4$$

Con los valores de la resultante entre la fuerza de corte y de empuje “F=406.4 N” y el módulo elástico del acero “E= 2.1*10^5 MPa” obtenemos la deformación debido a las fuerzas en el mecanizado:

$$\delta_s = \frac{F * b * a^2}{3 * I * E} * \left(1 + \frac{a}{b}\right) = 9.44 * 10^{-4} mm$$

$$\delta_b = \frac{F}{b^2} * \left(\frac{(a + b)^2}{kf} + \frac{a^2}{kr}\right) = 4.67 * 10^{-3} mm$$

$$\delta \approx \delta_s + \delta_b = 5.61 \mu m$$

A continuación, veremos cómo cambia el valor de la deformación si modificamos la distancia “L” recomendada por SKF entre las hileras más distantes del husillo (tener en cuenta que la distancia “b=L-10.5”, siendo 10.5 la mitad del espesor de uno de los rodamientos de contacto angular):

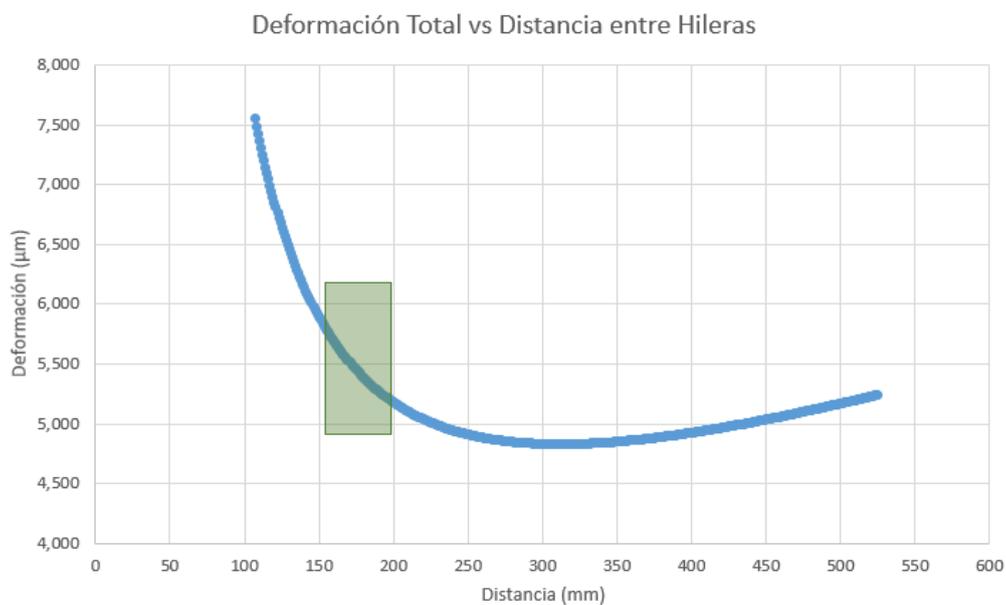


Figura 35: Curva Deformación radial vs Distancia “L”.

Podemos apreciar que la zona resaltada contiene las distancias recomendadas por SKF (165<L<193). Aunque no presentan la deformación más baja, se

encuentra en una zona próxima al valor mínimo, el cual se alcanza con una distancia entre hileras de aproximadamente 300 mm.

Si bien, la deformación es menor, la rigidez de todo el conjunto puede verse afectada. Al aumentar el tamaño del eje, la longitud flotante entre los rodamientos también aumenta. Esto puede llevar a un ligero aumento de las vibraciones si se llegara a trabajar a elevadas RPM y en ese caso un rodamiento extra en el eje sería necesario.

La diferencia de deformación entre los extremos de la zona recomendada es de aproximadamente 0.4 micras. Este valor es demasiado pequeño por lo que se trabajará con la distancia establecida desde un inicio, **L= 165mm**. Además, de esta forma mantendremos el husillo lo más compacto posible.

2.5.2 Dilataciones Térmicas

El calor generado en el husillo se presenta de tres formas distintas: conducción, convección y radiación. La conducción se da, por ejemplo, durante el contacto de la pieza de trabajo con la herramienta de corte. La convección, cuando el refrigerante o incluso el aire entra en contacto con la pieza rotativa. Por último, la radiación se produce cuando las temperaturas de los elementos del husillo alcanzan elevadas temperaturas y empiezan a emitir energía hacia el ambiente.

A pesar de que estos tres mecanismos se den de forma simultánea, el que tiene mayor relevancia es el proceso de conducción, pues las principales fuentes de calor son los rodamientos y el sistema de transmisión entre el motor y el husillo (Uhlmann & Hu, 2012). Adicional a esto, se tomarán las siguientes consideraciones para estimar la dilatación del husillo:

- El efecto de la radiación es despreciable.
- El efecto de la fricción del aire es una fuente de calor demasiado pequeña comparada a las antes mencionadas.
- El aumento longitudinal del eje del husillo es más considerable que su incremento radial, por ello este último no se tomará en cuenta.

Con todas las consideraciones podemos calcular la deformación longitudinal de eje del husillo mediante la siguiente expresión basada en la Ley de Hooke (Uhlmann & Hu, 2012):

$$\varepsilon = \alpha * \Delta T * L$$

Donde “ α ” representa el coeficiente de expansión térmica del material del eje del husillo.

Algunas de las alternativas para la compensación o corrección de esta deformación son las siguientes (Li et al., 2015):

- Reducir la generación de calor del sistema de husillo mediante el uso de rodamientos con elementos rodantes hechos de materiales cerámicos. De esta forma se reduce la cantidad de fricción y el coeficiente térmico de los mismos. A esta solución también se le puede añadir el uso de materiales aislantes para la fabricación de la carcasa de husillo, como plásticos reforzados con fibra de carbono.
- Controlar la cantidad de calor que se transmite hacia el eje del husillo para favorecer la formación de una distribución uniforme de temperaturas. Esto se lleva a cabo generalmente mediante el uso de recubrimientos de refrigeración alrededor de los rodamientos del husillo. De esta forma se mejora la disipación de calor, reduciendo la cantidad que produce las dilataciones térmicas. Algunas variaciones consisten en el uso de salones con temperaturas controladas para reducir la transmisión de calor, o del uso de aislantes entre la superficie del eje y la pista interna de los rodamientos.

Hay que tener en cuenta que los métodos antes mencionados se aplican para husillos de producción en masa que trabajan durante largos periodos de tiempo. En esos casos es importante prevenir cualquier fallo que pueda representar el frenado de la industria, por ello, aunque dichos métodos requieren de equipos avanzados y materiales costosos, es un gasto que puede recuperarse rápidamente.

Dado que el husillo diseñado es de uso educativo, su régimen de uso será mucho menor al de un torno de trabajo. Por ello, se optará por una alternativa más sencilla que, a pesar de producir un error mayor que las alternativas anteriores, nos permitirá acelerar el desarrollo de nuestro prototipo sin sacrificar de forma considerable la precisión.

