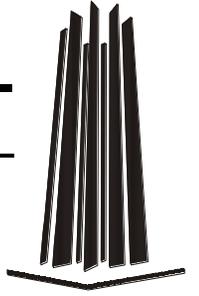




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

CAMPUS ARAGÓN



DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN
DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO
CON ALAMBRES DE NI-TI

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A:

UZZIEL RÍOS CORTÉS

ASESOR:

DR. JACINTO CORTÉS PEREZ.

CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL, EDO. DE MEXICO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN



Jurado Asignado:

PRESIDENTE: DR. DANIEL ALDAMA ÁVALOS
VOCAL: DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ
SECRETARIO: M. EN I. ALBERTO REYES SOLÍS
SUPLENTE: DR. JOSÉ ANTONIO SOUZA JIMÉNEZ
SUPLENTE: M. EN I. DE MATIAS AGUILAR FRANCISCO

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGON, UNAM

CENTRO TECNOLOGICO ARAGON, UNAM

Asesor de tesis

Dr. Jacinto Cortés Pérez

Firma

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”



Agradecimientos

A mis padres:

Francisca Cortés Aragón y Alejandro Ríos García ya que sin el amor que se tienen, no hubiera experimentado todos los momentos, durante mi formación académica.

A la UNAM:

Por darme una visión cultural y científica para un mejor entendimiento de mi entorno.

A mis hermanos:

Alejandro por las asesorías tan emocionantes para la realización de éste trabajo de tesis.

Erik y Juan por cubrirme en el trabajo y su apoyo incondicional.

A mi tío:

Jacobo Ríos García por apoyarme con la parte de fundición en la fabricación del motor con MCM7.

A mis amigos y compañeros del Laboratorio de Mecánica Aplicada del Centro Tecnológico Aragón:

Salvador, Ángel, Francisco, Néstor, Carlos, Daniel, Leos, Israel, Arturo... por el apoyo durante las pruebas para la caracterización del motor.

A mi asesor de tesis:

Dr. Jacinto Cortés Pérez por dirigir esta tesis y mantener esa pasión sobre el comportamiento de los materiales.

A mis sinodales:

M en C. Alberto Reyes Solís, Dr. José Antonio Sousa Jiménez, Dr. Daniel Aldama Avalos, M en C. De Matías Aguilar Francisco por sus valiosos comentarios y sugerencias para esta tesis.

Al programa de apoyo a Proyectos de Innovación e Investigación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM: debido a que el desarrollo de la presente tesis fue posible gracias al apoyo otorgado al proyecto: "Aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma al diseño de dispositivos recuperadores de energía de desecho y/o de colectores solares" (97102414).



Índice General

Jurado Asignado:	2
Agradecimientos	iii
Índice General	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	viii
Introducción	ix
Capítulo 1	11
1. Materiales con Memoria de Forma (MMF).	11
1.1 Generalidades de los MMF.....	11
1.1.1 Temperaturas de transformación.....	12
1.1.2 Diagramas Esfuerzo-Temperatura-Transformación.	12
1.1.3 Comportamiento mecánico de los materiales con memoria de forma.....	14
1.1.4 Anisotropía mecánica de los MMF.....	14
1.1.5 Modelos del comportamiento de MMF.	15
1.2 Motores Térmicos con MMF.....	17
1.2.1 Principio de funcionamiento de los motores térmicos con MMF.....	17
1.2.2 Clasificación de los motores térmicos con Memoria de Forma.....	20
1.3 Eficiencia de los motores térmicos con MMF.....	24
1.3.1 Modelo de eficiencia térmica.....	24
Capítulo 2	28
2Diseño y construcción del motor de inmersión accionado con alambres de NiTi.	28
2.1 Diseño conceptual.....	28
2.1.1 Funcionamiento del motor de inmersión accionado con alambres de NiTi.	32



2.1.2	Requerimientos del diseño.....	34
2.1.3	Soluciones conceptuales para cada elemento que integra el motor.....	35
2.2	Diseño detallado.....	41
2.2.1	Fuerzas de empuje de los alambres de NiTi.....	41
2.2.2	Análisis estructural de los elementos críticos.....	44
2.2.2.1	Brazos.....	45
2.2.2.2	Manivela.....	53
2.2.2.3	Aro.....	59
2.3	Fabricación del prototipo.....	63
2.3.1	Alambres de NiTi.....	63
2.3.2	Elementos mecanizados.....	64
Capítulo 3.....		68
3. Resultados y discusión.....		68
3.1	Pruebas al prototipo.....	68
3.1.1	Instrumentación y resguardo de datos.....	68
3.1.2	Caracterización del motor sumergible.....	72
3.2	Análisis de resultados.....	73
3.2.1	Prueba gradiente térmico vs tiempo.....	73
3.2.2	Prueba gradiente térmico vs revoluciones por minuto.....	74
3.2.3	Tiempo de autonomía y gradiente mínimo de operación.....	75
3.2.4	Obtención de gradiente térmico vs torque.....	77
3.2.5	Obtención de la potencia generada.....	79
Conclusiones.....		82
Bibliografía.....		83
Apéndice 1. Formulario Vigas.....		85
Anexo 1. Caracterización del Resorte.....		86
Anexo 2. Planos de Fabricación.....		89



Índice de Figuras

Figura 1.1. Temperaturas de transformación Ms , Mf, As, Af, y fracción volumétrica-temperatura. .	12
Figura 1.2. Diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación típico de un material con memoria de forma.....	13
Figura 1.3. Comportamiento mecánico característico de una aleación con memoria de forma [7].	14
Figura 1.4 Principio de funcionamiento del motor térmico con memoria de forma. [14].....	18
Figura 1.5 Diagramas a) esfuerzo-deformación y b) esfuerzo-temperatura y fase de transformación donde se muestra el esfuerzo de recuperación [15 y 13].	19
Figura 1.6. Motores con poleas.	21
Figura 1.7. Movimiento en motores secuenciales.	21
Figura 1.8. Motor con Interacción de Campo Gravitacional.	22
Figura 1.9. . Motor térmico con MMF de Ridgway Banks.	23
Figura 1.10. Energía útil en un diagrama esfuerzo- deformación para un MMF.	24
Figura 1.11. a) Ciclo de trabajo con un σ_{Cb} grande y en b) con un σ_{Cb} reducido.	25
Figura 1.12. Variaciones del gradiente térmico necesario para completar un ciclo de transformación de energía en función de la orientación cristalina [13].	27
Figura 2.1 Explosivo Motor Térmico.	29
Figura 2.2. a). Manivela b). Eje c). Bielas d). Rodamiento Sujetador de Bielas e). Corredera.....	32
Figura 2.3. Dirección de las Fuerzas en Lado Caliente (Flechas Azules) y Relajamiento del Alambre de Ni-Ti en el Lado Frio.	33
Figura 2.4. Componentes Tangenciales de la fuerza ejercida sobre el aro (Vista Superior).	33
Figura 2.5. Anillo Sujetador de Bielas.	34
Figura 2.6. Depósitos de agua.	36
Figura 2.7. Movimiento de Rotación en Bielas y Rotor.	36
Figura 2.8. Las Bielas Trasladan y Guían a los Alambres de Ni-Ti Además de Servir como Corredera.	38
Figura 2.9. Vástago y Corredera Para la Ubicación Horizontal y Vertical del Motor.	38
Figura 2.10. Rampas para el transporte de los alambres de Ni-Ti.	39
Figura 2.11. Topes Para la Aplicación de la Fuerza del Alambre Ni-Ti.	40
Figura 2.12. Movimiento de las Bielas con Respecto al Anillo Sujetador de Bielas.	40
Figura 2.13. Posición del motor entre los contenedores y de la manivela.	41
Figura 2.14. Distancias entre tope y aro en cada biela.	42
Figura 2.15. Arreglo para la caracterización de los alambres.	43
Figura 2.16. Elementos considerados como críticos.	44
Figura 2.17. Cargas (Frm), (P) y Momento Flector (Mf) en el Brazo.	45
Figura 2.18. a) Componentes F_n y (F_t) de las fuerzas en las bielas y b) brazo de palanca para las fuerzas tangenciales (F_t)	47
Figura 2.19. Cargas y momentos internos en el Punto A.	50
Figura 2.20. Estado de esfuerzos en el Punto A.	51



Figura 2.21. Circulo de Mohr	53
Figura 2.22. Momento flector (Mf) y Cargas (Px) y (Py) en la Manivela debido a las Fuerzas de los Alambres de NiTi.	54
Figura 2.23. Ángulos de las Fuerzas normales al aro para obtener (Px) y (Py).	54
Figura 2.24. Cargas y momentos internos en el Punto A.	55
Figura 2.25. Estado de esfuerzos en el Punto A.	57
Figura 2.26. Circulo de Mohr.	58
Figura 2.27. Centroides y Segundo Momento de Inercia de la Sección Transversal de Aro.....	59
Figura 2.28. Una tercera parte del aro se toma como un elemento recto [22]......	61
Figura 2.29. Viga doblemente empotrada con cargas puntuales simétricas.	61
Figura 2.30. Arreglo de Alambres de NiTi.....	63
Figura 2.31. Rotor.....	64
Figura 2.32. Dimensiones de la base del rotor.	64
Figura 2.33. Anillo Sujetador de Bielas.	65
Figura 2.34. Explosivo del motor y cuadro de partes.....	67
Figura 3.1. Elementos del sistema de control para la realización de pruebas.	68
Figura 3.2. PLC marca UNITRONICS modelo: Vision 120-22-UN2.	69
Figura 3.3. Termopar.	70
Figura 3.4. Encoder para la medición de las RPM.	70
Figura 3.5. Instrumentación del Motor.....	71
Figura 3.6. Monitoreo y Adquisición de Datos.	71
Figura 3.7. Inicio de las pruebas.....	72
Figura 3.8. Gradiente térmico vs Tiempo.....	73
Figura 3.9. Gráfico gradiente térmico vs revoluciones.	74
Figura 3.10.Obtención del momento de inercia en Autodesk Inventor.....	78
Figura 3.11. Torque vs gradiente térmico.....	78
Figura 3.12. Potencia vs gradiente térmico.	79
Figura 3.13. Banco de Pruebas con Calentador Solar.	80
Figura 3.14. Arreglo del motor con MMF y generador eléctrico alimentando un LED.	81
Figura 0.1. Arreglo para la medición de la fuerza del alambre mediante un resorte.....	86
Figura 0.2. Arreglo para la caracterización del resorte.....	87
Figura 0.3. Grafica Fuerza vs ΔL	88



Índice de Tablas

Tabla 1.1. Características de los diferentes tipos de motores térmicos con MMF [15 y 13].	20
Tabla 1.2. Comportamiento mecánico de tres diferentes aleaciones con memoria de forma en función de la orientación cristalina [13].	26
Tabla 2.1. Piezas Elementales del Motor Térmico.	30
Tabla 2.2. Fuerzas generadas por cada biela del motor térmico inducida por el alambre con memoria que lleva montado.	44
Tabla 2.3. Peso de los elementos que soportan los brazos del rotor.	46
Tabla 2.4. Torque generado en cada biela y componentes de fuerza y brazo de palanca.	48
Tabla 2.5. Obtención de esfuerzo efectivo.	52
Tabla 2.6. Obtención de esfuerzo efectivo.	57
Tabla 3.1. Valores promedio obtenidos durante la experimentación.	75
Tabla 3.2. Resultados a Partir de la Prueba.	79
Tabla A.1. Mediciones para la caracterización del resorte.	87



Introducción

La falta de sustentabilidad del sistema energético en la actualidad, se debe a que los combustibles fósiles constituyen el 81% de la energía que se usa internacionalmente [1], por lo que es de gran importancia encontrar nuevos métodos para la recuperación de energía. En nuestro país la mayor parte de la energía eléctrica que se consume es generada en centrales termoeléctricas en las cuales la transformación de la energía es muy ineficiente quedando en mayor medida energía calorífica clasificada de bajo grado ya que las temperaturas son menores a 200 °C por lo que la recuperación de energía utilizando motores térmicos con memoria de forma son una opción que se extiende en la recuperación de energía geotérmica y en los procesos de fabricación de las industrias donde se desechen energía calorífica transformándola en trabajo mecánico útil.

El objetivo del presente trabajo es caracterizar un motor térmico accionado con MMF de fabricación propia, por lo que se abordan los siguientes temas:

1. Generalidades de los materiales con memoria de forma.

Se mencionan los efectos asociados, las temperaturas de transformación y la eficiencia según la orientación cristalina de los MMF. Además, se realiza una breve recopilación de motores térmicos con MMF que se encuentran en la literatura. De estos motores, se selecciona uno para su rediseño y fabricación.

2. Diseño y construcción del motor de inmersión accionado con alambres de NiTi.

En el diseño conceptual del motor se da una descripción detallada del funcionamiento y de las partes que conforman al arreglo. Posteriormente, en el diseño detallado, se analiza la resistencia mecánica de los elementos críticos, con el fin de no sobredimensionar para limitar el peso del arreglo. Por último se muestran una serie de fotografías del proceso de fabricación del motor.

3. Resultados y discusión.

Mediante un sistema de adquisición de datos se obtienen las siguientes mediciones durante la operación: El tiempo en que se alcanza el equilibrio térmico y las revoluciones por minuto del motor según el gradiente térmico.

Con estos datos se calcula el torque y la potencia del motor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN



Además de hacer una instrumentación y resguardo de datos para el análisis de la obtención de potencia generada usando las propiedades termomecánicas de NiTi.



Capítulo 1

1. Materiales con Memoria de Forma (MMF).

1.1 Generalidades de los MMF.

Existen algunos materiales cerámicos, polímeros, metales puros y aleaciones metálicas que tienen la capacidad de recuperar su forma original mediante un simple calentamiento, después de haber sido deformados de manera aparentemente plástica a baja temperatura [2,3].

A estos materiales se les conoce como Materiales con Memoria de Forma (MMF) y presentan una serie de efectos como son: a) Memoria de Forma Simple, b) Doble efecto memoria de forma y c) efecto superelástico entre otros.

Estos efectos han sido ampliamente descritos en la literatura [3,4] y se sabe que están asociados a una transformación martensítica de tipo termoelástica que puede ser inducida por temperatura (enfriamiento), por esfuerzo o por combinación de ambos [4]. Es importante mencionar que existe también el llamado Efecto Memoria de Forma Magnética el cual, a diferencia los efectos termo-mecánicos mencionados, se activa por la aplicación de esfuerzo y un campo magnético [4].

Según G.B. Olson, M. Cohen y P.C. Clapp [5], la transformación martensítica que presentan los MMF es displaciva, de primer orden y se constituye principalmente por una deformación homogénea de red tipo corte a partir de ciertos planos llamados de hábito. En realidad, existen 24 variantes de martensita que pueden formarse en las Aleaciones con Memoria de Forma (AMF) termo-mecánicas las cuales cada una se forma a partir de un plano y una dirección cristalina.



1.1.1 Temperaturas de transformación.

Cuando la transformación martensítica es inducida sólo por temperatura, enfriando la fase madre llamada austenita, una fracción volumétrica de martensita va apareciendo y aumentando. El proceso inverso ocurre cuando, estando el material en fase martensita, una fracción volumétrica del material va transformando a fase austenita conforme se incrementa la temperatura. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama fracción volumétrica transformada (f) – temperatura donde se aprecian cuatro temperaturas críticas del material: M_s , M_f , A_s y A_f que corresponden con las temperaturas de inicio y fin de la transformación martensítica (M_s y M_f) así como las de inicio y término de la transformación inversa (A_s y A_f) las cuales corresponden con el 10% y el 90% de fracción volumétrica transformada.

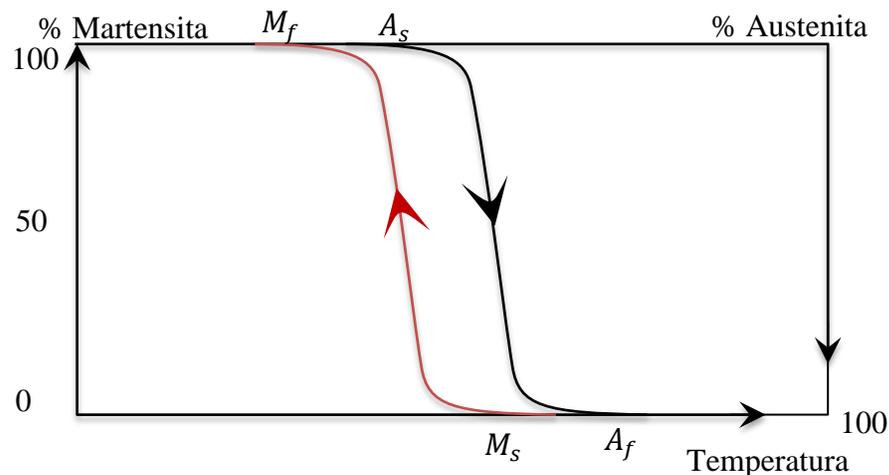


Figura 1.1. Temperaturas de transformación M_s , M_f , A_s , A_f , y fracción volumétrica-temperatura.

1.1.2 Diagramas Esfuerzo-Temperatura-Transformación.

Los tres tipos de transformaciones (por enfriamiento, por esfuerzo y por combinación de ambos) se pueden apreciar en los llamados diagramas esfuerzo-temperatura-transformación. Un diagrama de este tipo se presenta en la Figura 1.2.

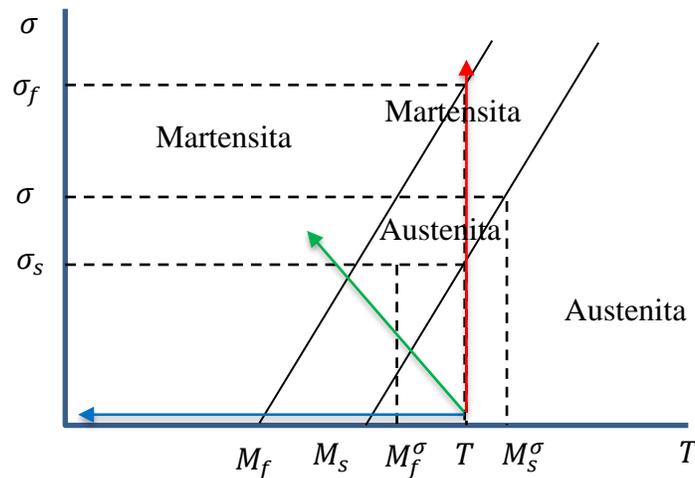


Figura 1.2. Diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación típico de un material con memoria de forma.

La Transformación Martensítica Inducida por Enfriamiento (TMIE), representada por la línea azul, parte de una temperatura fijada en la fase austenita ($T > M_s$) hasta llegar a una menor que M_f sin cargar el material, es decir ($\sigma = 0$).

Para inducir la Transformación Martensítica (TM) por esfuerzo, que se representa con la línea roja, se carga el material lo suficiente (σ_f) para llegar a la zona de martensita, manteniendo una temperatura constante ($T > M_s$).

En la TM inducida por combinación de esfuerzo y temperatura, se observa que estas dos variables actúan. Manteniendo un esfuerzo constante (σ) luego enfriando el material desde una temperatura $T > A_f$ hasta otra $T < M_f^\sigma$ el material transforma de austenita a martensita.