Consiste en permitir que el rodamiento posterior tenga una luz (pocos milímetros de espacio) para que pueda desplazarse axialmente o que el rodamiento empleado pueda mover su pista independientemente de la exterior. De esta manera, la mayor parte de la expansión del eje (estimada asumiendo una temperatura máxima de operación) desplazará el extremo opuesto a donde se ubica la pieza a mecanizar.

Considerando la temperatura base del eje de husillo igual 25°C, su temperatura máxima igual a 100°C, su longitud inicial $L=300\text{mm}$ y que su coeficiente de expansión térmica es $\alpha=12 \cdot 10^{-6}$ (igual al del acero), la deformación axial debido a la dilatación térmica es igual a:

$$\varepsilon = 12 \cdot 10^{-6} \cdot (100 - 25) \cdot 300 = 0.27\text{mm}$$

Observamos que el efecto de las dilataciones es mucho más grande que el efecto debido a las fuerzas de mecanizado. Sin embargo, esta deformación se da únicamente en la dirección axial y como se mencionó anteriormente, su efecto será regulado gracias a la presencia del rodamiento libre en el extremo opuesto donde se sujeta la pieza a mecanizar.

Por el estilo de trabajo al que será sometido el husillo, es poco probable que alcance dichas temperaturas. Al ser diseñado para uso educativo, sus horas de operación serán muy pocas en comparación con un torno CNC convencional. Sin embargo, aún existe la posibilidad de que sea sometido a carga por periodos largos, por lo que el rodamiento seleccionado posee pistas independientes.

CAPÍTULO 3: COSTO DE FABRICACIÓN Y PLANOS

3.1 Lista de Planos

En la siguiente tabla se muestran los planos de los componentes y ensamble del husillo. El código a emplear para la identificación de los planos es el siguiente: HUS-XXX-PXX-AX, donde:

HUS: Husillo

XXX: Tipo de plano (DES: Despiece, ENS: Ensamble)

PXX: Número de plano

AX: Tamaño de la hoja

Tabla 3: Planos y Codificación

PLANO	DESCRIPCIÓN
HUS-DES-P01-A2	Eje del Husillo
HUS-DES-P02-A3	Tapa Delantera
HUS-DES-P03-A3	Tapa Posterior
HUS-DES-P04-A2	Carcasa del Husillo
HUS-ENS-P05-A2	Ensamble del Husillo
HUS-ENS-P06-A4	Explosión del Husillo

3.2 Estimación del Costo de Fabricación

En este capítulo se presentará un aproximado del costo de la fabricación del husillo. El costo total se dividirá en tres apartados:

- Costo de diseño
- Costos de materiales y elementos seleccionados
- Costo de manufactura

3.2.1 Costo de Diseño

El tiempo que tomó el diseño, los cálculos y fabricación de los planos del husillo fue en total dos meses.

Tabla 4: Costo de Diseño

	Costo	Tiempo	Total
Diseñador	S/930.00/mes	2 meses	S/1860.00
		TOTAL	S/1860.00

3.2.2 Costos de Materiales y Elementos Seleccionados

A continuación, se mostrará el costo de los materiales que deberán ser adquiridos para mecanizar y aquellos que son de catálogo.

Tabla 5: Costo de Materiales y Elementos Seleccionados

ID	Descripción	Material/Norma	Cantidad	Dimensiones	P. Unit (S/)	P. Total (S/)
1	Barra (Eje)	AISI 1045	0.32m	Ø130	6.00/kg	200.00
2	Tuerca de Fijación M50	SKF	1	KM10	34.00	34.00
3	Arandela Dentada Ø50	SKF	1	MB10	5.00	5.00
4	Rodamiento de Contacto Angular	SKF	2	7211 BE-2RZP	350.00	700.00
5	Rodamiento de Rodillos Cilíndricos	SKF	1	N211 ECP	280.00	280.00
6	Tuerca de Fijación M25	SKF	1	KM5	20.00	20.00
7	Arandela Dentada Ø25	SKF	1	MB5	4.00	4.00
8	Barra (Carcasa y tapas)	AISI 1045	0.24m	Ø170	6.00/kg	260.00
					TOTAL	1503.00

3.2.3 Costo de Manufactura

Los costos para el mecanizado de las partes del husillo se muestran a continuación.

Tabla 6: Costo de Manufactura

ID	Descripción	Material/Norma	Cantidad	Precio Unidad (S/)	Precio Total (S/)
1	Eje	AISI 1045	1	200.00	200.00
2	Tapa Delantera	AISI 1045	1	30.00	30.00
3	Tapa Posterior	AISI 1045	1	30.00	30.00
4	Carcasa	AISI 1045	1	150.00	150.00
				TOTAL	410.00

El costo total para la fabricación del husillo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7: Costo de Fabricación del Husillo

Costo de Fabricación	
Costo de Materiales y Componentes Seleccionados	S/1,503.00
Costo de Manufactura	S/410.00
Costo de Montaje	S/50.00
SUBTOTAL	S/1,963.00
Costo de Diseño	S/1,860.00
COSTO TOTAL DEL HUSILLO	S/3,823.00

CONCLUSIONES

- Se completó el objetivo principal de diseñar un husillo de sujeción por pinza. El husillo final cuenta con una longitud total de 300mm, 160 mm de diámetro máximo, y un peso aproximado de 15 kg.
- Se realizaron los planos de ensamble y manufactura necesarios para la fabricación del husillo en talleres locales.
- El precio para la fabricación del husillo tiene mayor peso en los rodamientos y esto se debe a que se buscaron en catálogos de SKF y además cuentas con sellos para evitar el ingreso de sustancias extrañas. Sin embargo, rodamientos similares y sin sellos no afectarán el funcionamiento del husillo pues el régimen de trabajo es mucho menor al de una máquina de producción de piezas en masa.



RECOMENDACIONES

- Si bien el husillo podrá funcionar de acuerdo al proceso solicitado, como mejora en el diseño sería importante el análisis de este como un sistema vibratorio con sus apoyos ubicados en la misma posición de los rodamientos. De esta manera podría obtenerse el rango de velocidades que se debe evitar al trabajar con este husillo pues podría entrar en resonancia y perjudicar el mecanizado.
- Si se desea aumentar el rango de tamaños con los que puede trabajar el husillo, se podría realizar el diseño de una pieza para acoplar chucks de mandíbula que imite el tipo de rosca de las tuercas de sujeción para las pinzas ER.



BIBLIOGRAFÍA

- Dynomax. (2012). *Book of Spindles*. Retrieved from <https://dynospindles.com/vault/technical/Book-of-Spindles-Part-1.pdf>
- International Organization of Standardization. (2006). *ISO - 15488*.
- Kutlu, A. (2016). *Design and development of a lathe spindle*.
- Li, Y., Zhao, W., Lan, S., Ni, J., Wu, W., & Lu, B. (2015). A review on spindle thermal error compensation in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 95(April), 20–38.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.04.008>
- Lopez de Lacalle, L. N., & Lamikiz, A. (2009). *Machine Tools for High Performance Machining*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-380-4>
- Marañón, J. A. (2013). Los errores en el mecanizado - Metalmecánica. Retrieved October 23, 2019, from Interempresas.net website: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/116756-Los-errores-en-el-mecanizado.html>
- NSK. (2009). *Machine Tool Spindle Bearing Selection & Mounting Guide*.
- Rego-Fix. (n.d.-a). Standard Clamping Collets. Retrieved September 24, 2020, from <https://us.rego-fix.com/en/products/collets/standard?system=ER>
- Rego-Fix. (n.d.-b). Standard Clamping Collets. Retrieved September 24, 2020, from <https://us.rego-fix.com/en/products/components/clamping-nuts/ER>
- SKF. (n.d.-a). Precarga, juego y rigidez. Retrieved September 26, 2020, from <https://www.skf.com/pe/products/super-precision-bearings/cylindrical-roller-bearings/preload-clearance-stiffness>
- SKF. (n.d.-b). Rigidez del sistema. Retrieved November 19, 2019, from <https://www.skf.com/pe/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/principles/design-considerations/system-rigidity/index.html>
- SKF. (2018). *Rolling bearings SKF*. 1–1722. Retrieved from skf.com/go/17000

Tschätsch, H. (2009). *Applied Machining Technology*.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-01007-1>

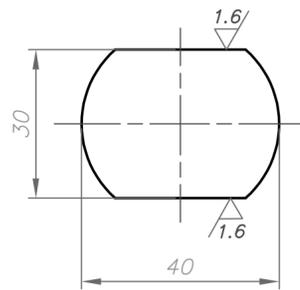
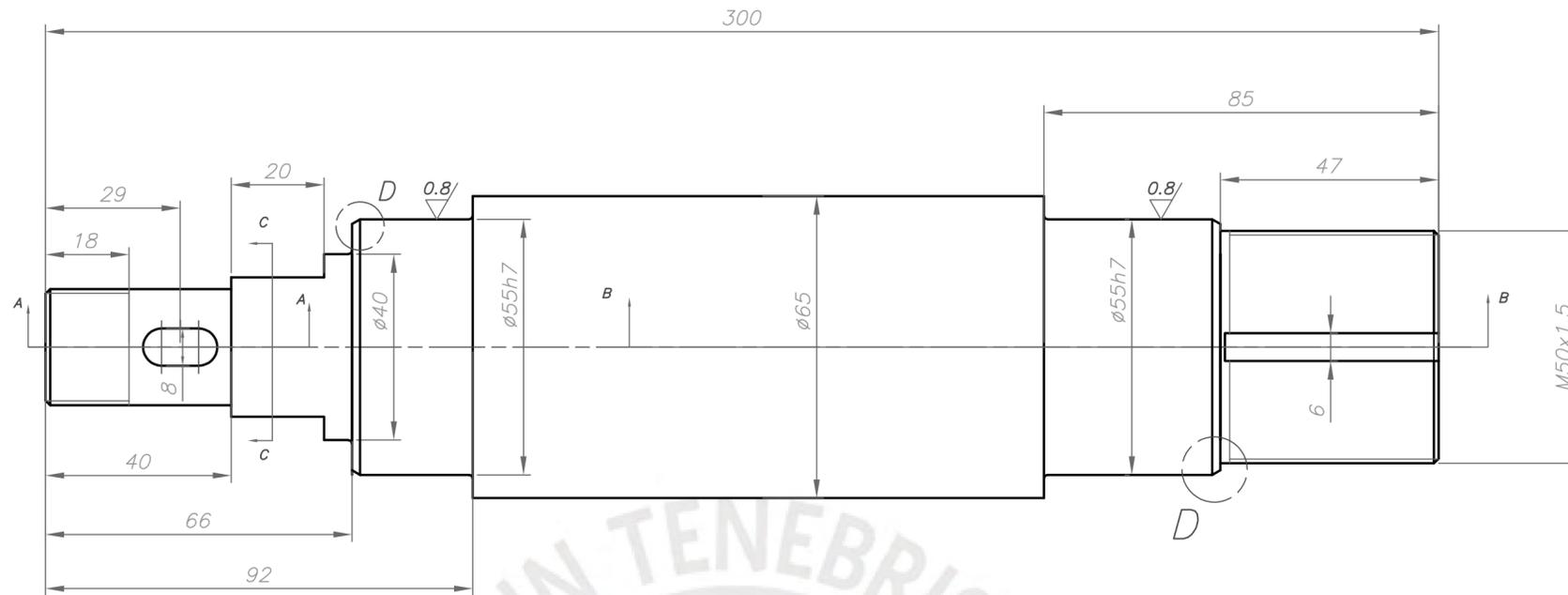
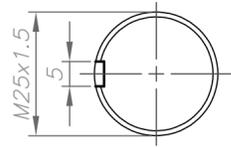
Uhlmann, E., & Hu, J. (2012). Thermal modelling of a high speed motor spindle.