La pendiente de las rectas que se muestran en la Figura 1.2 es llamada razón de Classius-Clapeyron y es característica de un tipo de transformación martensítica específica.

Conforma a una visión microplástica se tiene la referencia que la transformación martensítica sucede en las direcciones $[-111]$ y $[001]$. Lo cual no contraviene un análisis microplástico tradicional que nos indica que las celdas unitarias BCC inician su transformación con la familia de planos $\{110\}$ y con la familia de direcciones $\langle 111 \rangle$ lo cual también sucede al empezar la transformación martensítica.

1.1.3 Comportamiento mecánico de los materiales con memoria de forma.

Las propiedades termodinámicas en un MMF se puede observar en la Figura 1.3, correspondiente a una aleación de NiTi con memoria de forma [3,4,6], en un diagrama esfuerzo-deformación-temperatura en el cual se muestran dos efectos asociados a los MMF. La línea azul muestra el llamado efecto memoria de forma simple mientras que la curva roja muestra el efecto super-elástico. Como se puede ver, el comportamiento de los MMF es considerablemente más complejo que el que presentan los materiales convencionales ya que es no lineal, histerético, dependiente de la temperatura y altamente anisótropo.

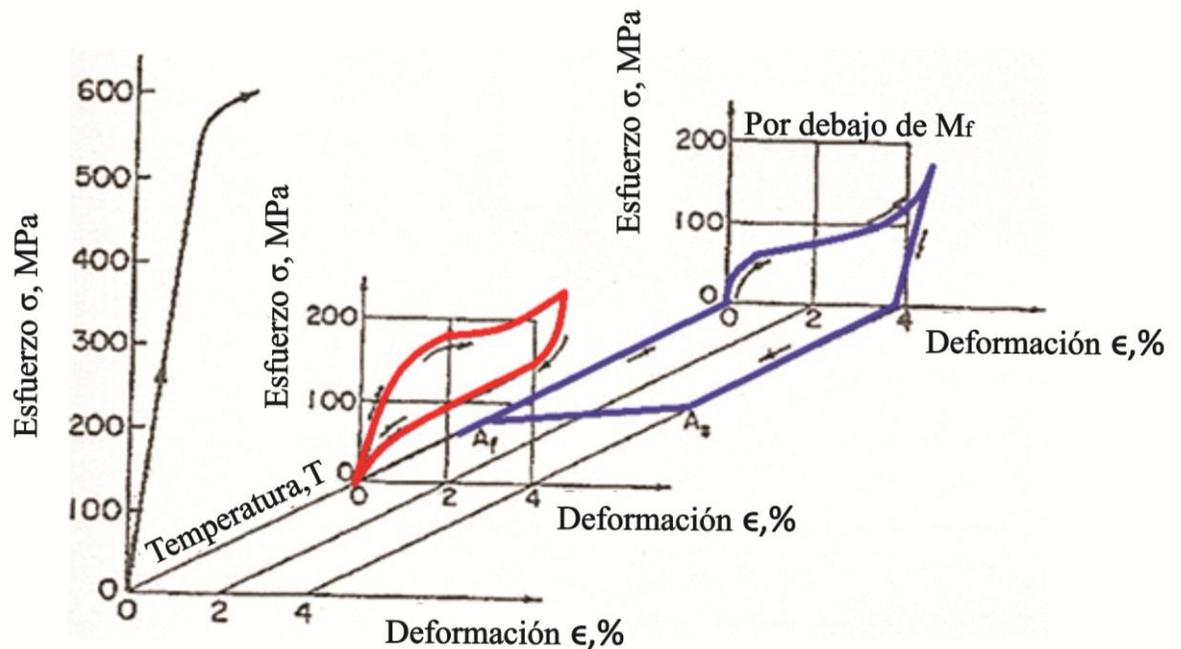


Figura 1.3. Comportamiento mecánico característico de una aleación con memoria de forma [7].

1.1.4 Anisotropía mecánica de los MMF.

La anisotropía mecánica que se presenta en los MMF se puede dividir en tres formas:

- La que se asocia a la fase austenítica asociada a su estructura atómica. Como se sabe la estructura de la fase austenita es cúbica centrada en el cuerpo por lo que posee 3 constantes elásticas independientes y, según se ha reportado en la literatura, coeficientes anisotrópicos de entre 10 y 15 que induce variaciones del módulo de Young de entre 20 y 230 GPa para orientaciones cristalinicas de entre [001] y $[\bar{1}11]$ respectivamente [8].



- b) La anisotropía relativa al esfuerzo transformacional se asocia al valor del Factor de Schmid y/o del esfuerzo cortante máximo, en el caso de materiales mono-cristalinos [9]. Para elementos sujetos a estados de esfuerzos planos, este tipo de anisotropía se observa claramente en los diagramas de transformación bajo esfuerzos planos [2].
- c) La anisotropía mecánica en la deformación transformacional se debe a que la deformación de corte que se presenta durante la transformación martensítica sobre alguno o algunos de los 24 posibles variantes de transformación, se proyecta en el sistema de observación y/o carga del material [2]. Según se ha reportado en la literatura [6 y 11] la magnitud de la llamada deformación transformacional varía fuertemente, hasta 8 veces, para diferentes orientaciones cristalinas y tipos de transformación martensítica que se presentan en diferentes aleaciones con memoria de forma.

1.1.5 Modelos del comportamiento de MMF.

Existen modelos fenomenológicos e ingenieriles que tratan de predecir el comportamiento termomecánico de los MMF. Es de especial interés para el presente trabajo el modelo propuesto por Cortés [12] que integra dos rasgos importantes de la transformación martensítica: el físico y el cristalográfico. Dicho modelo se utiliza para realizar el estudio de la influencia que tiene la anisotropía en la obtención de la energía útil en los MMF. Ríos [13] utiliza este modelo para encontrar la energía útil por grado centígrado y el gradiente de temperatura necesario para iniciar la transformación de la fase martensita a austenita, según su orientación cristalina, para Cu-Al-Be y Ni-Ti.

A continuación se enumeran los datos de entrada del modelo [13]:

- a) Los sistemas de transformación y la magnitud del cortante del MMF que se pretenda simular, es decir, las familias de planos de hábito y las direcciones de corte.
- b) La orientación de la muestra. La cual está compuesta por la dirección de la aplicación de la carga y el plano de observación, en el caso de pruebas en tensión simple; para el caso de flexión la orientación del eje longitudinal de la muestra y del plano que contiene la carga aplicada. Esta información se puede obtener empleando técnicas de difracción de electrones.
- c) Las temperaturas críticas del material. Las cuales se pueden obtener practicando a una muestra del material un estudio de calorimetría diferencial de barrido o bien de resistividad eléctrica.
- d) La razón de esfuerzo del material.
- e) Las constantes elásticas del material en fase austenita, las cuales.
- f) Las dimensiones de la muestra.



Dicho modelo permite simular los siguientes aspectos del comportamiento del MMF en función de la temperatura de prueba o el esfuerzo aplicado:

- a) La distorsión de la superficie de observación aplicando el campo de desplazamientos a la ecuación del plano de observación en forma paramétrica.
- b) La distorsión que sufre una marca testigo, grabada en la superficie de observación aplicando el campo de desplazamientos a la curva que describe la marca testigo, escrita en forma paramétrica.
- c) El campo de desplazamientos asociado a la transformación simplemente graficando el campo.

Así mismo, el modelo permite calcular lo siguiente:

- a) El desplazamiento y la deformación de cualquier punto en la muestra.
- b) Las curvas esfuerzo-deformación media e ingenieril para cargas de tensión a temperatura y esfuerzo constantes.
- c) Para casos de tensión uniaxial, la variación de la deformación promedio al cambiar la orientación del eje de aplicación de la muestra.
- d) El desplazamiento del punto de aplicación de la carga en función de la temperatura.



1.2 Motores Térmicos con MMF.

Gracias a sus propiedades excepcionales, los MMF están siendo aplicados a áreas industriales como la medicina, la automatización y el control [2]. Otra aplicación muy importante que está cobrando mucha importancia hoy en día es el desarrollo de motores capaces de transformar energía térmica a muy bajas temperaturas, menores a 100°C , en energía mecánica.

Como se sabe, un motor térmico es aquel que transforma energía calorífica en trabajo mecánico útil aprovechando un gradiente de temperatura entre una fuente y sumidero de calor. En los motores térmicos con MMF, se utilizan elementos de accionamiento fabricados con materiales con memoria de forma como alambres y resortes, los cuales tienen ciertas características dependiendo principalmente de la aleación y las temperaturas de transformación, por lo general son temperaturas muy bajas, favoreciendo el uso de estos motores para la recuperación de energía en procesos industriales, energía solar o geotérmica, donde las temperaturas no alcanzan los 200°C .

Uno de los puntos importantes en los motores térmicos con MMF, es el arreglo de la estructura del motor para el aprovechamiento de la fuerza del elemento de MMF.

1.2.1 Principio de funcionamiento de los motores térmicos con MMF.

Los motores térmicos con MMF aparecen como buenos candidatos para convertir energía calorífica en trabajo mecánico útil. Gracias a las propiedades de estos materiales, y las bajas temperaturas de transformación de fase, se puede recuperar energía calorífica a temperaturas bajas a diferencia de las máquinas térmicas convencionales que necesitan vapor de agua sobrecalentado para transformar energía.

En la Figura 1.4 se muestra el principio de funcionamiento de los motores térmicos con MMF donde se puede observar un resorte helicoidal fabricado con MMF y dos pesos w_1 y w_2 . w_1 se utiliza para regresar a la forma original del resorte en fase martensita y w_2 se desplaza y luego es removido por lo que se denomina carga útil.

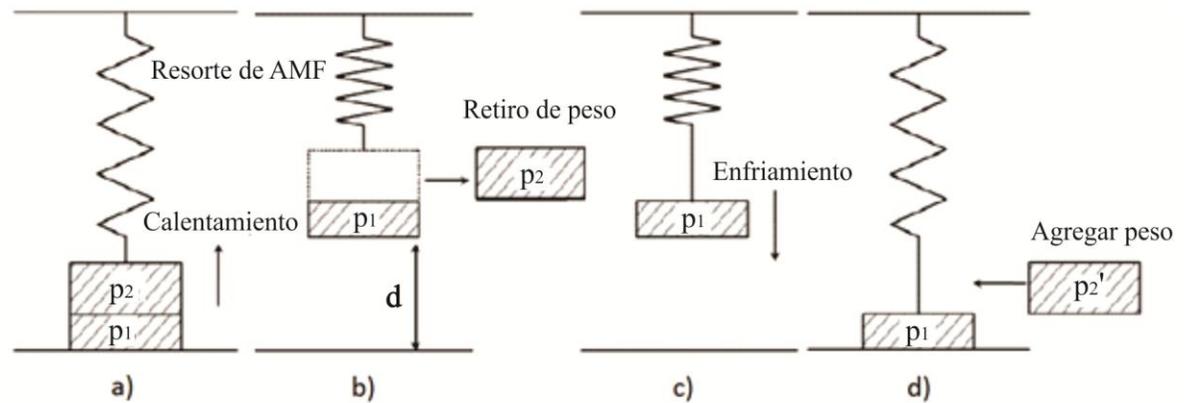


Figura 1.4 Principio de funcionamiento del motor térmico con memoria de forma. [14]

En la Figura 1.4 a) se puede observar que el resorte está sujeto a las cargas: w_1 y w_2 que genera un desplazamiento importante debido a que se encuentra en fase martensítica puesto que la temperatura es inferior a M_f . Al incrementar la temperatura de prueba, el resorte experimenta un cambio de fase martensita- austenita, sufriendo una contracción de magnitud d . En la Fig.1.4 b) se remueve la carga de trabajo p_2 y aunque el resorte sufre una pequeña contracción adicional, es prudente considerar que el sistema realizó un trabajo efectivo igual a $p_2 d$. Si después de remover el peso p_2 se enfría nuevamente el sistema, el resorte se elonga debido a p_1 como se muestra en la Figura 1.4 c). Finalmente si a dicha temperatura se aplica nuevamente la carga p_2 nuevamente el sistema toma la configuración inicial.

Si este proceso de enfriamiento y calentamiento Fig.1.4 a)-d) son repetidos, se puede obtener el trabajo $p_2 d$ en cada ciclo. Con el fin de realizar estos ciclos repetidamente se han propuesto varios tipos de motores térmicos. Para generar trabajo mecánico útil, es necesario desarrollar un mecanismo que pueda llevar a cabo la transformación de fase de los MMF con gran rapidez de manera que se obtenga una gran densidad de potencia.

La fuerza motriz en un motor térmico con MMF se obtiene en la recuperación de la deformación del elemento al incrementar la temperatura. En la Figura 1.5 se muestra un diagrama esfuerzo-deformación y de fase-esfuerzo-temperatura donde se representan la generación del esfuerzo de recuperación y se muestran las temperaturas M_s , M_f , A_s y A_f que denotan el inicio y el final de las temperaturas de transformación martensítica y la transformación inversa respectivamente. Al inicio, la carga es aplicada estando el material en la región TM en el punto A, a una temperatura T_0 por debajo de A_s . Después se puede observar en el punto B la deformación residual que aparece al remover la carga. Si la ϵ_r es constante y es calentado al punto C, el esfuerzo de recuperación incrementa debido a la transformación inversa. El esfuerzo de recuperación depende de la histéresis de la carga termo-mecánica, es decir, el esfuerzo σ_0 , la deformación ϵ_0 , la fracción del volumen de martensita Z_0 y de las condiciones de calentamiento y enfriamiento. Por lo tanto, es importante tomar en cuenta la dependencia del esfuerzo de recuperación a todas estas variables termo-mecánicas, para desarrollar un motor térmico con MMF.



Bajo estos principios, varios tipos de motores térmicos con MMF han sido desarrollados hasta ahora. En la Tabla 1.1 se enumeran algunos tipos de motores térmicos, el elemento MMF que realiza el trabajo en cada ciclo y la potencia generada. Sin embargo, en cada uno de estos motores se han encontrado algunos obstáculos técnicos por lo que sigue la búsqueda de un arreglo eficiente.

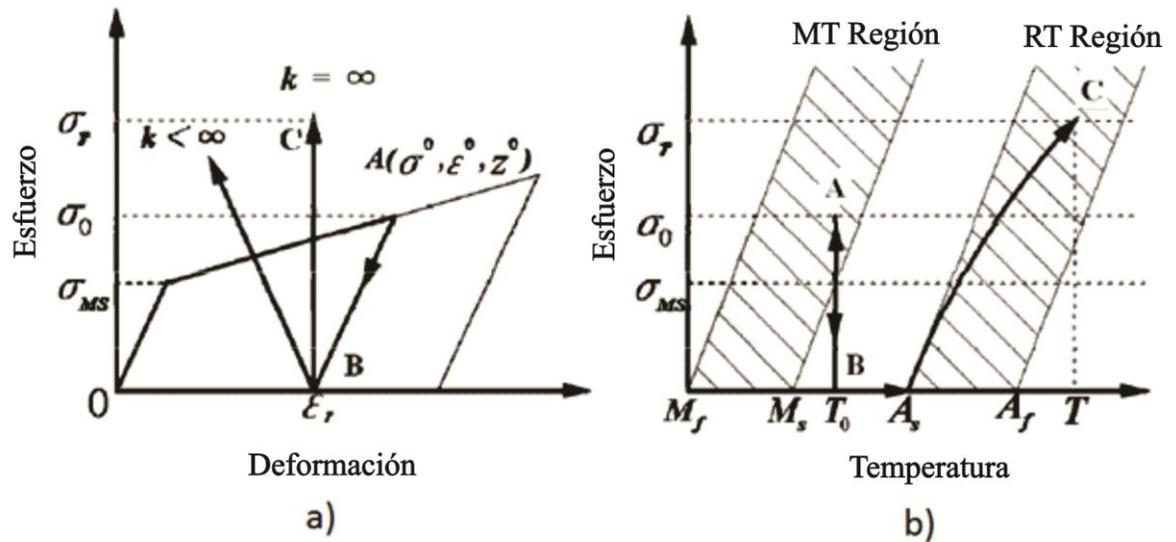


Figura 1.5 Diagramas a) esfuerzo-deformación y b) esfuerzo-temperatura y fase de transformación donde se muestra el esfuerzo de recuperación [15 y 13].



Tabla 1.1. Características de los diferentes tipos de motores térmicos con MMF [15 y 13].

Tipo de Motor	Elemento de AMF			Potencia Máxima de Salida (W)	Referencia
	Forma	Número de Elementos	Tipo de Deformación		
Manivela Desplazada	Alambre	20	Flexión	0.23	Banks
Manivela Desplazada	Resorte Helicoidal	--	Tensión	20	Ginell
Manivela Desplazada	Resorte Helicoidal	6	Tensión	1	Tobushi
Polea Simple	Alambre	5	Flexión	0.28	Tobushi
Polea Simple	Banda	1	Flexión	1.2	Sato
Manivela Doble	Resorte Helicoidal	6	Tensión	1.7	Iwanaga
Disco	Resorte Helicoidal	--	Tensión	6.2	Nishikawa
	Alambre	--	Elongación	305	Nishikawa
Disco y Manivela	Resorte Helicoidal	12	Tensión	0.6	Tobushi
Reciproco	Alambre	2	Elongación	1.8	Sakuma
Reciproco	Alambre	1	Elongación	0.15	Kaneko
Turbina	Banda	1	Flexión	0.6	Tanaka
Turbina	Resorte Helicoidal	252	Tensión	665	Tanaka

1.2.2 Clasificación de los motores térmicos con Memoria de Forma.

Como se puede ver, en el principio de funcionamiento de los motores térmicos de este tipo, se utiliza el cambio de forma macroscópica del elemento MMF que está asociado con una transformación de fase activada térmicamente [18, 19, 17, 13]. Existen varias patentes de motores de este tipo, los cuales pueden ser:

- a) **Motor con poleas:** como se puede ver en la Figura 1.6 estos motores pueden ser arreglos de dos o más poleas por donde pasa una banda, varios alambres o un alambre. Cuando una sección del elemento con memoria de forma pasa por la polea expuesta a una fuente de calor, este intenta recuperar su forma rectilínea, jalando de este modo una nueva sección del material para su transformación.

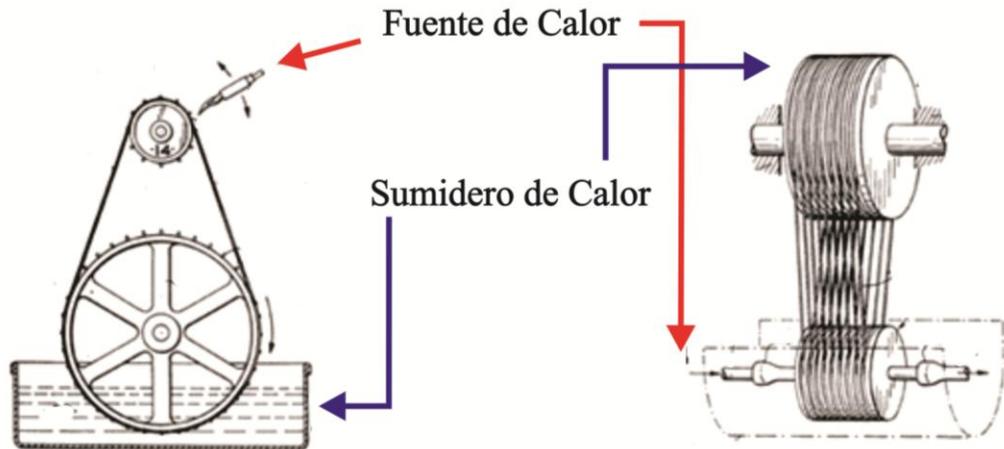
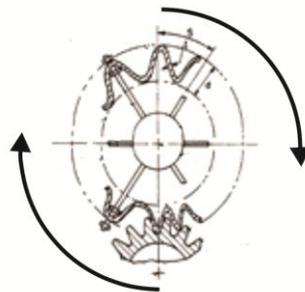


Figura 1.6. Motores con poleas.

- b) **Motor secuencial:** generalmente son motores con un gran número de segmentos móviles los cuales son accionados secuencialmente para generar un movimiento rectilíneo o rotacional como los que se muestran en la Figura 1.7.

Movimiento Rotacional



Movimiento Rectilíneo

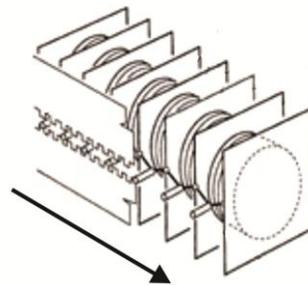


Figura 1.7. Movimiento en motores secuenciales.

- c) **Motores con interacción de campo:** en un motor de este tipo se utiliza la interacción de una fuerza externa, por ejemplo en un motor con interacción gravitacional, se usa una polea por donde pasa una banda, fabricada con un material con memoria de forma, que posee pesos distribuidos uniformemente. Cuando una sección de esta banda se calienta los pesos se aproximan unos a otros aumentando la densidad en una sección y provocando que el motor gire como se muestra en la siguiente Figura 1.8.

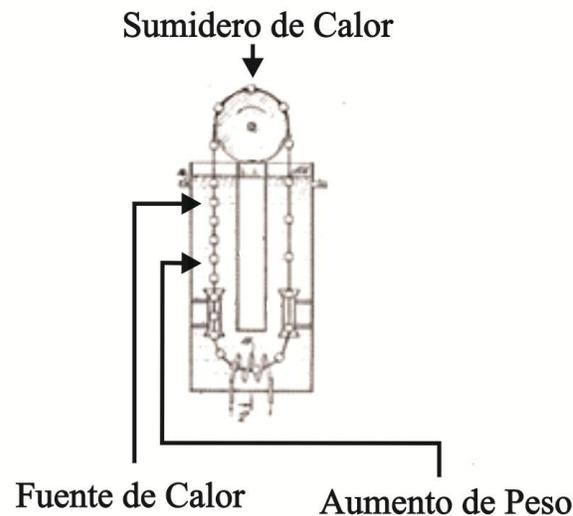


Figura 1.8. Motor con Interacción de Campo Gravitacional.

- d) **Motor recíproco** Los motores recíprocos operan linealmente en dos direcciones, por lo que se utiliza la deformación axial que tiene un alambre con memoria de forma. El reto de este tipo de motores es hacer que los alambres pasen por sí mismos entre las zonas con diferentes temperaturas. Muchas veces se utilizan bombas externas para hacer circular líquidos de refrigeración y de calentamiento sobre los alambres, inevitablemente se pierde la eficiencia global [13].
- e) **Motor de manivelas:** En estos motores generalmente el movimiento de rotación del rotor es generado por el accionamiento de una o varias manivelas acopladas a un elemento con memoria de forma.

En la literatura [13, 16, 17] se describe el funcionamiento de varios motores térmicos diferentes. De dichos trabajos se seleccionó un motor de manivela que podía ser un arreglo eficiente para la recuperación de la energía térmica de bajo grado que actualmente se desperdicia.

La estructura de este motor está compuesta por un eje fijo, en donde está montado concéntricamente un aro en horizontal, del que cuelgan bucles de alambre con MMF soportados por radios (bielas) que irradian desde una manivela desplazada del centro de rotación del aro y que se extiende hacia afuera a través de su periferia como se muestra en la Figura 1.9. Este sistema es similar a la configuración de un motor de avión donde los pistones dispuestos radialmente se comunican con un cigüeñal excéntrico que se hace girar por las fuerzas ejercidas a través de los pistones. En el Motor de manivela, la fuerza de los pistones se reemplaza por la fuerza de los alambres con MF que se esfuerzan para llegar a su forma original (recta) desde una forma en “U”. La fuerza mecánica así generada tenderá a girar el cigüeñal o, por igual, a girar el aro si el cigüeñal se mantiene estacionario, como es el caso de este tipo de motores.



Con la rotación del motor, los alambres pasan por los contenedores semicirculares que contienen agua fría y caliente [20]. Cabe mencionar que este es el motor que se estudia en el presente trabajo.

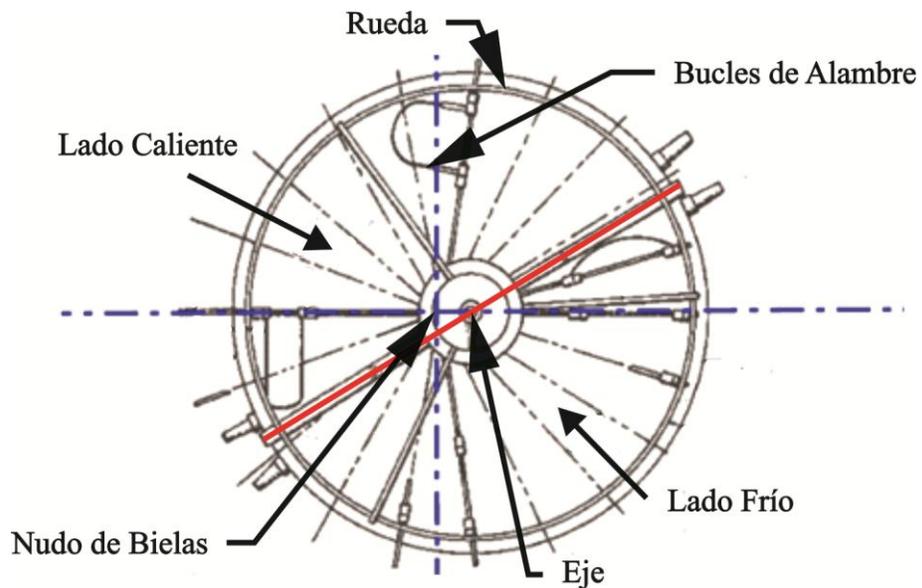


Figura 1.9. Motor térmico con MMF de Ridgway Banks.



1.3 Eficiencia de los motores térmicos con MMF.

1.3.1 Modelo de eficiencia térmica.

El diagrama esfuerzo-deformación de la Figura 1.10, muestra que el lazo de energía útil depende de la deformación transformacional (ϵ_0) y de los esfuerzos críticos tanto a alta (σ_{ca}) como a baja temperatura (σ_{cb}). En general, es deseable que (σ_{cb}) sea lo más bajo posible mientras que (ϵ_0) sea más grande, de esta manera el esfuerzo de restauración (σ_{res}) será pequeño, mientras que el esfuerzo de trabajo (σ_{trab}) será grande. Así mismo, una deformación transformacional (ϵ_0) grande permitirá que la deformación asociada al esfuerzo de trabajo (ϵ_{trab}), la cual es recuperada al incrementar la temperatura del elemento MMF, sea muy alta [12].

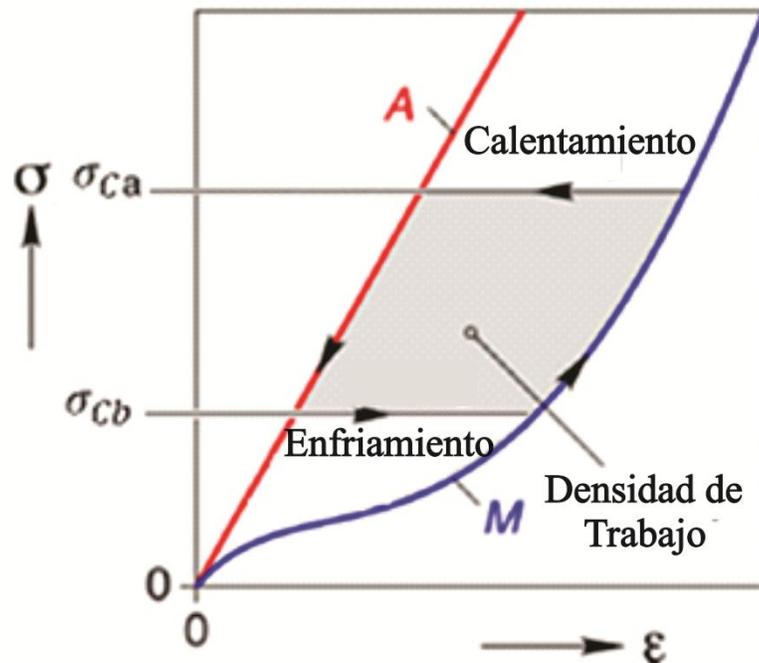


Figura 1.10. Energía útil en un diagrama esfuerzo- deformación para un MMF.

Como se puede observar en la Figura 1.11 (a) y (b) un incremento en el esfuerzo crítico a baja temperatura así como una disminución de la deformación transformacional generan una disminución considerable en la energía útil.

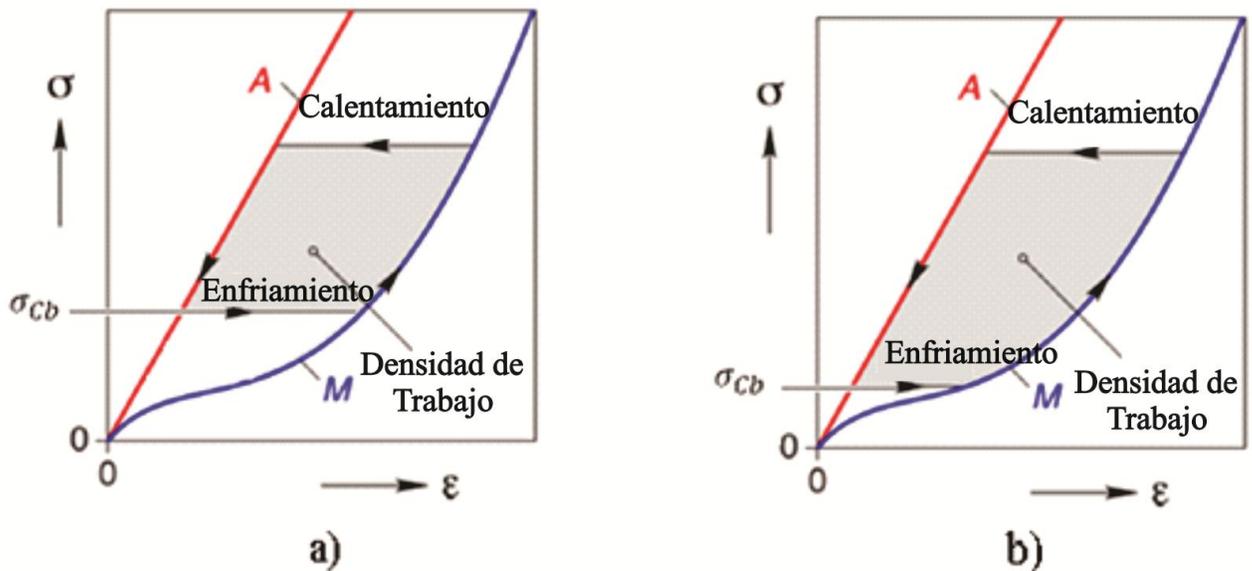


Figura 1.11. a) Ciclo de trabajo con un σ_{cb} grande y en b) con un σ_{cb} reducido.

Ambos parámetros, el esfuerzo crítico a baja temperatura (σ_{cb}) y la magnitud de la deformación transformacional (ϵ_0), dependen fuertemente de la orientación cristalina y de la razón de esfuerzo [4]. Como se sabe, los efectos de la orientación cristalina pueden ser evaluados con buena precisión en materiales monocristalinos mientras que en policristales, la atención debe ponerse en la posible presencia de textura cristalina. Según se ha reportado la textura cristalina puede ser inducida en algunos MMF después de ser sometidos a procesos de deformación plástica severos. Así mismo, es importante mencionar que se han observado diferentes tipos de textura en diferentes MMF las cuales deben ser estudiadas cuidadosamente para evaluar su eficiencia [7,8].

Ya que los efectos de la orientación pueden alterar notablemente la eficiencia energética como se muestra en la Tabla 1.2 y en la Figura 1.12 de los dispositivos recuperadores de energía que emplean MMF. A continuación se presenta el análisis realizado por Ríos [13] para tres aleaciones con memoria de forma (AMF) que más se emplean hoy en día, Ni-Ti, Cu-Al-Be y Cu-Al-Ni. Dicho análisis es teórico, que se basa en el modelo propuesto por Cortés [12] que se describió en la sección: “Modelos del comportamiento de MMF”, indica claramente que para el caso de aleaciones de NiTi la eficiencia es mayor que para los casos de aleaciones de Cu-Al-Be y Cu-Al-Ni para cualquier dirección cristalina. No obstante, en el mismo estudio se encontró que el gradiente térmico necesario para completar un ciclo de conversión de energía depende fuertemente de la orientación cristalina para el caso del Cu-Al-Be y Cu-Al-Ni mientras que es prácticamente independiente para el NiTi. Así mismo, el estudio revela que excepto para una dirección cercana a la [111], en la cual el gradiente es de alrededor de 20°C, el Cu-Al-Be y Cu-Al-Ni requieren de gradientes térmicos del orden de 60°C para completar un ciclo de conversión de energía mientras que el Ni-Ti requiere menos de 20°C para cualquier orientación cristalina. Aunque no existen aún evidencias experimentales suficientes, es claro que dicho resultado hace evidente una de las principales ventajas del NiTi respecto a las AMF base cobre.



Tabla 1.2. Comportamiento mecánico de tres diferentes aleaciones con memoria de forma en función de la orientación cristalina [13].

Orientación Cristalina	[111]	[0.30 0.67 0.67]	[011]	[0 0.38 0.92]	[001]	[111]	[0.32 0.32 0.88]	[001]
Ni-Ti								
Variantes de Martensita	22	6	8	8	15	22	13	11
Factor de Schmid	0.42	0.49	0.39	0.34	0.20	0.42	0.43	0.20
Deformación Transformacional (%)	5.9	6.8	5.4	4.8	2.9	5.9	6.0	3.0
Energía Especifica (°C)	632414	632413	632411	632411	632414	632414	632413	632411
Cu-Al-Be								
Variantes de Martensita	20	17	22	14	16	20	9	16
Factor de Schmid	0.12	0.31	0.36	0.48	0.46	0.12	0.42	0.47
Deformación Transformacional (%)	2.4	5.7	6.5	6.9	8.4	2.4	7.15	8.4
Energía Especifica (°C)	273988	273456	270606	268908	269071	273988	273443	269071
Cu-Al-Ni								
Variantes de Martensita	20	5	22	22	24	20	20	20
Factor de Schmid	0.18	0.36	0.40	0.5	0.49	0.18	0.46	0.49
Deformación Transformacional (%)	1.5	3.36	3.9	4.9	4.66	1.51	4.15	4.6
Energía Especifica (°C)	186659	22413	249660	246872	241647	186659	239039	234538

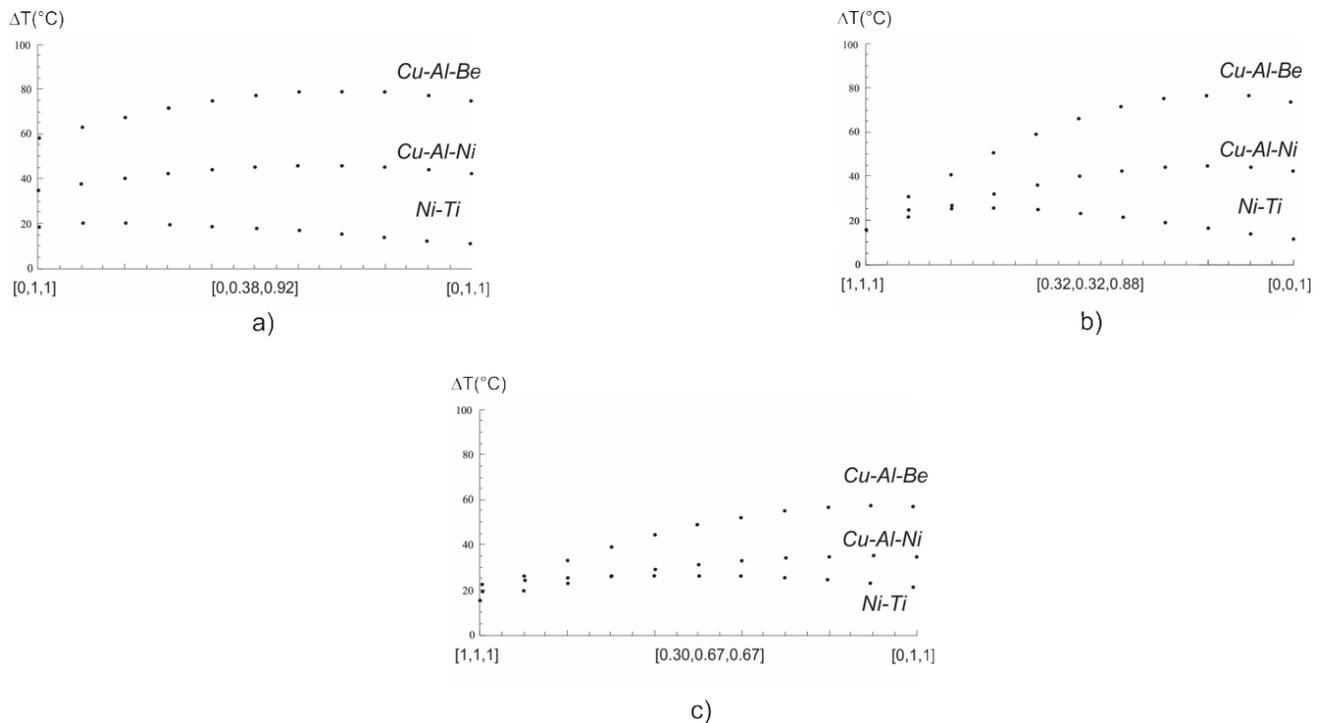


Figura 1.12. Variaciones del gradiente térmico necesario para completar un ciclo de transformación de energía en función de la orientación cristalina [13].



Capítulo 2

2 Diseño y construcción del motor de inmersión accionado con alambres de NiTi.

Construcción del prototipo denominado “motor accionado con alambres de NiTi”.