Procedia CIRP, 1(1), 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.056>

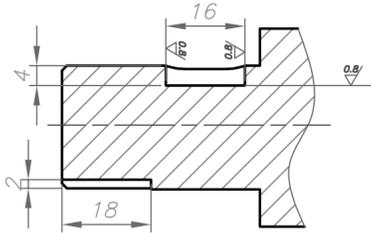


ANEXOS
PLANOS DE DESPIECE Y ENSAMBLE
DEL HUSILLO

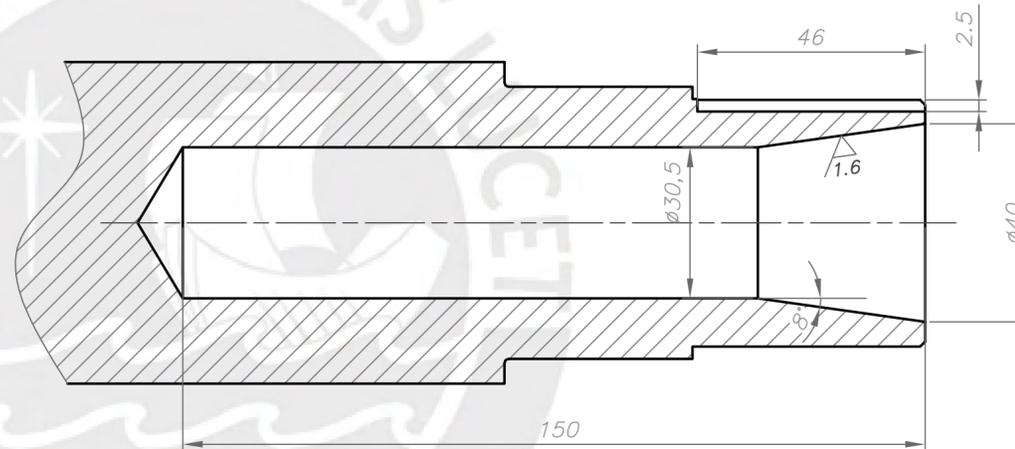




SECTION C-C
SCALE 1 : 1

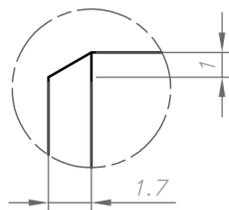


SECTION A-A
SCALE 1 : 1



SECTION B-B
SCALE 1 : 1

CHAFLANES NO INDICADOS 1x45°
REDONDEOS NO INDICADOS R1

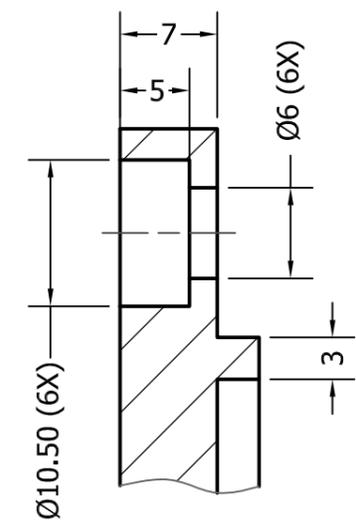
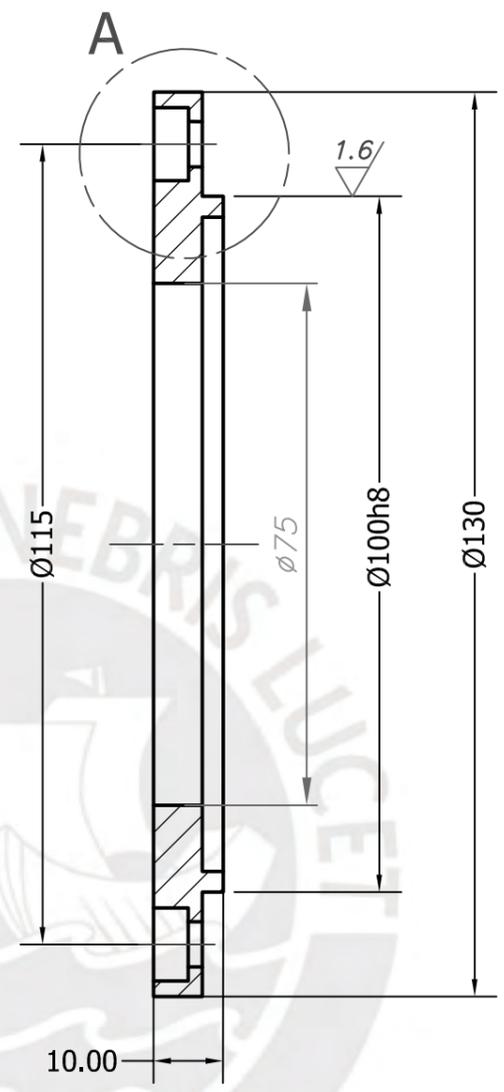
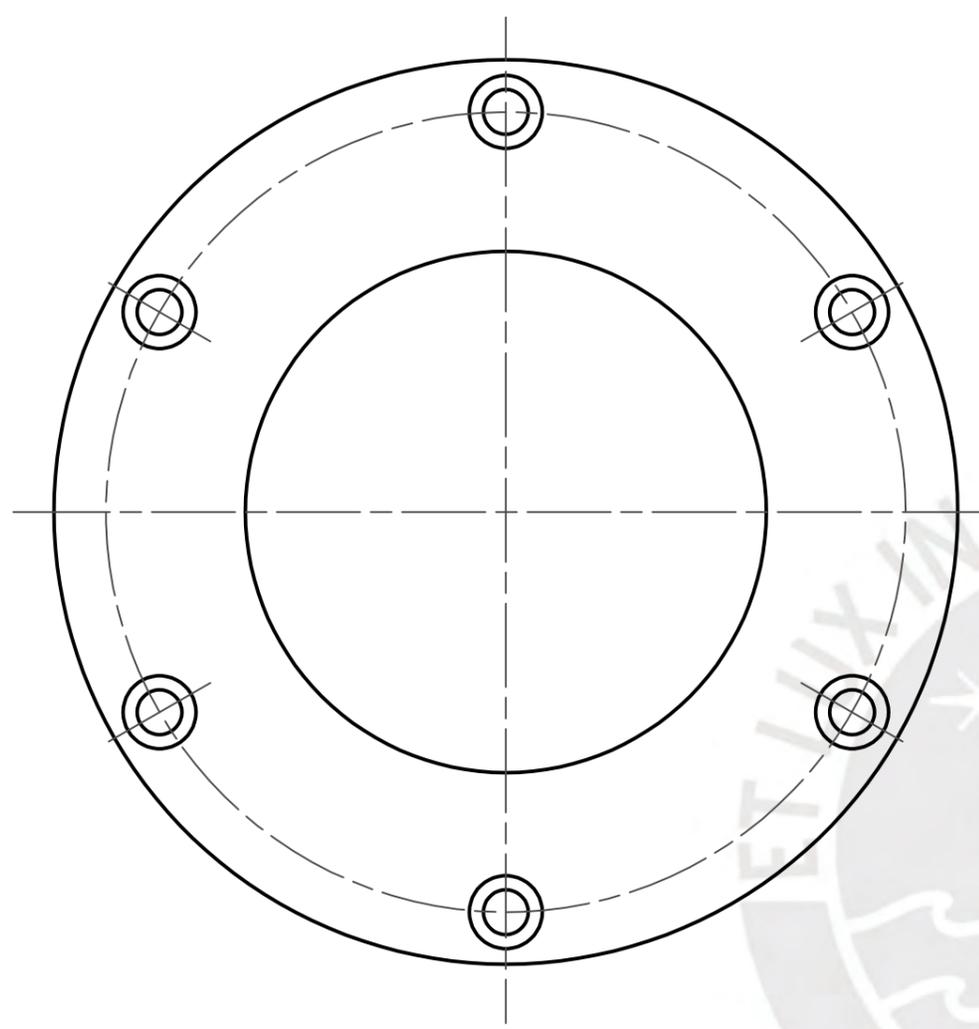


DETALLE D
SCALE 5 : 1

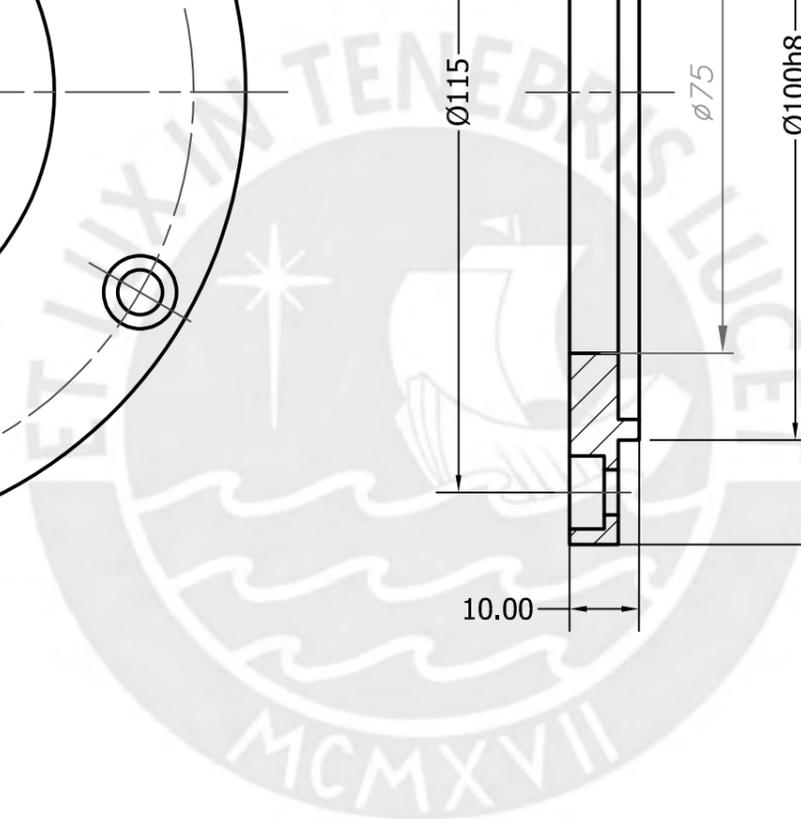
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