Para poder analizar el trabajo mecánico útil que se obtiene de un motor accionado con elementos con memoria de forma, se fabricó un arreglo similar al propuesto por Ridwey Banks que se menciona en el capítulo anterior. Dicho arreglo es un motor con manivela simple que es accionado con alambres de NiTi.

2.1 Diseño conceptual.

En la Figura 2.1 se muestra un explosivo del motor térmico donde se puede observar las piezas que lo conforman. En la Tabla 2.1 se nombran dichas piezas y la imagen particular de cada una. Es importante conocer las piezas elementales del motor ya que en la siguiente sección se presenta una descripción detallada del funcionamiento para así obtener los requerimientos del diseño.

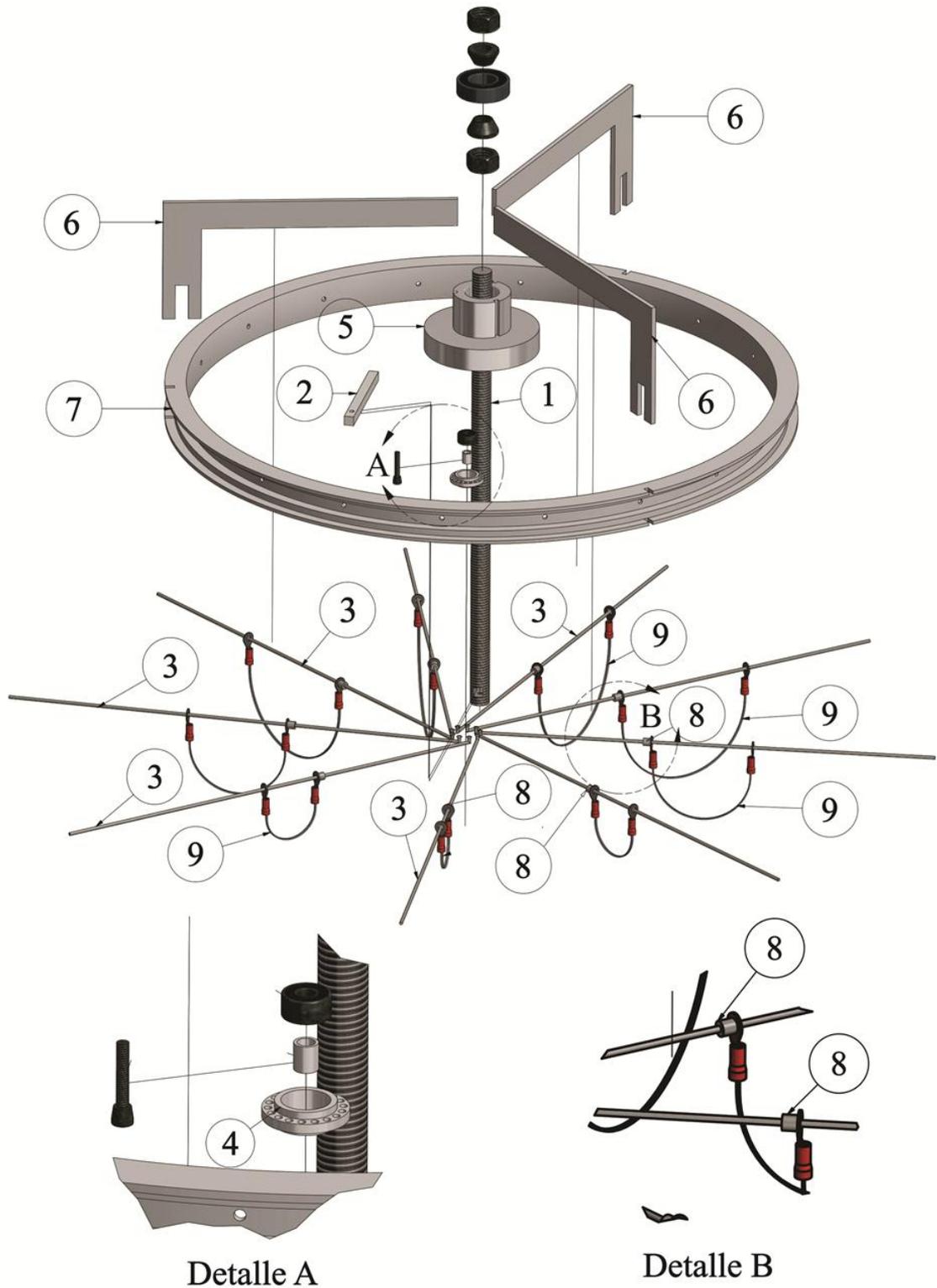


Figura 2.1 Explosivo Motor Térmico.



Tabla 2.1. Piezas Elementales del Motor Térmico.

Elemento	Imagen de la Pieza	Nombre de la Pieza	
1		Eje	
2		Manivela	
3		Biela	
4		Anillo Sujetador de Bielas	
5		Base Rotor	Rotor



Elemento	Imagen de la Pieza	Nombre de la Pieza	
6		Brazo	Rotor
7		Aro	
8		Tope	
9		Bucle de Alambres de NiTi	

2.1.1 Funcionamiento del motor de inmersión accionado con alambres de NiTi.

En la Figura 2.2 se puede observar un motor térmico de este tipo que posee una manivela fija (a) en el eje (b) el cual también es fijo. En este arreglo, las bielas (c) pueden girar alrededor de la manivela ya que están unidas mediante un anillo el cual posee un rodamiento (d).

El sentido de giro de las bielas y el rotor depende de donde se encuentre el lado caliente, cabe mencionar que la manivela debe estar direccionada a dicho lado. Estas bielas se pueden deslizar a través de los barrenos del aro o corredera (e) y transportan los alambres del contenedor de agua fría al de caliente y viceversa, de esta manera se obtiene el gradiente térmico necesario para que el motor se mueva. Cada biela posee un bucle formado por dos alambres de NiTi.

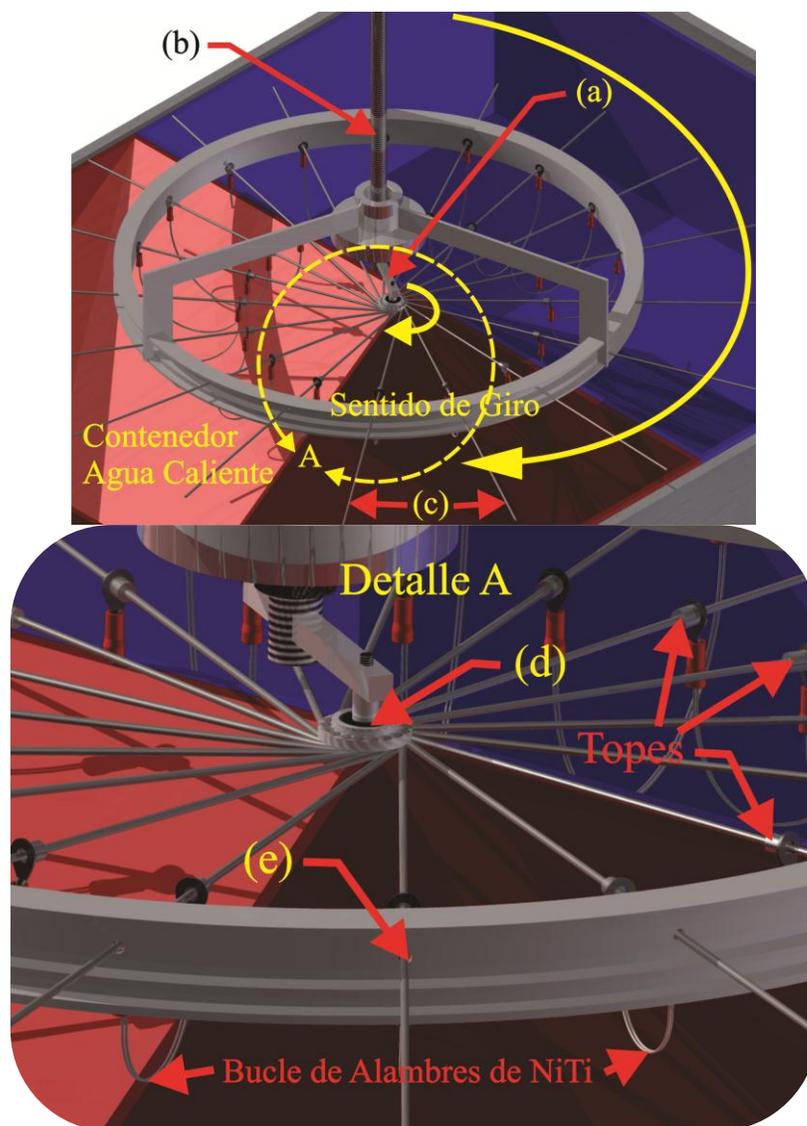


Figura 2.2. a). Manivela b). Eje c). Bielas d). Rodamiento Sujetador de Bielas e). Corredera



Cada una de estas bielas tiene una restricción (Tope) para que se apoye un extremo del alambre. Durante la operación del motor, los alambres tratan de enderezarse por lo que aplica una fuerza como se muestra en la Figura 2.3, de modo que el extremo contrario empuja al aro.

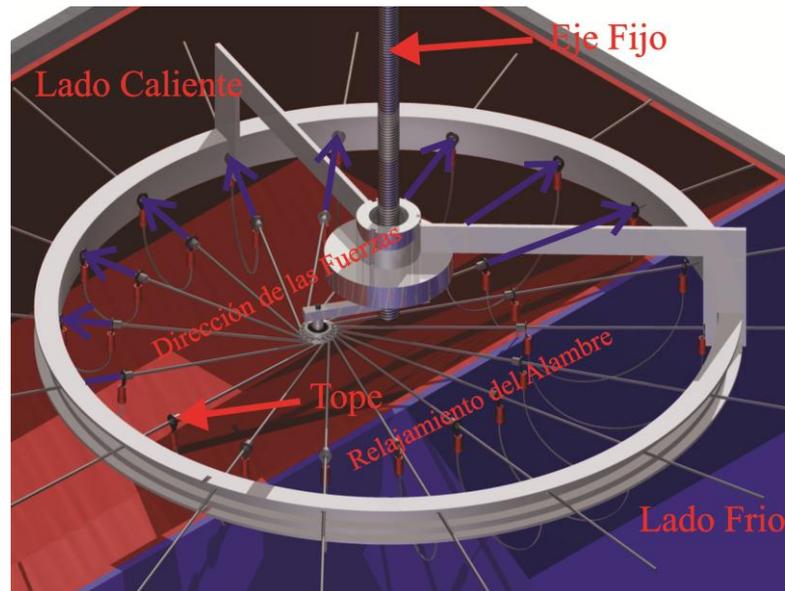


Figura 2.3. Dirección de las Fuerzas en Lado Caliente (Flechas Azules) y Relajamiento del Alambre de Ni-Ti en el Lado Frio.

La fuerza que ejerce el alambre tiene una componente tangencial al aro como se puede ver en la Figura 2.4.

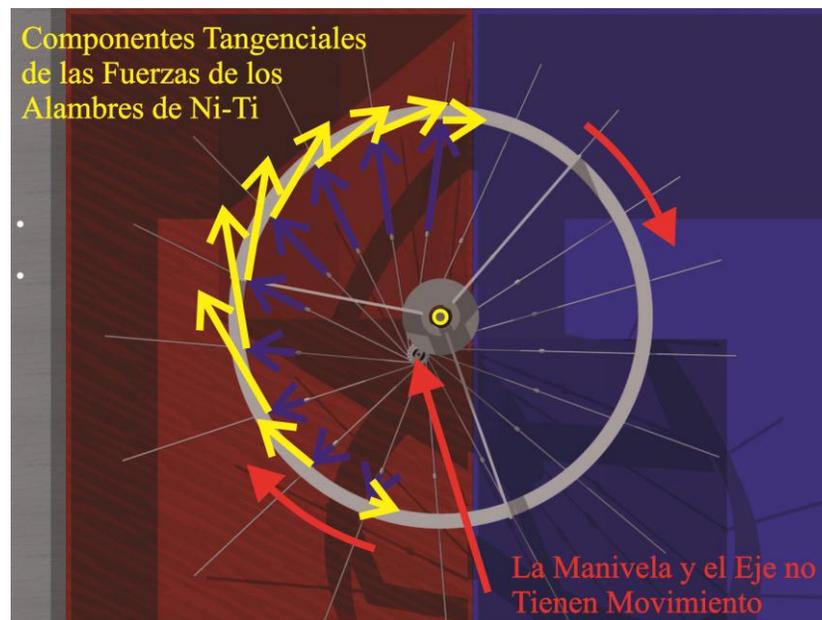


Figura 2.4. Componentes Tangenciales de la fuerza ejercida sobre el aro (Vista Superior).

Esta fuerza tangencial hace girar al rotor, ya que la manivela es fija. Cabe mencionar, que el ángulo que hay entre las correderas del aro y las bielas debe cambiar constantemente. Para lograr que las bielas se acomoden automáticamente de acuerdo al giro del aro, se debe contar con un accesorio que permita variar su ángulo como la que se muestra en la Figura 2.5.

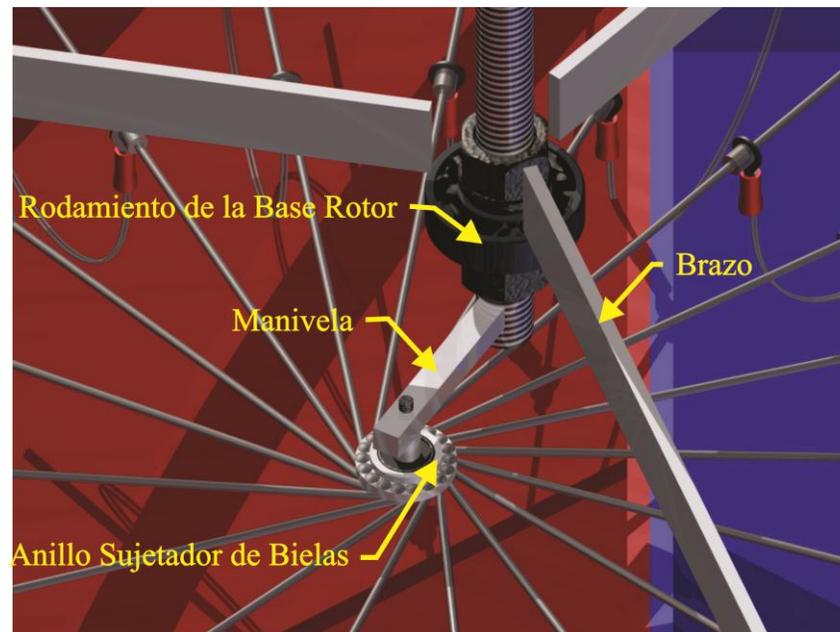


Figura 2.5. Anillo Sujetador de Bielas.

2.1.2 Requerimientos del diseño.

En este arreglo se genera trabajo mecánico mediante el enderezamiento de los alambres de NiTi. Para el accionamiento de estos elementos con MF se utiliza el gradiente térmico que es el resultado de la diferencia de temperaturas en el agua contenida en dos depósitos. Por lo tanto se debe transformar el movimiento rectilíneo, en dirección más o menos radial, en un extremo de los alambres al enderezarse en un giro continuo en el rotor.

Por lo tanto se tienen los siguientes requerimientos:

1. Para completar el ciclo de trabajo, se requiere de un gradiente térmico que se obtiene con dos depósitos con agua. Uno con agua fría y el otro con agua caliente.
2. El arreglo debe ser capaz de girar continuamente, haciendo un ciclo de calentamiento y enfriamiento a los elementos con MF. Dicho ciclo debe realizarse de forma autónoma.
3. El objetivo de este arreglo es convertir energía térmica de bajo grado en trabajo mecánico.
4. El motor debe ser capaz de extraer la energía calorífica del depósito de agua caliente, por lo que la temperatura máxima de operación es de 90°C.



5. El motor debe convertir el movimiento rectilíneo de un extremo del alambre en un giro continuo.
6. El rotor deberá estar fabricado en un material resistente a la corrosión, ya que estará en contacto continuamente con agua.
7. El motor sumergible debe poseer un vástago que permita calibrar la profundidad de inmersión en el agua.
8. Como ya se mencionó en el segundo punto, el ciclo debe realizarse de forma autónoma, por lo que el giro del rotor debe ser capaz de pasar los alambres con memoria de forma de un depósito de agua fría al de agua caliente.
9. Los alambres deberán estar totalmente sumergidos en los depósitos de agua.
10. El arreglo deberá contar con un elemento que facilite el paso de los alambres entre los depósitos, evitando así atascamientos o pérdidas por fricción.
11. Al ser un motor de manivela simple y fija al eje, éste deberá contar con bielas que puedan transportar los alambres de Ni-Ti.
12. En este arreglo las bielas deben girar con ejes en el anillo sujetador de bielas y éste gira con eje en la manivela fija, para evitar atascamientos debidos a un ángulo incorrecto en la biela durante la operación.

2.1.3 Soluciones conceptuales para cada elemento que integra el motor.

Según los requerimientos dados a continuación se elaborará la solución conceptual. Por lo que la numeración de la soluciones corresponde con cada uno de los requerimientos enumerados en la sección anterior.

1. Para el primer requerimiento se deberán usar dos depósitos, para contener el agua a diferente temperatura, dichos depósitos deberán estar muy cerca entre sí, por lo que se usa un aislante térmico. En la Figura 2.6 se muestran los depósitos de agua.

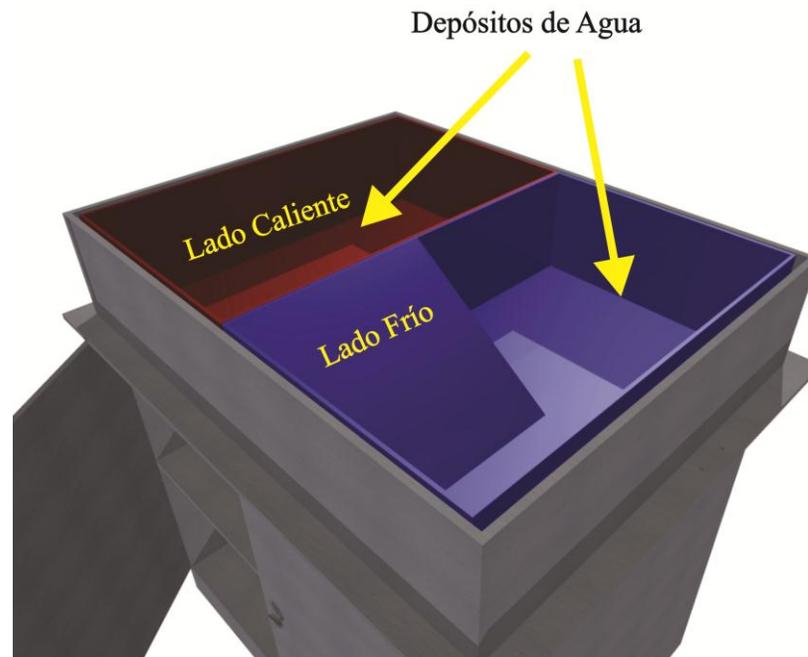


Figura 2.6. Depósitos de agua.

2. Según el segundo requerimiento, el motor debe ser capaz de realizar el calentamiento y enfriamiento de forma autónoma. Por lo que es conveniente utilizar las bielas del mecanismo para llevar los alambres de un depósito a otro como se muestra en la Figura 2.7.

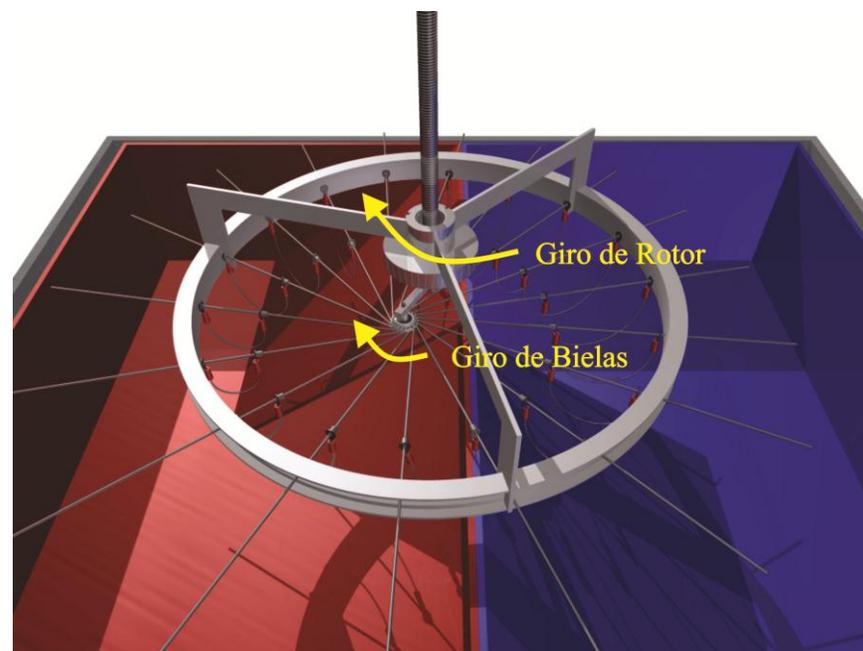


Figura 2.7. Movimiento de Rotación en Bielas y Rotor.



3. Como se sabe, los materiales con memoria de forma son capaces de cambiar de forma según la temperatura a las que esta expuestos. De esta manera se puede obtener trabajo mecánico, ya que el cambio de forma se puede aprovechar para desplazar una masa que está sometida a la gravedad. Por lo tanto, se utilizarán alambres de NiTi que se encargaran de generar el trabajo mecánico a partir de la energía calorífica de bajo grado, ya que sólo necesitan un gradiente térmico entre los depósitos de 12.6 °C.

Cabe mencionar que este elemento estará sometido a ciclos de carga y descarga donde además intervienen dos temperaturas distintas, por lo que se lleva a cabo un proceso de educación en el que el material con memoria de forma “aprende” dos formas determinadas según la temperatura en la que está sometido. Dicho efecto se conoce como doble efecto con memoria de forma. De esta manera el motor tendrá una mejora en la eficiencia, ya que para realizar el ciclo, no se necesitara la fuerza de un alambre para cambiar la forma del otro que se encuentra en el agua fría.

4. En este prototipo de motor se utilizarán resistencias eléctricas para calentar el agua máximo 90°C, dichas resistencias estarán sumergidas en el fondo del depósito y no tendrán contacto con los elementos con memoria de forma. Cabe mencionar que las resistencias deberán estar aterrizadas con el fin de evitar descargas eléctricas.
5. En la siguiente Figura 2.8 se muestra el arreglo que debe tener la biela ya que este elemento se encargará no sólo de transportar entre los diferentes contenedores el elemento con memoria de forma, sino que también sirve como guía del movimiento de los alambres que empujaran al rotor. Como ya se mencionó anteriormente, se necesita de un gradiente térmico, ya que los elementos podrán empujar cuando estén en el agua caliente y se relajaran en el agua fría.

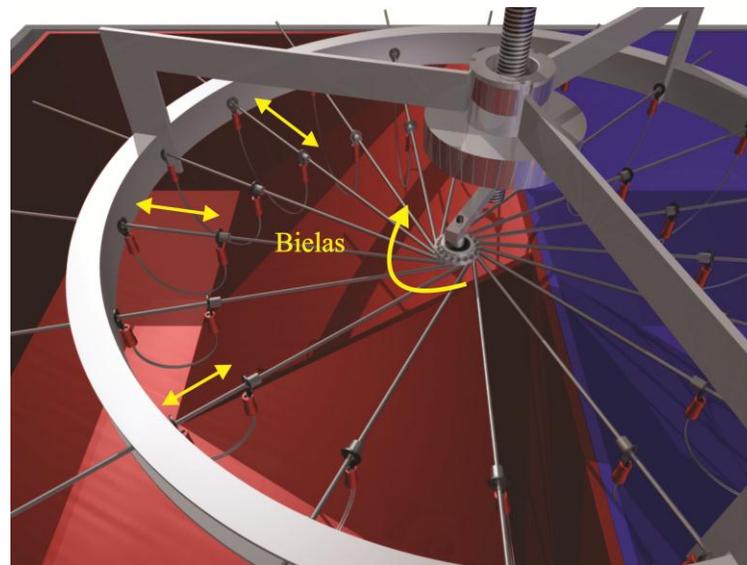


Figura 2.8. Las Bielas Trasladan y Guían a los Alambres de Ni-Ti Además de Servir como Corredera.

6. Para resolver el problema de la corrosión causada por la acción del vapor, se utiliza aluminio para la construcción del motor, cabe mencionar que las bielas del mecanismo tienen un recubrimiento de cromo. Por lo tanto se obtiene un mecanismo ligero.
7. Con la finalidad de poder calibrar la profundidad de los alambres en los depósitos con agua, en el arreglo se utilizará una corredera para el vástago que además permita fijar una altura determinada, en la Figura 2.9 se puede ver un esquema de la corredera y el vástago. Esta corredera se podrá deslizar sobre un perfil tubular cuadrado para la ubicación del motor entre los contenedores de agua.

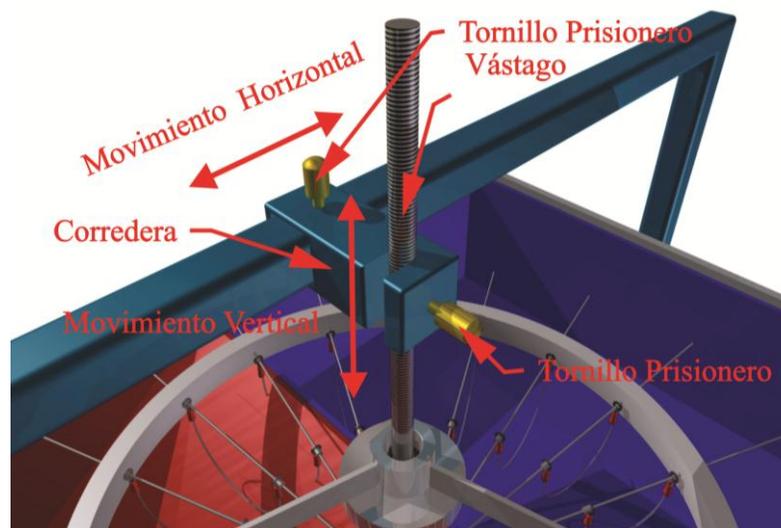


Figura 2.9. Vástago y Corredera Para la Ubicación Horizontal y Vertical del Motor.



8. Para que el ciclo pueda realizarse de forma continua el movimiento generado por los alambres en el rotor, debe a su vez aprovecharse para transportarlos a los diferentes depósitos.
9. Para evitar atascamientos del motor debidos a que el alambre no tenga una temperatura uniforme, el alambre a utilizar estará siempre en forma de “U” con el objetivo de que permanezca totalmente sumergido en cada uno de los contenedores.
10. Como ya se ha mencionado antes, los alambres deben estar continuamente cambiando su temperatura y por lo tanto pasando de un depósito al otro. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que pueden existir pérdidas por fricción o inclusive atascamiento por el choque de los alambres con las paredes del depósito. Para evitar este tipo de problemas se usarán rampas para facilitar el traslado de los alambres de un depósito al otro. En la Figura 2.10 se muestra la ubicación de dichas rampas según el sentido de giro del motor.

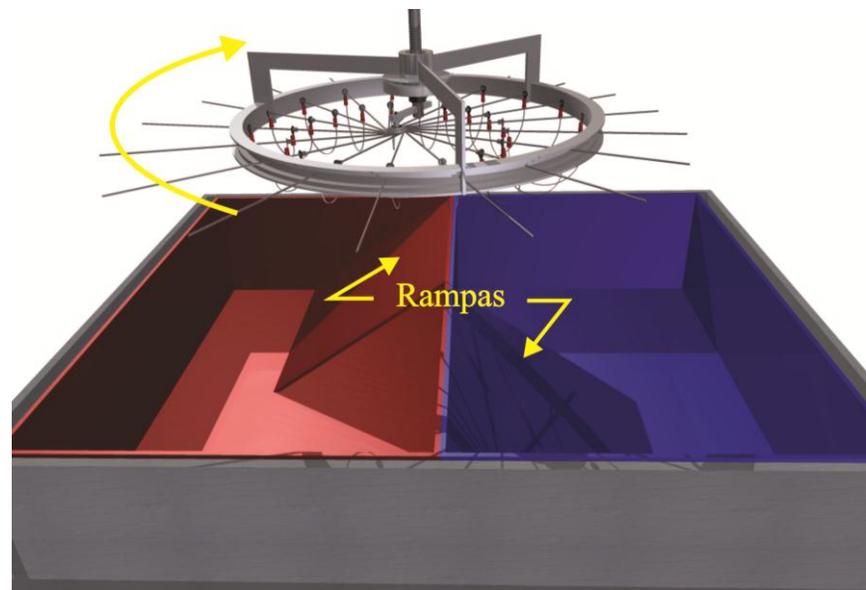


Figura 2.10. Rampas para el transporte de los alambres de Ni-Ti.

11. Las varillas que transportaran a los alambres tienen que poseer “topes” para el alojamiento de los alambres, ya que como se sabe, estos serán los encargados de generar el movimiento en el rotor. Por lo tanto en un extremo del alambre con memoria de forma se utilizará un “tope” que restringe el movimiento libre del alambre, en el otro extremo la función de tope la realiza el rotor. Ya que el rotor es un elemento móvil es en éste donde el alambre puede empujar y generar el trabajo mecánico, como se mostró en la Figura 2.11.

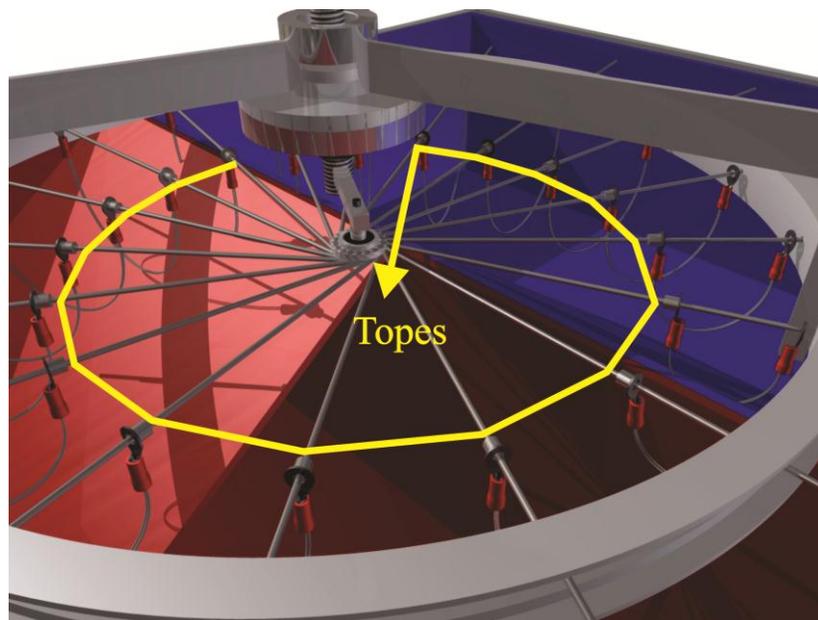


Figura 2.11. Elementos Topes Para la Aplicación de la Fuerza del Alambre Ni-Ti.

12. El último elemento a considerar es un anillo que unirá al conjunto de bielas con la única manivela fija. Como ya se mencionó, las manivelas estarán girando alrededor de la manivela, por lo que el anillo estará dotado de barrenos para el ensamble con las bielas. La naturaleza de este ensamble dotará de un grado de libertad a la biela, por lo que se evitaran atascamientos. En la Figura 2.12 se muestra este elemento y el movimiento que permite a la biela.



Figura 2.12. Movimiento de las Bielas con Respecto al Anillo Sujetador de Bielas.

2.2 Diseño detallado.

2.2.1 Fuerzas de empuje de los alambres de NiTi.

Para realizar un análisis estructural de los elementos críticos del motor, es necesario conocer las fuerzas de empuje que ejercen los alambres. Además, si se considera que el motor se detiene aplicando una fuerza externa, se pueden calcular las sollicitaciones de cada uno de los elementos críticos. Para poder calcular las componentes de las fuerzas que actúan en el motor, se parte de su posición de trabajo. En la Figura 2.13 se puede ver que el eje del motor se encuentra a 3 centímetros de la división de los contenedores y la manivela de 5 centímetros forma un ángulo de 30° con respecto a dicha división.

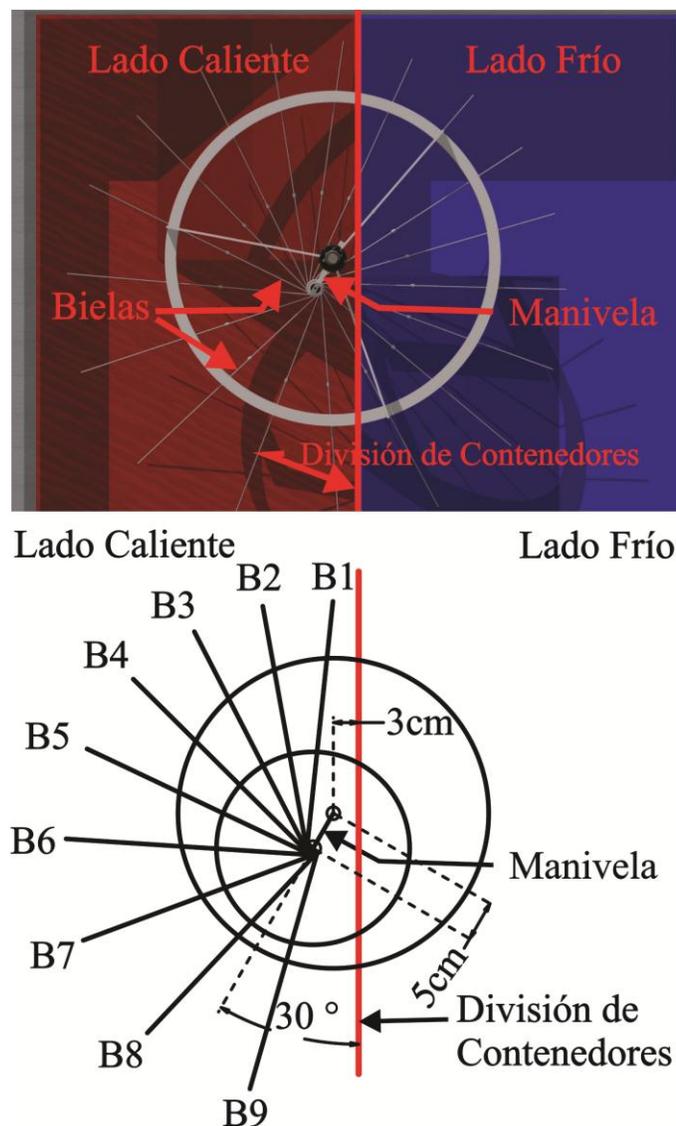


Figura 2.13. Posición del motor entre los contenedores y de la manivela.



La prueba se realizó aplicando condiciones idénticas a las del motor con una temperatura de 82 °C ya que la fuerza depende también de la temperatura. En la Figura 2.15 se muestra el arreglo que se utilizó para la caracterización de los alambres.

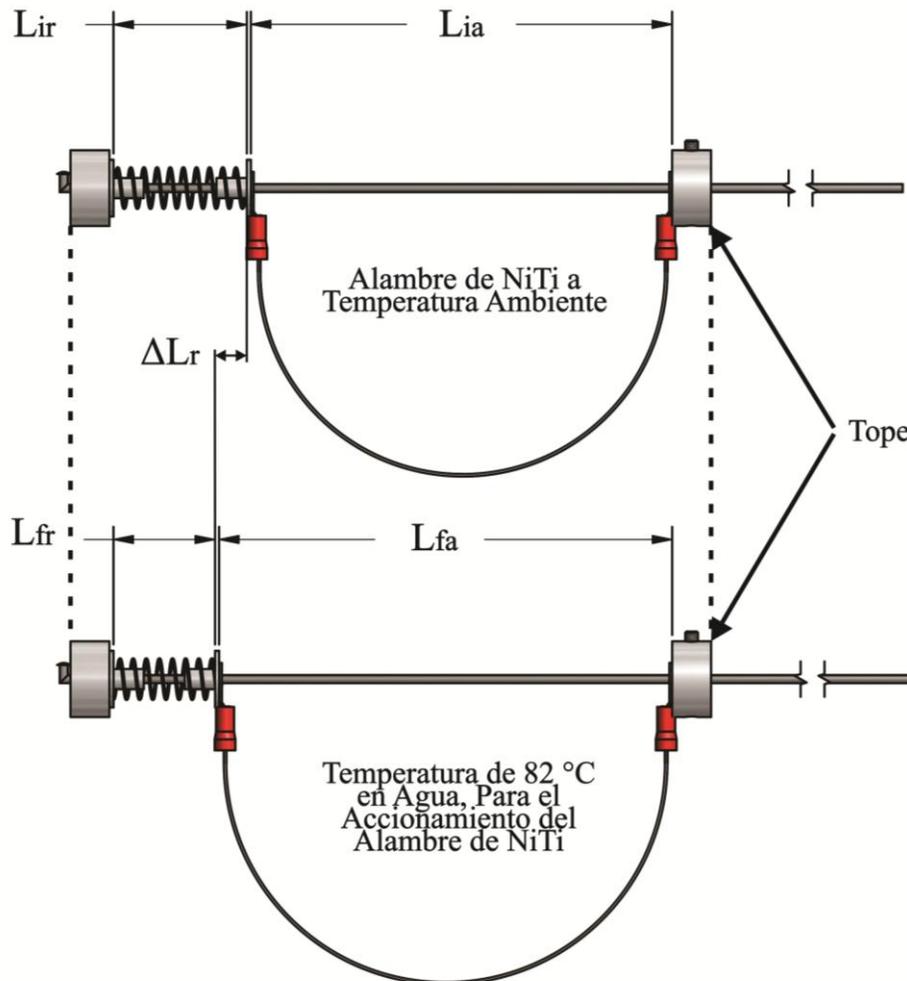


Figura 2.15. Arreglo para la caracterización de los alambres.