55h7	55.00	54.97
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

ACABADO SUPERFICIAL 3,2 / (0,8 / 1,6)	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 MEDIO	MATERIAL AISI 1045
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCION 	EJE DEL HUSILLO	ESCALA 1:1
20151393	CARREÑO ROJAS, GERMAN STEFANO	FECHA: 2.12.19
		LAMINA: A2



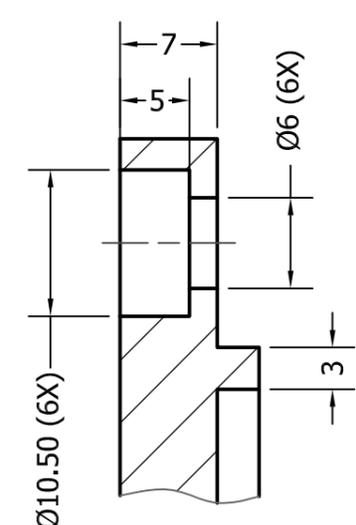
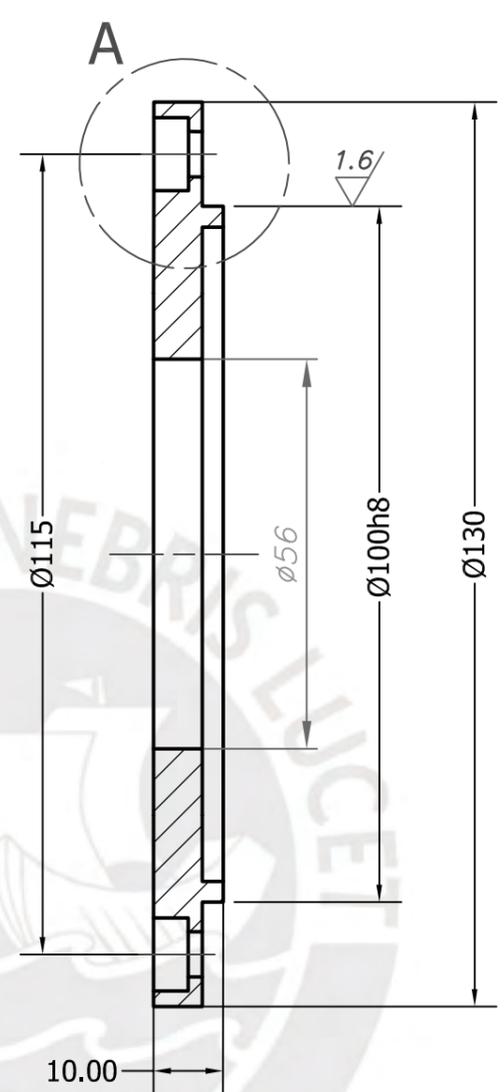
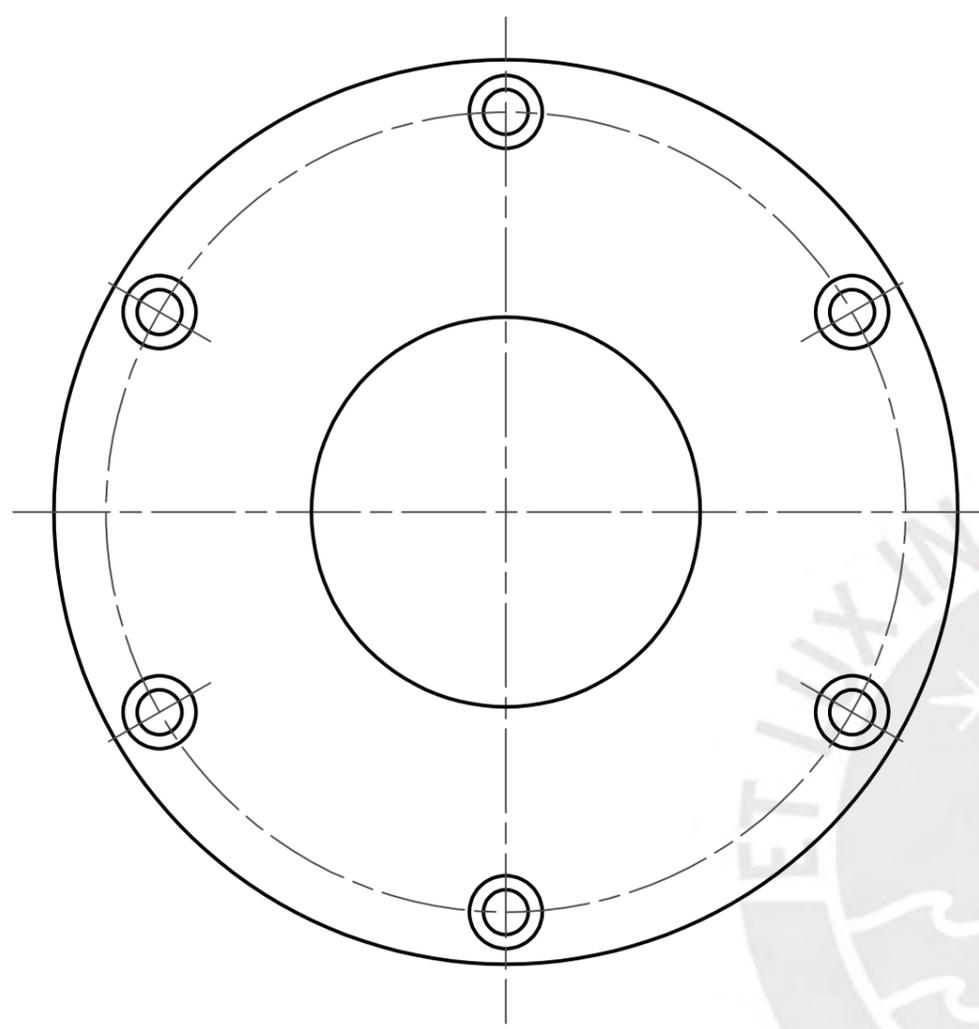
DETAIL A
SCALE 2 : 1