Al iniciar la prueba se tiene una longitud inicial del alambre deflectado (L_{ia}), la cual aumenta hasta (L_{fa}) cuando se incrementa la temperatura del alambre. De esta manera se comprime el resorte, cuya constante es conocida. Por lo tanto midiendo la cantidad (ΔL_r) es posible determinar la fuerza que será capaz de ejercer el alambre con memoria de forma al incrementar su temperatura.

El resorte caracterizado, cuya constante resulto ser de 159.14 (Ver en Anexo 1), nos permite cuantificar las fuerzas que aplican cada uno de los alambres para cada biela. En la Tabla 2.2 se pueden ver las fuerzas que ejerce el alambre según L_{ia} .



Tabla 2.2. Fuerzas generadas por cada biela del motor térmico inducida por el alambre con memoria que lleva montado.

Bielas	$L_{ia}(m)$	$\Delta L_r (m)$	Fuerza (N)	Constante (k)
1	0.118	0.0021644	0.344433298	159.1356949
2	0.108	0.002393	0.380811718	
3	0.094	0.0027994	0.445484464	
4	0.078	0.0034852	0.554619724	
5	0.060	0.0038154	0.60716633	
6	0.043	0.004933	0.785016383	
7	0.030	0.006584	1.047749415	
8	0.023	0.0068634	1.092211928	
9	0.024	0.0068634	1.092211928	

Una vez obtenidas las fuerzas de los alambres accionados en el lado caliente se realiza el análisis estructural en la siguiente sección.

2.2.2 Análisis estructural de los elementos críticos.

A continuación, se hace un análisis estructural para conocer las cargas permisibles que pueden soportar los elementos considerados como críticos del motor. Dichos elementos se muestran en la Figura 2.16.

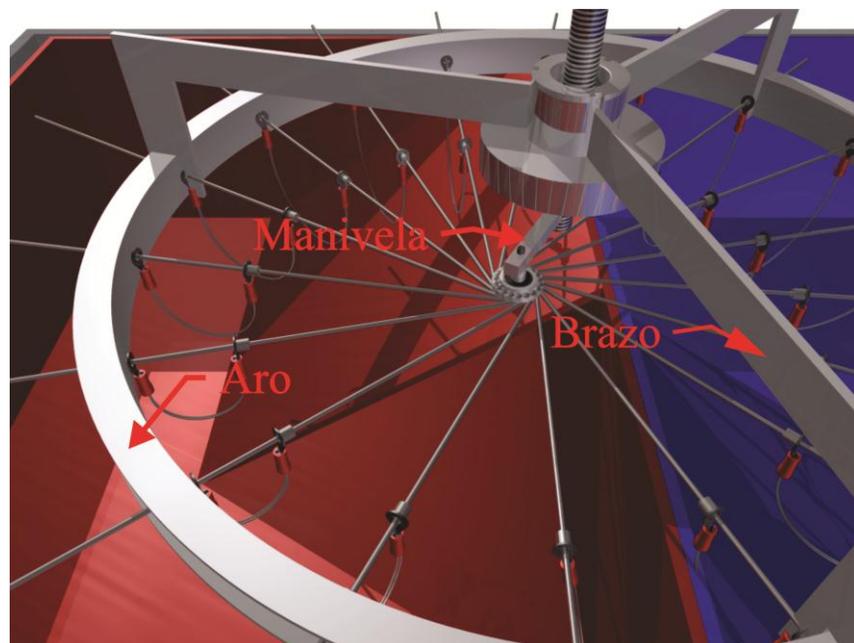


Figura 2.16. Elementos considerados como críticos.

A continuación se analizan dichos elementos.



2.2.2.1 Brazos.

El material empleado para la fabricación de los brazos es una solera de aluminio 6061 de $19.05\text{ mm} \times 3.18\text{ mm}$ ya que se acopla al perfil del aro, permitiendo realizar una soldadura eficiente.

Como se muestra en la Figura 2.17 los brazos deben soportar las siguientes cargas:

- El peso generado por el aro, los alambres y las bielas. Los pesos correspondientes a cada elemento se muestran en la Tabla 2.3, cabe mencionar que el peso total se distribuye entre los tres brazos, dando como resultado la carga (P) en cada brazo.
- El momento flector (M_f) que se presenta cuando se acopla al generador eléctrico o en el arranque del motor.
- La carga (F_{rn}) provocada por la fuerza resultante de las componentes normales de las fuerzas de los alambres con MF. Como se puede observar en la Figura por un instante dicha carga es soportada por un solo brazo, por lo que se supuso como una carga axial.

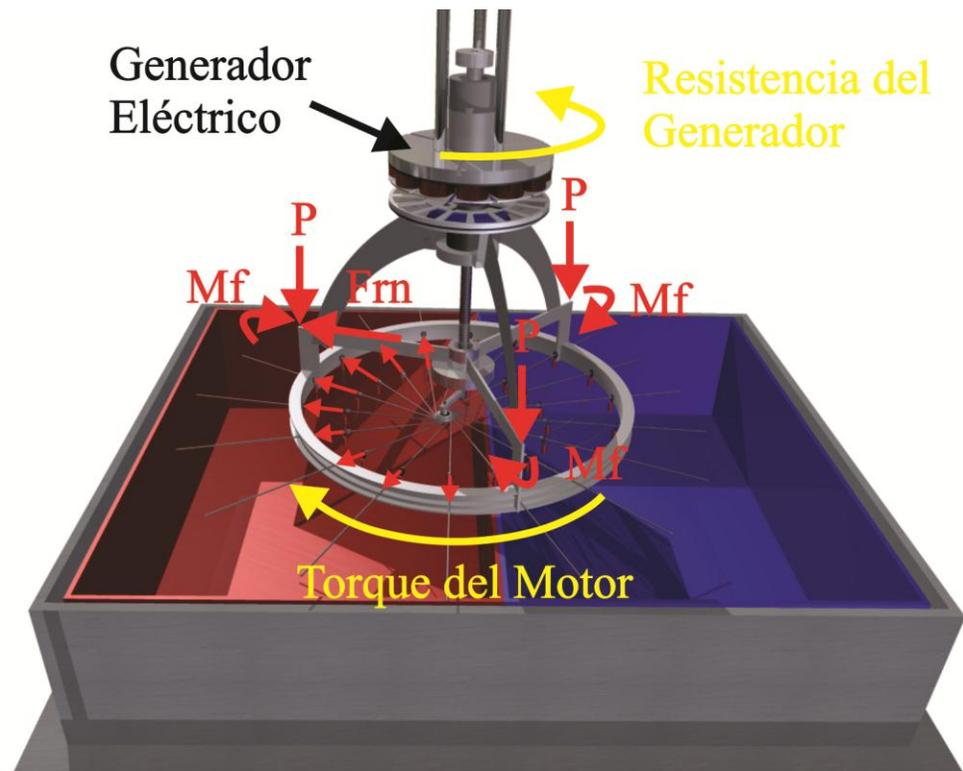


Figura 2.17. Cargas (F_{rn}), (P) y Momento Flector (M_f) en el Brazo.



En la Tabla 2.3 se muestra el peso total actual (6.84N) que soportan los brazos con la cantidad de elementos indicados.

Tabla 2.3. Peso de los elementos que soportan los brazos del rotor.

Elementos	Cantidad (Pzas)	Peso(N)
Aro	1	5.29
Bielas	18	1.36
Alambres de MMF	36	0.192
Peso Total		6.84

Ya que el motor consta de tres brazos en los que se distribuye el peso total se tiene que:

$$P = \frac{6.84 \text{ N}}{3} = 2.28 \text{ N}$$

Como se mencionó anteriormente en caso de que se acople un generador (Figura 2.17), éste producirá resistencia que se considera como el momento flector (Mf) en los brazos. Para conocer el valor de dicho momento, se calculan las componentes tangenciales al aro de las fuerzas provocadas por los alambres en las bielas, y la componente del brazo de palanca perpendicular a dicha fuerza tangencial, cabe mencionar, que este brazo de palanca es la componente de la manivela y no el radio del aro como se podría pensar. Para conocer la carga (Frn) se calculan las componentes normales al aro y se suman obteniendo una fuerza normal resultante. Ya que durante el funcionamiento del motor los brazos giran, se consideró una posición crítica cuando la carga (Frn) es axial al brazo, ya que sólo ese brazo soportaría la carga.

El cálculo de las componentes tangencial y normal de la fuerza del alambre (F_b), se hace para las nueve bielas involucradas como se muestra en la Figura 2.18.

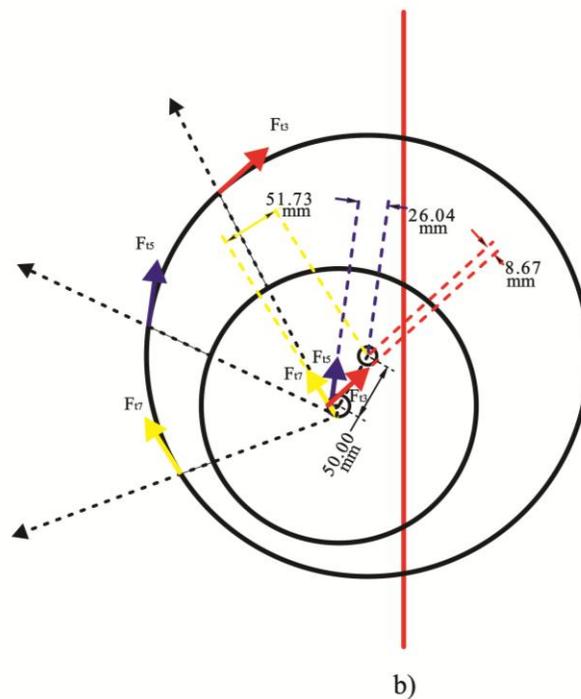
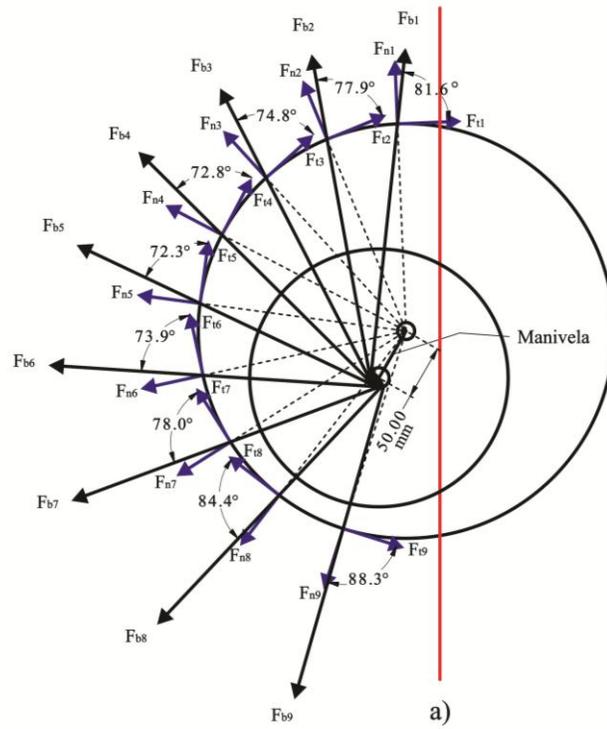


Figura 2.18. a) Componentes (F_n) y (F_t) de las fuerzas en las bielas y b) brazo de palanca para las fuerzas tangenciales (F_t).



En la Figura anterior se muestra:

- Un diagrama de cuerpo libre de las componentes de fuerzas tangenciales y normales al aro.
- Los brazos de palanca para las fuerzas tangenciales al aro. Con el objetivo de que se aprecie claramente esta magnitud, sólo se presentan tres bielas, pero hay que recordar que es el caso de las nueve bielas involucradas.

A continuación se muestra en la Tabla 2.4 los resultados de los cálculos de las componentes antes mencionadas y el torque que generan.

Tabla 2.4. Torque generado en cada biela y componentes de fuerza y brazo de palanca.

Biela.	Componente Tangencial de la Fuerza en la Biela. (N)	Componente Normal de la Fuerza en la Biela. (N)	Distancia Perpendicular a la Fuerza Tangente. (m)	Torque en biela. (Nm)
1	0.050121295	0.340767006	0.036171848	0.00181298
2	0.079890191	0.372337376	0.024290935	0.00194061
3	0.116726172	0.429920235	0.008670125	0.00101203
4	0.164040595	0.529805361	0.008809437	0.00144511
5	0.184497681	0.578456185	0.026042211	0.00480473



6	0.217564905	0.75426536	0.040950625	0.00890942
7	0.217660478	1.024891581	0.051734062	0.01126046
8	0.106581207	1.086999237	0.057086301	0.00608433
9	-0.03297345	1.091714087	0.05635665	-0.00185827
(Frn) = 6.20915643 N			Torque total	(Mf) = 0.035 Nm

La Tabla anterior hace notar que el torque varía según la posición de las bielas, incluso llegar a ser negativo en un punto.

A continuación, éste elemento se analiza como una viga en voladizo, donde las cargas y el momento aplicado en el extremo libre comprimen la zona marcada con el punto A que está en la sección B. Con los valores obtenidos de las cargas (P), (Frn) y el torque total (Mf), se calcula el esfuerzo normal y de corte al que está sometido dicho Punto A mostrado en la Figura 2.19.

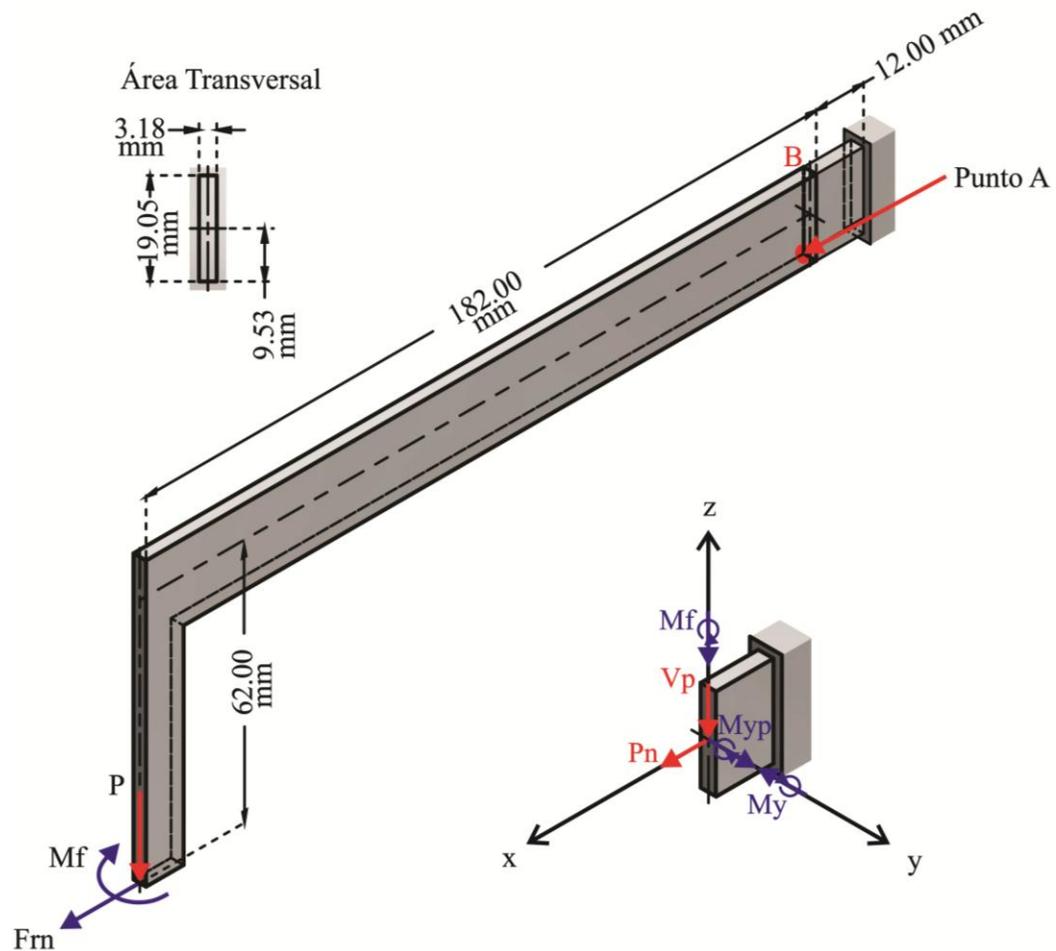


Figura 2.19. Cargas y momentos internos en el Punto A.

De la Figura anterior se nota que:

- La carga (P) generada por el peso de los elementos antes mencionados en el brazo, produce una carga (V_p) y un momento (M_{yp}) en el eje y .
- La carga (F_{nt}) genera un momento (M_y) en el eje y y una carga (P_n).
- El torque generado por las componentes tangenciales de las fuerzas en las bielas provocan un momento (M_f) en el eje z .

A continuación se calcula: la magnitud de las cargas y los momentos internos en la sección B, así como el esfuerzo normal (σ_x) y el esfuerzo cortante (τ_{xz}) en el Punto A.

$$P = V_p = 2.28 \text{ N} \rightarrow \text{Cortante}$$

$$F_{rn} = P_n = 6.21 \text{ N} \rightarrow \text{Tensión}$$



$$\begin{aligned}\overline{Myp} &= 0.182 i \times -2.28 k = 0.415 j \\ Myp &= 0.415 Nm \rightarrow \text{Compresión} \\ My &= 0.385 Nm \rightarrow \text{Tensión} \\ Mf &= 0.012 Nm \rightarrow \text{Compresión}\end{aligned}$$

Área de la sección transversal.

$$\begin{aligned}A &= 6.06 \times 10^{-5} m^2 \\ \bar{A} &= 3.02 \times 10^{-5} m^2\end{aligned}$$

Distancia Cy y Cz del punto A al eje y y eje z.

$$\begin{aligned}Cy &= 0.00159 m \\ Cz &= 0.009525 m \\ \bar{y} &= 0.0047625 m \\ t &= 0.00318 m\end{aligned}$$

Segundo momento de inercia del área transversal en el eje y y eje z.

$$\begin{aligned}Iy &= \frac{1}{12}bh^3 = 1.83202 \times 10^{-9}m^4 \\ Iz &= \frac{1}{12}b^3h = 5.1049 \times 10^{-11}m^4\end{aligned}$$

Esfuerzo normal y de corte en el Punto A.

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{Frn}{A} - \frac{(Myp)(Cz)}{Iy} + \frac{(My)(Cz)}{Iy} - \frac{(Mf)(Cy)}{Iz} = -4.43 Mpa \rightarrow \text{Compresión} \\ \tau_{xz} &= -\frac{(vp)(\bar{A})(\bar{y})}{(ly)(t)} = -0.056 Mpa \rightarrow \text{Cortante}\end{aligned}$$

De este modo se obtiene el siguiente estado de esfuerzos:

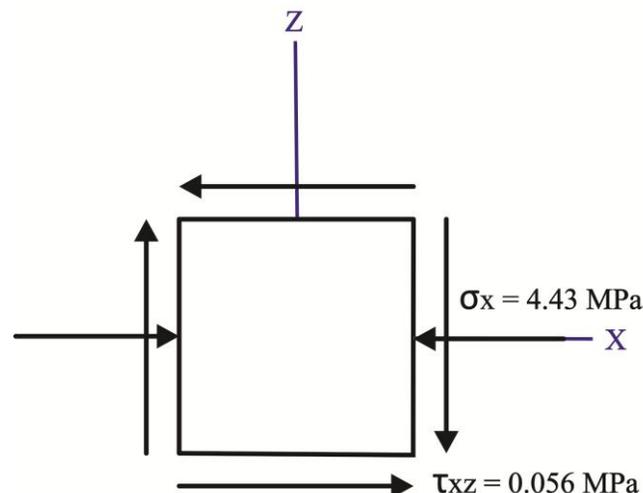


Figura 2.20. Estado de esfuerzos en el Punto A.



A continuación en la Tabla 2.5 y en la Figura 2.21 se calcula los esfuerzos principales y el máximo esfuerzo cortante. Una vez que se obtienen estos valores se calcula el esfuerzo efectivo para compararlo con el esfuerzo de cedencia.

Tabla 2.5. Obtención de esfuerzo efectivo.

Descripción	Símbolo	Valor	Fórmula
Esfuerzo Normal a lo Largo del Eje x.	σ_x	-4.43 MPa	---
Esfuerzo Normal a lo Largo del Eje y.	σ_y	0 MPa	---
Esfuerzo Cortante en el Plano xz.	τ_{xz}	-0.056 MPa	---
Esfuerzo Promedio	σ_{prom}	-2.215 MPa	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$
Máximo Esfuerzo Principal	σ_1	0.00070779 MPa	$\sigma_{prom} + \tau_{max}$
Mínimo Esfuerzo Principal	σ_2	-4.4307 MPa	$\sigma_{prom} - \tau_{max}$
Máximo Esfuerzo Cortante (Tresca)	τ_{max}	2.2157 MPa	$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}$
Esfuerzo Von-Mises	σ_{VM}	4.4311 MPa	$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2)^2 + (-\sigma_1)^2}{2}}$

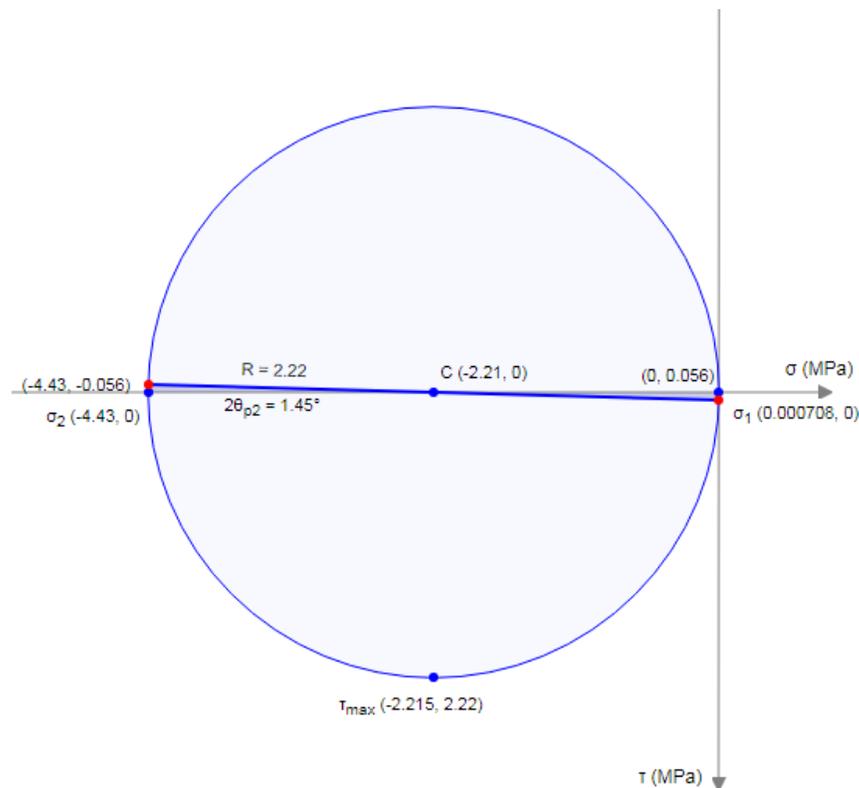


Figura 2.21. Circulo de Mohr.

Ya que el material es Aluminio 6061, éste tiene un Esfuerzo de cedencia $\sigma_Y = 240 \text{ Mpa}$ que es mucho mayor que el esfuerzo efectivo de $\sigma_{VM} = 4.43$. De modo que hay un buen rango de seguridad para probar más elementos con memoria de forma que ofrezcan un mayor torque.

2.2.2.2 Manivela.

El material utilizado para la fabricación de la manivela es un perfil solido cuadrado de acero 1018, se seleccionó este material por lo esbelto que puede fabricarse el elemento, el cual, es un cuadrado de 6.35 mm por lado y tiene un recubrimiento de cromo para tener una alta resistencia a la corrosión.

Como se ha mencionado antes, los elementos que impulsan al motor son los alambres con memoria de forma, estos alambres están acoplados a las 18 bielas del motor, como se puede ver en la Figura 2.22. Durante la operación, 9 de estas bielas son accionadas cuando sus alambres intentan recuperar su forma recta al entrar en el contenedor de agua caliente. Este cambio de forma del alambre produce una fuerza de empuje al aro (F_b). Por lo que, las componentes tangenciales al aro de dichas fuerzas generan un momento flector (M_f) en la manivela, mientras que las componentes normales al aro se descomponen en (P_x) y (P_y) a lo largo de la manivela.

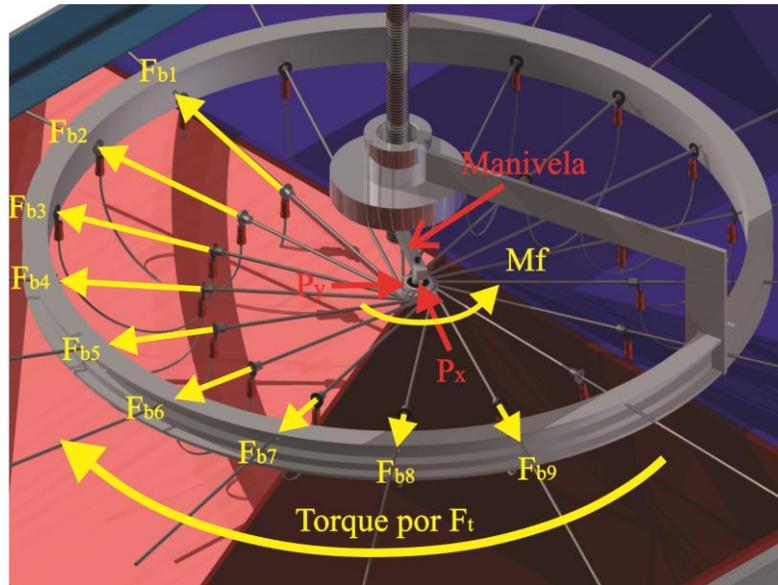


Figura 2.22. Momento flector (M_f) y Cargas (P_x) y (P_y) en la Manivela debido a las Fuerzas de los Alambres de NiTi.

El momento flector (M_f) generado por las fuerzas tangenciales al aro tiene un valor de 0.035 Nm. Como se puede ver en la Figura 2.22 la manivela tiene que soportar las cargas (P_x) y (P_y) que son las componentes de las 9 fuerzas normales al aro en el sistema de referencia que se muestra en la Figura 2.23.

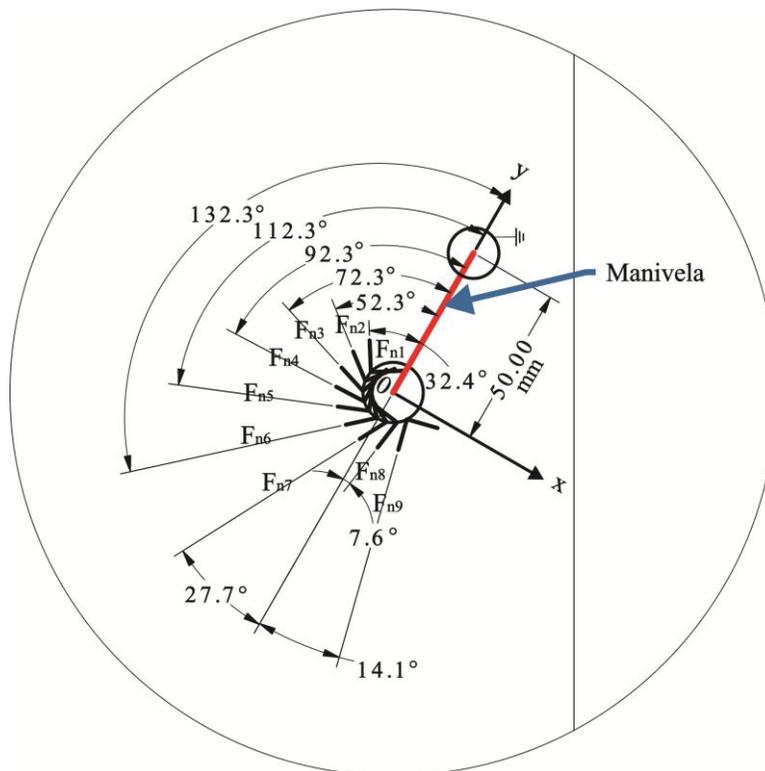


Figura 2.23. Ángulos de las Fuerzas normales al aro para obtener (P_x) y (P_y).



Una vez que se conocen los ángulos con respecto al sistema de referencia y las magnitudes de las fuerzas normales al aro (Tabla 2.4), se obtiene que: $P_x = 3.15 \text{ Nm}$ y $P_y = 2.86 \text{ Nm}$.

A continuación este elemento se analiza como una viga en voladizo, donde las cargas y el momento aplicado en el extremo libre comprimen la zona marcada con el punto A que está en la sección C. Con los valores obtenidos de las cargas (P_x), (P_y) y el (M_f), se calcula el esfuerzo normal y de corte al que está sometido dicho Punto A mostrado en la Figura 2.24.

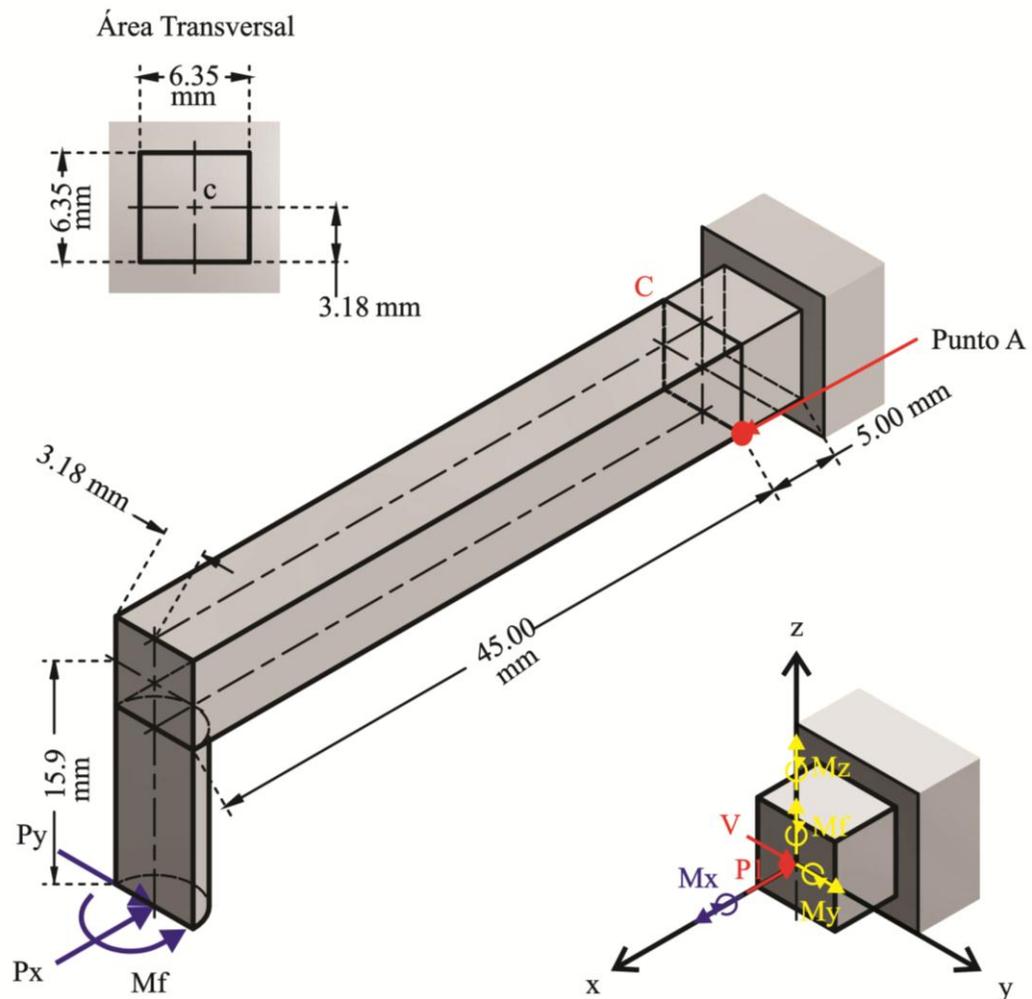


Figura 2.24. Cargas y momentos internos en el Punto A.

De la Figura anterior se nota que:

- La carga (P_x) genera una carga (P_1) y un momento (M_y) en el eje y .
- La carga (P_y) genera un momento (M_z) en el eje z y otro (M_x) en el eje x , además de una carga (V).



- c) El torque generado por las componentes tangenciales de las fuerzas en las bielas provocan un momento (M_f) en el eje z .

A continuación se calcula: la magnitud de las cargas y los momentos internos en la sección C, así como el esfuerzo normal (σ_x) y el esfuerzo cortante (τ_{xz}) en el Punto A.

$$P_x = P_1 = 3.15 \text{ N} \rightarrow \text{Compresión}$$

$$P_y = V = 2.86 \text{ N} \rightarrow \text{Cortante}$$

$$\vec{M}_x = -0.0159 \hat{k} \times 2.86 \hat{j} = 0.045 \hat{i}$$

$$M_x = 0.045 \text{ Nm} \rightarrow \text{Cortante}$$

$$\vec{M}_y = -0.0159 \hat{k} \times -3.15 \hat{i} = 0.05 \hat{j}$$

$$M_y = 0.05 \text{ Nm} \rightarrow \text{Compresión}$$

$$\vec{M}_z = 0.045 \hat{i} \times 2.86 \hat{j} = 0.129 \hat{k}$$

$$M_z = 0.129 \text{ Nm} \rightarrow \text{Compresión}$$

$$M_f = 0.035 \text{ Nm} \rightarrow \text{Compresión}$$

Área de la sección transversal.

$$A = 4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Distancia C del punto A al eje z .

$$C = 0.00318 \text{ m}$$

Segundo momento de inercia del área transversal en el eje y y eje z .

$$I_y = I_z = \frac{1}{12} b h^3 = 1.355 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

Momento polar de inercia.

$$J_c = 2.7 \times 10^{-10} \text{ m}^4$$

Esfuerzo normal y de corte en el Punto A.

$$\sigma_x = -\frac{P_1}{A} - \frac{(M_y)(C)}{I_y} - \frac{(M_z)(C)}{I_z} - \frac{(M_f)(C)}{I_z} = -5.1 \text{ Mpa} \rightarrow \text{Compresión}$$

$$\tau_{xz} = \frac{(M_x)(C)}{J_c} = 0.528 \text{ Mpa} \rightarrow \text{Cortante}$$

De este modo se obtiene el siguiente estado de esfuerzos Figura 2.25:

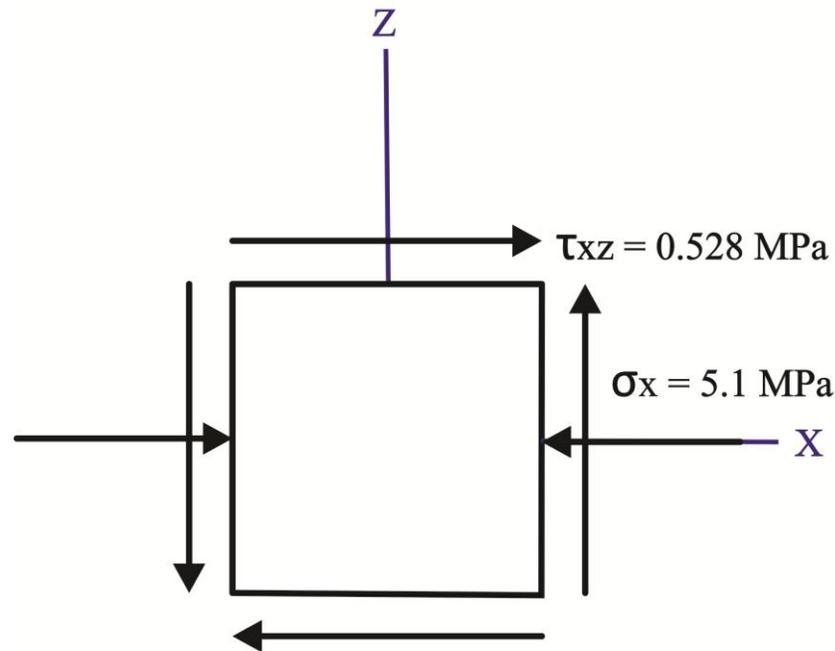


Figura 2.25. Estado de esfuerzos en el Punto A.

A continuación en la Tabla 2.6 y en la Figura 2.26 se calcula los esfuerzos principales y el máximo esfuerzo cortante. Una vez que se obtienen estos valores se calcula el esfuerzo efectivo para compararlo con el esfuerzo de cedencia.

Tabla 2.6. Obtención de esfuerzo efectivo.