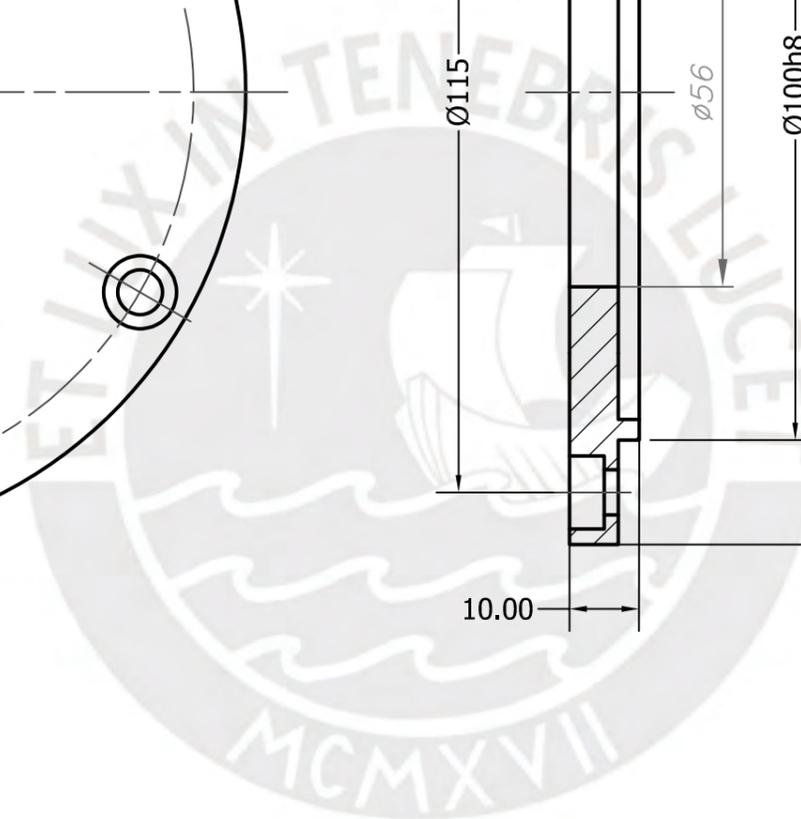
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

100h8	100.000	99.937
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

ACABADO SUPERFICIAL 3.2/ (1.6/)	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 MEDIA	MATERIAL AISI 1045
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
METODO DE PROYECCIÓN 	TAPA DELANTERA	ESCALA 1:1
20151393	CARREÑO ROJAS, GERMAN STEFANO	FECHA: 2.12.19
		LAMINA: A3



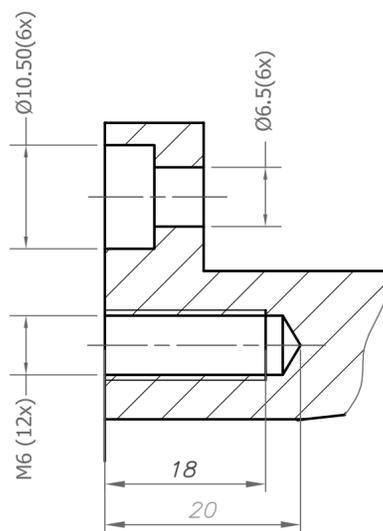
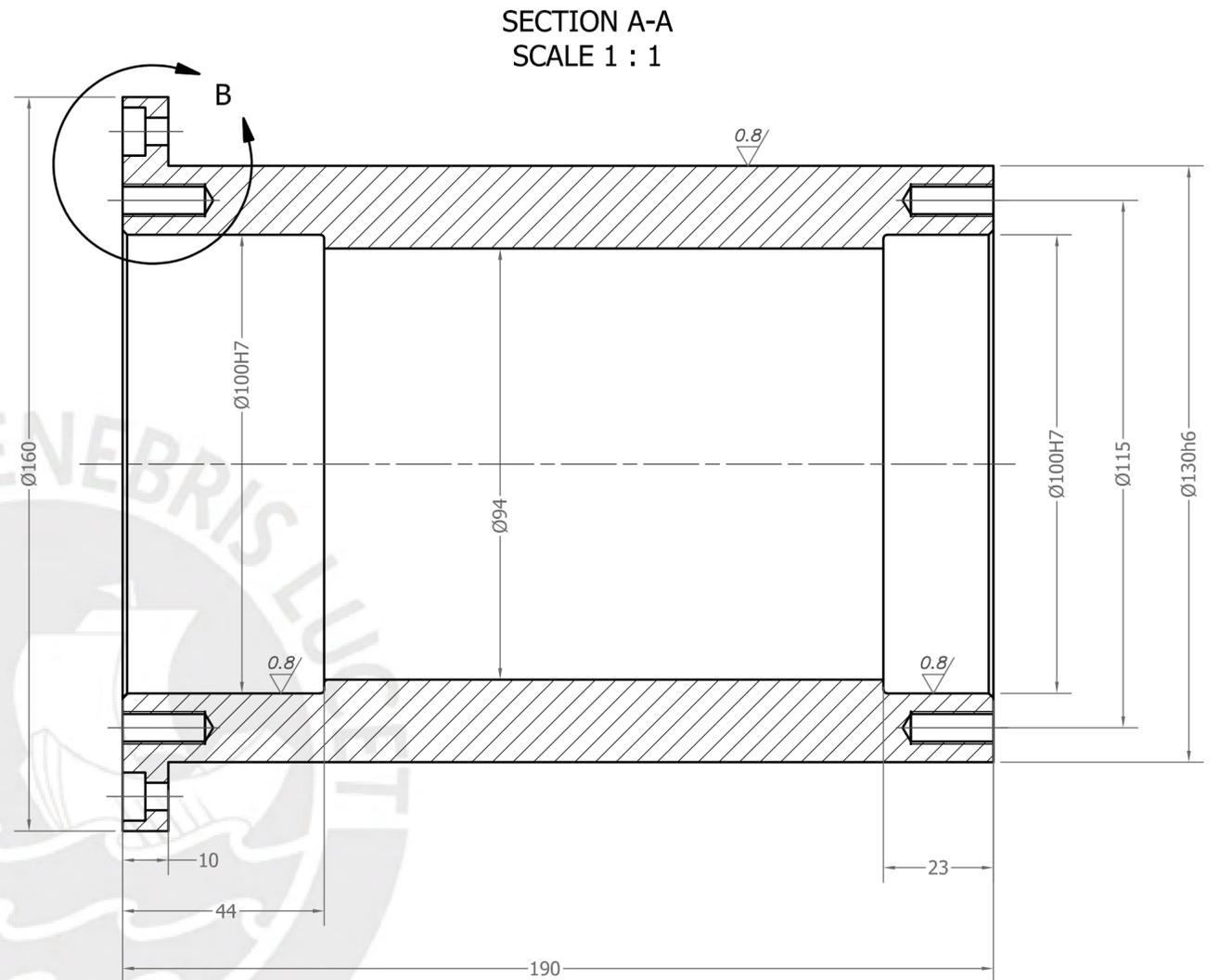
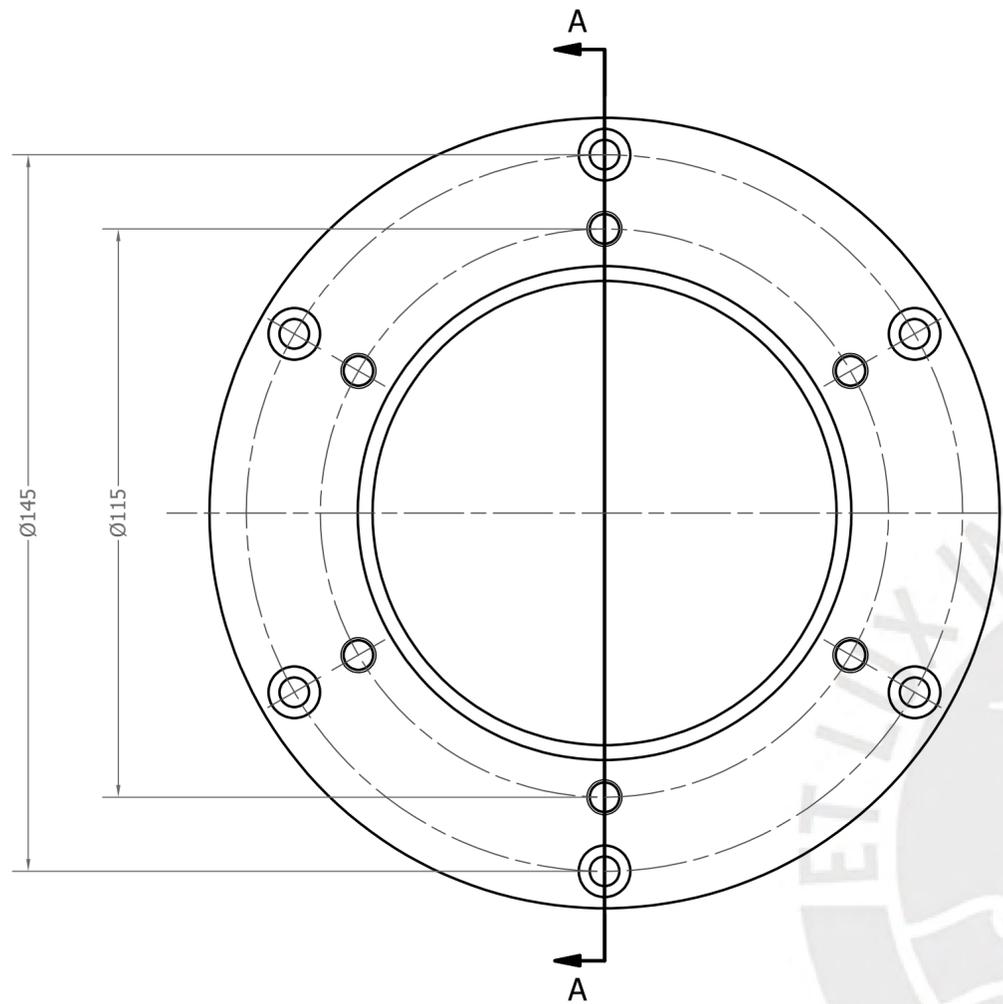
DETALLE A
ESCALA 2 : 1



TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

100h8	100.000	99.937
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

ACABADO SUPERFICIAL 3.2/ (1.6/)	TOLERANCIA GENERAL SEGUN DIN 7168 MEDIA	MATERIAL AISI 1045
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
METODO DE PROYECCIÓN 	TAPA POSTERIOR	ESCALA 1:1
20151393	CARREÑO ROJAS, GERMAN STEFANO	FECHA: 2.12.19
		LAMINA: A3



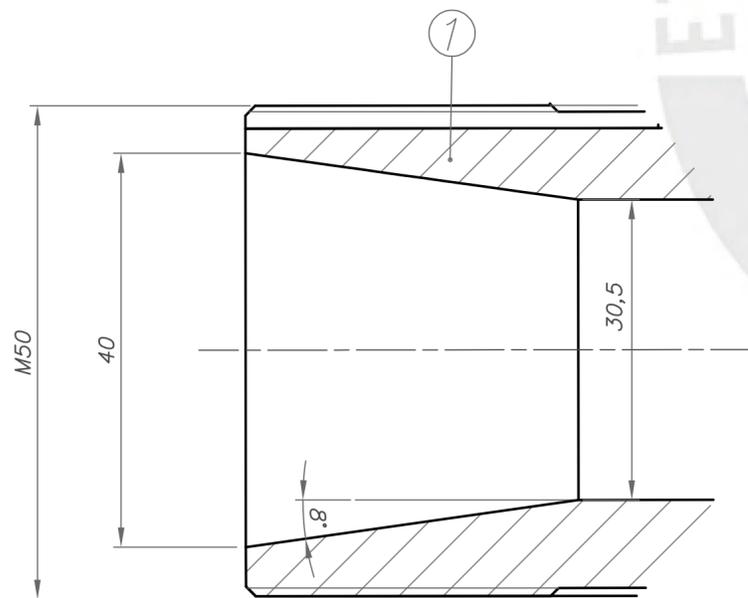
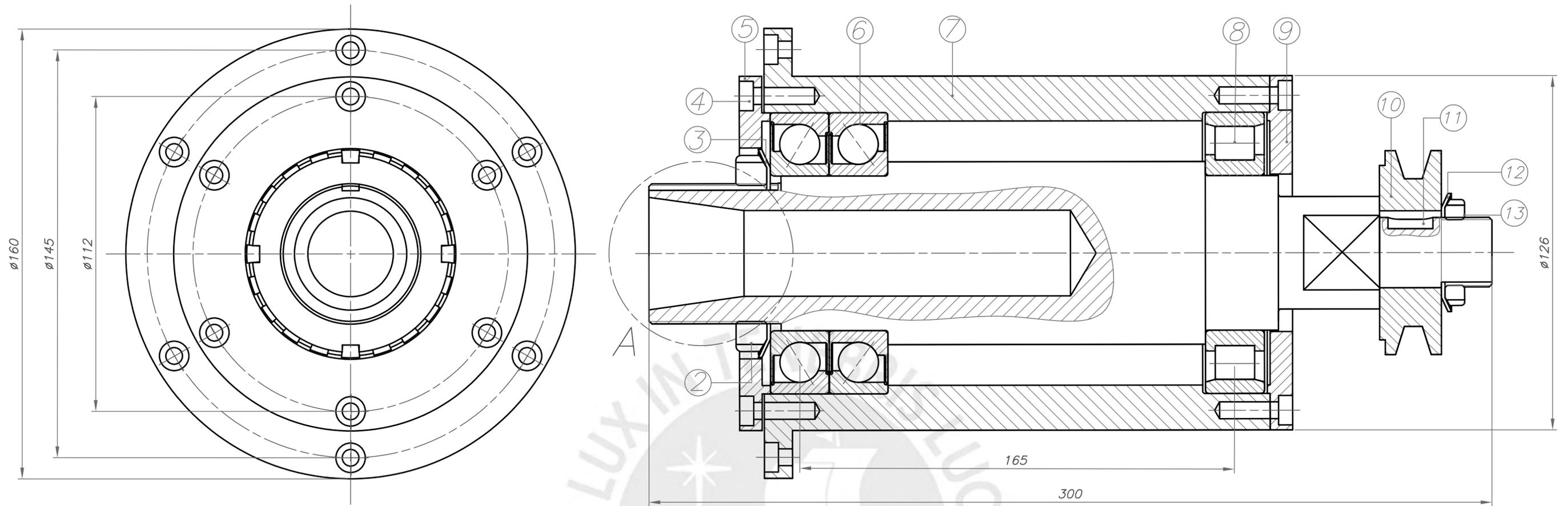
CHAFLANES NO INDICADOS 1x45°

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGUN DIN 7168					
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
MEDIO	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

DETAIL B
SCALE 2 : 1

130h6	130.000	129.975
100H7	100.035	100.000
COTA NOMINAL	COTA MAXIMA	COTA MINIMA

ACABADO SUPERFICIAL 3,2/ (0,8/)	TOLERANCIA GENERAL DIN 7168 MEDIO	MATERIAL AISI 1045
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ ESTUDIOS GENERALES CIENCIAS – ESPECIALIDAD: ING. MECÁNICA		
METODO DE PROYECCIÓN 	DIBUJO MEC. ASIST. COMP.-U209-	ESCALA 1:1
20151393	CARREÑO ROJAS, GERMAN STEFANO	FECHA: 2.12.19
		LAMINA: A2



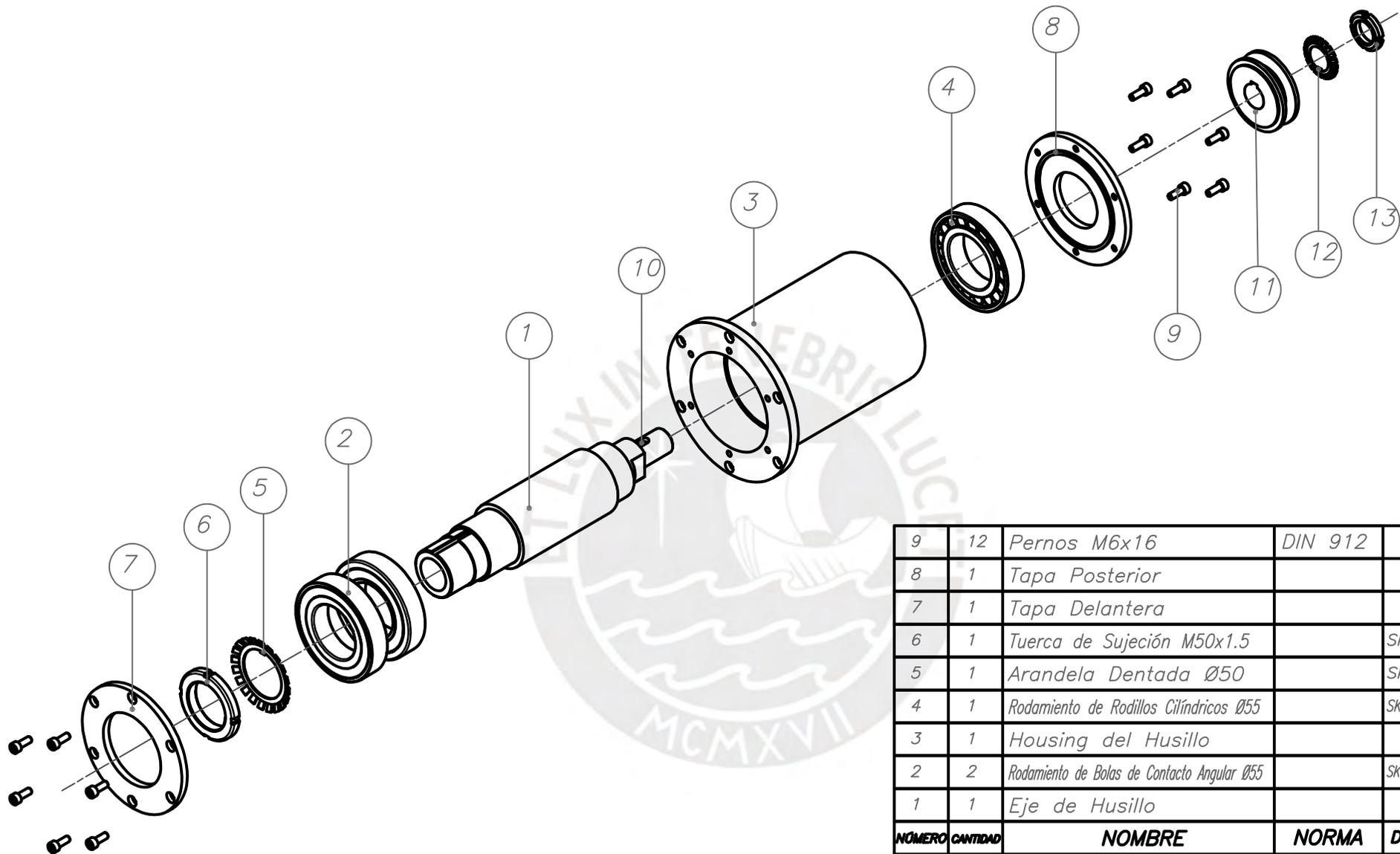
Detalle A (2:1)

Dimensiones extraídas de la norma DIN 6499 B/ ISO 15488

13	1	Tuerca de Fijación M25x1.5		SKF: KM5 o similar	
12	1	Arandela dentada Ø25		SKF: MB5 o similar	
11	1	Chaveta 8x5x16	DIN 6885 A		
10	1	Polea			
9	1	Tapa Posterior	AISI 1045		
8	1	Rodamiento de Rodillos Cilíndricos Ø=55		SKF: N 211 ECP o similar	
7	1	Carcasa del Husillo	AISI 1045		
6	2	Rodamiento de Bola de Contacto Angular Ø=55		SKF: 7211 BE-2RZP o similar	
5	1	Tapa Delantera	AISI 1045		
4	12	Pernos M6x16	DIN 912		
3	1	Arandela Dentada Ø50		SKF: MB10 o similar	
2	1	Tuerca de Fijación M50x1.5		SKF: KM10 o similar	
1	1	Eje del Husillo	AISI 1045		
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Ingeniería Mecánica

MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESCALA
Husillo de Torno CNC	1:1
20151393	Carreño Rojas, German Stefano
	FECHA: 2019.26.11
	LÁMINA: A2



9	12	Pernos M6x16	DIN 912	
8	1	Tapa Posterior		
7	1	Tapa Delantera		
6	1	Tuerca de Sujeción M50x1.5		SKF: KM10
5	1	Arandela Dentada Ø50		SKF: MB10
4	1	Rodamiento de Rodillos Cilíndricos Ø55		SKF: N 211 ECP
3	1	Housing del Husillo		
2	2	Rodamiento de Bolas de Contacto Angular Ø55		SKF: 7211 BE-2RZP
1	1	Eje de Husillo		

NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE	NORMA	DESCRIPCIÓN
--------	----------	--------	-------	-------------

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

13	1	Tuerca de Sujeción M25x1.5		SKF: KM5
12	1	Arandela Dentada Ø25		SKF: MB5
11	1	Polea		
10	1	Chaveta 8x5x16	DIN 6885 A	
NÚMERO	CANTIDAD	NOMBRE	NORMA	DESCRIPCIÓN

METODO DE PROYECCIÓN	ESCALA
	EXPLOSIÓN HUSILLO CNC
20151393	1:5
CARREÑO ROJAS, GERMAN STEFANO	FECHA: 2019.12.18
	LAMINA: A4