Descripción	Símbolo	Valor	Fórmula
Esfuerzo Normal a lo Largo del Eje x.	σ_x	-5.1 MPa	---
Esfuerzo Normal a lo Largo del Eje y.	σ_y	0 MPa	---
Esfuerzo Cortante en el Plano xz.	τ_{xz}	0.528 MPa	---
Esfuerzo Promedio	σ_{prom}	-2.55 MPa	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$
Máximo Esfuerzo Principal	σ_1	0.05409 MPa	$\sigma_{prom} + \tau_{max}$
Mínimo Esfuerzo Principal	σ_2	-5.1541 MPa	$\sigma_{prom} - \tau_{max}$
Máximo Esfuerzo Cortante (Tresca)	τ_{max}	2.6041 MPa	$\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2}$
Esfuerzo Von-Mises	σ_{VM}	5.1813 MPa	$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2)^2 + (-\sigma_1)^2}{2}}$

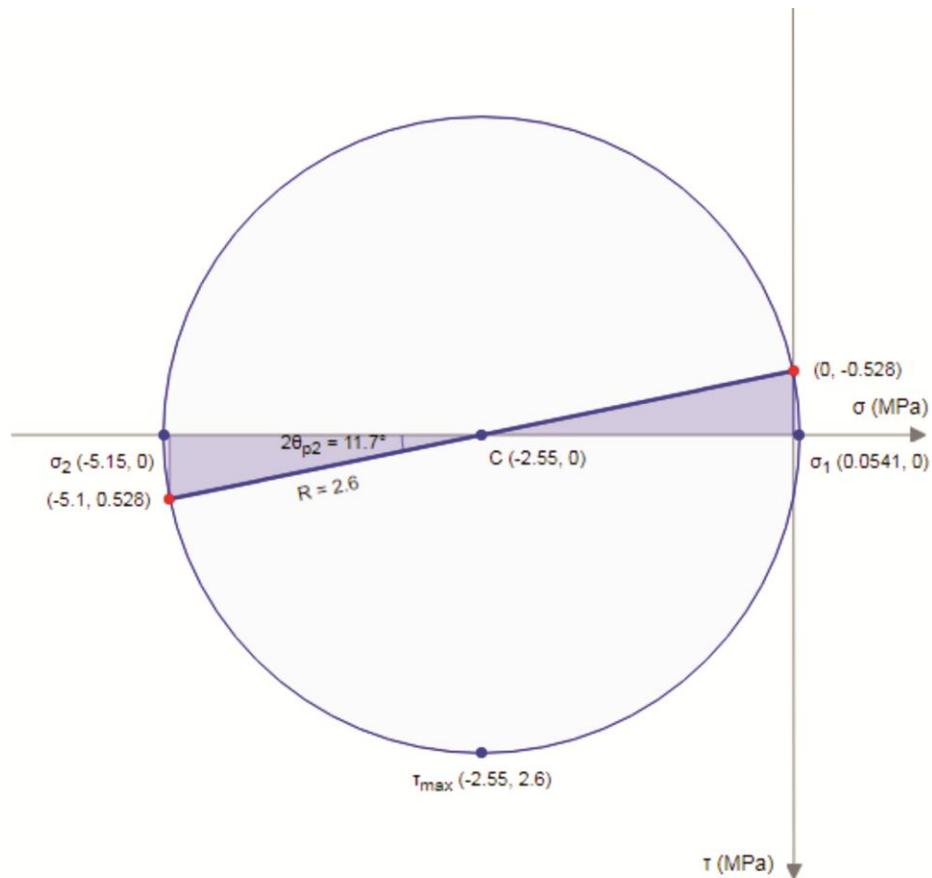


Figura 2.26. Circulo de Mohr.

Ya que el material es Acero 1018 este tiene un Esfuerzo de cedencia de $\sigma_y = 370 \text{ Mpa}$ que es mucho mayor que el esfuerzo efectivo de $\sigma_{VM} = 5.18 \text{ Mpa}$. De modo que hay un buen rango de seguridad para probar más elementos con memoria de forma que ofrezcan un mayor torque.

El análisis anterior permitió conocer las cargas y momentos permisibles de los elementos críticos del motor. Las cargas que actualmente tiene el motor, son muy pequeñas en comparación con las cargas y momentos permisibles, sin embargo, este motor pertenece a un banco de pruebas por lo que se espera incrementar el torque con un mayor número de alambres o con alambres que brinden mayor empuje. De modo que se garantiza que los elementos críticos del motor soporten un rango considerable de cargas.



2.2.2.3 Aro.

Este elemento se usa además como volante de inercia, para almacenar energía cinética y reducir las fluctuaciones de velocidad angular del sistema. Éste está sujeto por los brazos como se muestra en la Figura 2.16.

Como se puede ver en la Figura 2.18-a, los alambres ejercen una fuerza transversal al aro durante su operación. El siguiente análisis nos permite conocer la carga permisible que puede soportar el aro por biela, ya que se espera probar diversos elementos que puedan ofrecer un mayor torque.

Ya que el material de fabricación es aluminio 6061, se usa un esfuerzo último a tensión de $\sigma_U = 260 \text{ Mpa}$ para calcular el esfuerzo permisible normal con un factor de seguridad de 3, según el método de diseño por esfuerzo permisible [22], es:

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_U}{F.S.}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{260 \text{ Mpa}}{3} = 86.6 \text{ Mpa}$$

Dado que, el esfuerzo permisible (σ_{perm}) es menor al esfuerzo de cedencia normal ($\sigma_Y = 240 \text{ Mpa}$), se considera que el esfuerzo permisible está en la zona de proporcionalidad del material. A continuación se calcula el momento flector máximo en la porción del aro que está sometida a las cargas de los alambres. Para encontrar dicho momento flector es necesario calcular el momento de inercia de la sección transversal, En la Figura 2.27 se muestra un esquema de dicha sección.

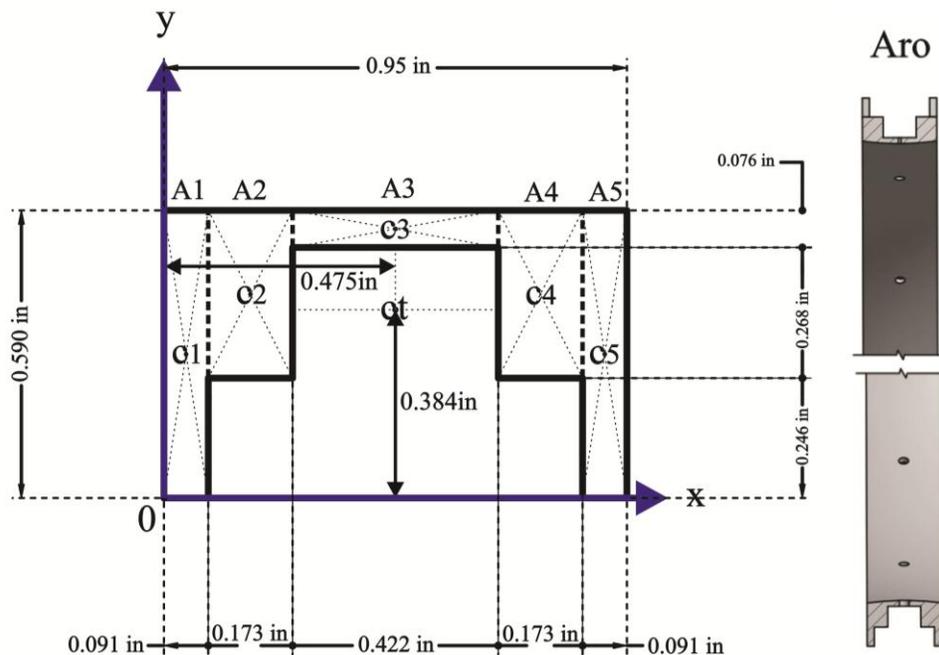


Figura 2.27. Centroide y Segundo Momento de Inercia de la Sección Transversal de Aro.



Para obtener las coordenadas del centroide del área transversal del aro es necesario conocer el centroide de cada figura geométrica que conforman la sección y su área. El valor de interés, es la distancia del eje x al centroide general de la sección el cual es de $0.384 \text{ in} = 0.00975 \text{ m}$.

Calculando mediante el teorema de Steiner o de ejes paralelos el momento de inercia general de la sección el cual tiene un valor de $I = 2.58 \times 10^{-9} \text{ m}^4$.

Si la curvatura inicial del elemento que se quiere analizar debido a flexión es pequeña, es decir, si su radio de curvatura es grande comparado con la altura de la sección transversal, puede obtenerse una buena aproximación si se supone que el elemento es recto y se usan las ecuaciones de σ_{perm} en flexión [22].

Sustituyendo en:

Momento flector máximo soportado por el aro.

$$M_f = \frac{\sigma_{perm} I}{c} = \frac{(86.6 \times 10^6 \text{ pa})(2.58 \times 10^{-9} \text{ m}^4)}{0.00975 \text{ m}} = 22.916 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{perm} = 86.6 \text{ Mpa}$$

Segundo Momento de Inercia del Área Transversal del Aro mostrada en la Figura 2.17.

$$I = 2.58 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Centroide:

$$c = 0.00975 \text{ m}$$

Para conocer las cargas en el aro, esta porción se analiza como una viga doblemente empotrada con seis cargas puntuales como se muestra en la Figura 2.28. Se analiza como una viga doblemente empotrada ya que la sección estudiada es de brazo a brazo, los cuales forman un ángulo de 120° entre sí. Se consideran seis cargas puntuales ya que el motor consta de 18 bielas y se está analizando una tercera parte del aro.

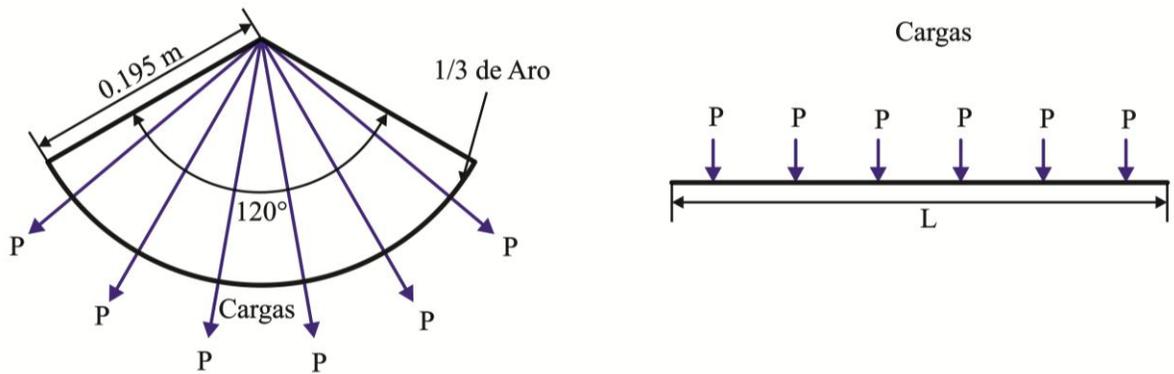


Figura 2.28. Una tercera parte del aro se toma como un elemento recto [22].

Por lo tanto:

$$L = r\theta$$

$$L = (0.195m)(2.09rad)$$

$$L = 0.408m$$

En la Figura 2.29 se muestra un diagrama de cuerpo libre de las condiciones de empotramiento y cargas en el aro en una sección AB, analizado como una viga doblemente empotrada con cargas puntuales.

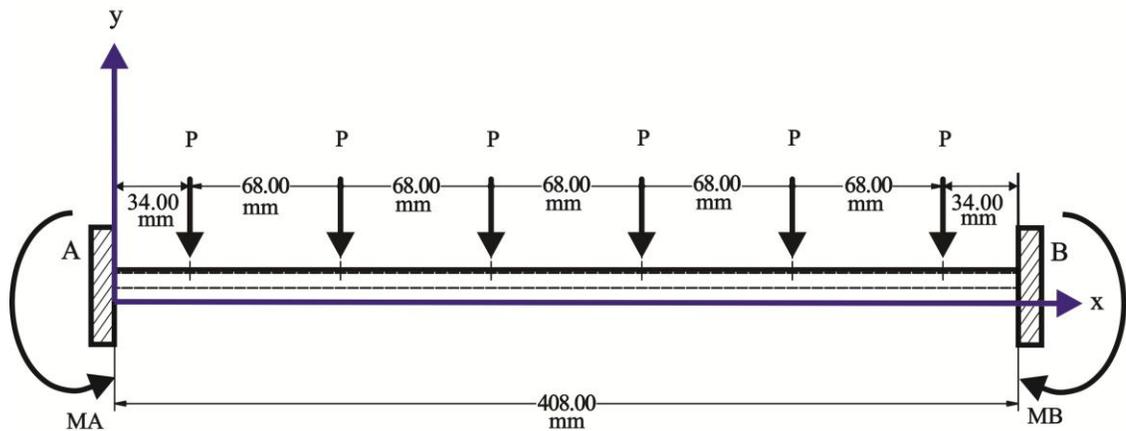


Figura 2.29. Viga doblemente empotrada con cargas puntuales simétricas.

Para este caso, el momento flector es (ver Apéndice 1):

$$M_f = MA = MB = \frac{PL(2n^2 + 1)}{24n}$$

Donde n es el número de cargas y L la longitud del elemento a estudiar, por lo tanto:



$$P = \frac{24n MB}{L(2n^2 + 1)}$$

$$P = \frac{(24)(6)(22.916 \text{ Nm})}{(0.408 \text{ m})(73)} = 110.88 \text{ N}$$

Debido a que el aro se utiliza como volante de inercia, este elemento es robusto y permite soportar cargas de hasta 110.88 N, que es muy alto en comparación con la fuerza que se tiene actualmente, como se puede observar en la Tabla 2.4 la carga máxima presentada durante la operación del motor es de 1.09 N.

2.3 Fabricación del prototipo.

En esta sección se presenta una descripción de los procesos de manufactura a utilizar en la fabricación de las piezas del motor, además se describe brevemente las características del elemento con memoria de forma. En el Anexo 2 se encuentran los planos de fabricación y ensamblaje.

2.3.1 Alambres de NiTi.

El motor que se desarrolla en el presente trabajo aprovecha los cambios de forma de un elemento fabricado con una aleación con memoria de forma (AMF). Estos cambios de forma se deben a una transformación de fase activada térmicamente. A este fenómeno se le conoce como memoria de forma simple.

Los alambres que se utilizan en este motor son de la aleación NiTi. El umbral crítico en esta aleación, puede existir en un rango de temperatura bastante amplio de -150° a $+150^{\circ}$ dependiendo de las proporciones de Ni y Ti en la composición de la aleación. El aumento de la cantidad relativa de Ni tiene el efecto de disminuir la temperatura umbral para la transformación, y se pueden lograr temperaturas críticas extremadamente bajas mediante la sustitución atómica de Cu por Ni.

Los elementos con MMF utilizados en este motor son dos alambres unidos como se muestra en la Figura 2.30, este arreglo se instala en cada biela del motor, dando un total de 18 arreglos o 36 alambres, con temperaturas de transformación de fase de 60°C a la fase austenita y una longitud de 180 mm con un diámetro de 0.08 mm. En el Anexo 1 se encuentra una caracterización de este arreglo.



Figura 2.30. Arreglo de Alambres de NiTi.

2.3.2 Elementos mecanizados.

En esta sección, se presentan las hojas de proceso para los elementos del motor que requieren ser mecanizados:

- **Rotor.**

Este elemento se compone por una pieza central (base rotor) con alojamiento para rodamiento, esta pieza esta soldada a los brazos que sostienen el aro donde se alojan las bielas. En la Figura 2.31 se puede observar este arreglo.

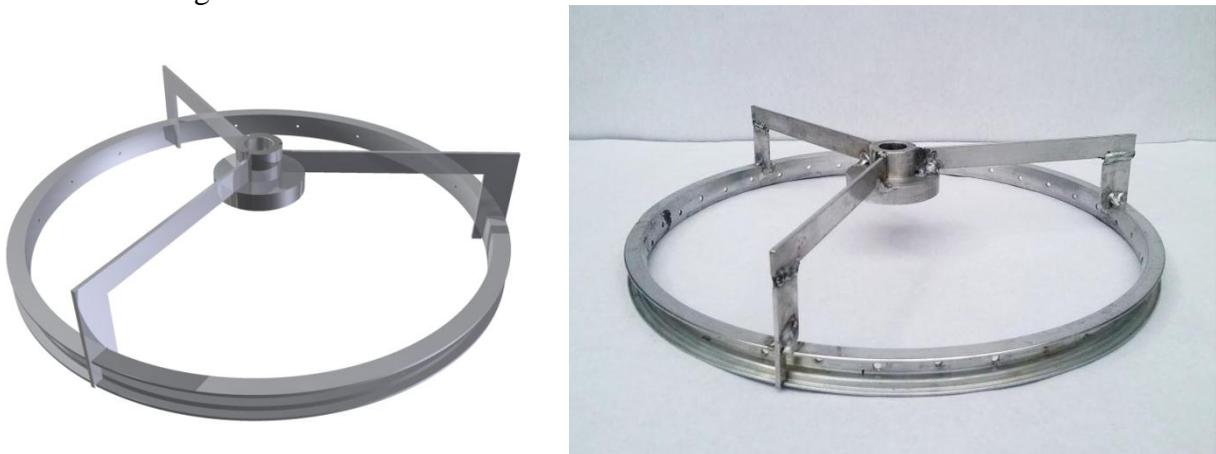


Figura 2.31. Rotor.

La pieza central o base rotor debe ser maquinada a diferentes diámetros y ranurada como se muestra en la Figura 2.32.

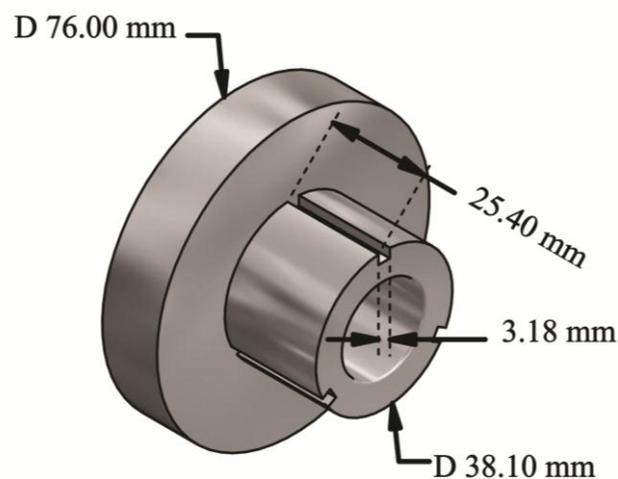


Figura 2.32. Dimensiones de la base del rotor.

Las máquinas herramientas que intervienen en el proceso son: torno, fresadora y cabezal divisor.

A continuación se presenta la hoja de proceso utilizada para el maquinado.

Pieza: Base del rotor	Número de plano: 2	Número de piezas: 1	Unidades: mm
Dimensiones originales: Pulgadas (in)		Material: Aluminio 6061	
Número	Operación	Máquina herramienta	
1	Montado de la pieza en el chuck	Torno	
2	Refrentar a 2 mm de profundidad	Torno	
3	Cilindrado a 76.00 mm x 40.60 mm	Torno	
4	Cilindrado a 38.10 mm x 25.40 mm	Torno	
5	Barrenar con broca de centro de 1/4 in	Torno	
6	Barrenar hasta 3/4 in	Torno	
7	Colocar herramienta para torneado interior	Torno	
8	Tornear interiormente hasta 35.00 mm	Torno	
9	Montar pieza en el cabezal divisor, sujetando del diámetro 76.00 mm	Fresadora	
10	Fresar tres ranuras simétricas a 2.50 mm de profundidad	Fresadora	

- **Anillo Sujetador de Bielas.**

Este elemento es esencialmente un anillo, que se muestra en la figura 2.33 diseñado para sujetar a las bielas mediante una junta con un grado de libertad, que le permite a las bielas girar sobre el eje perpendicular al nodo.

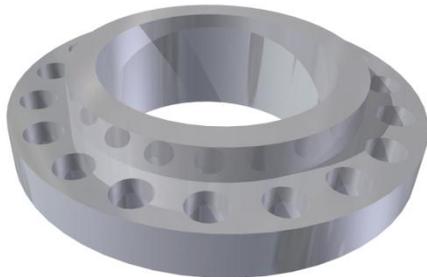


Figura 2.33. Anillo Sujetador de Bielas.

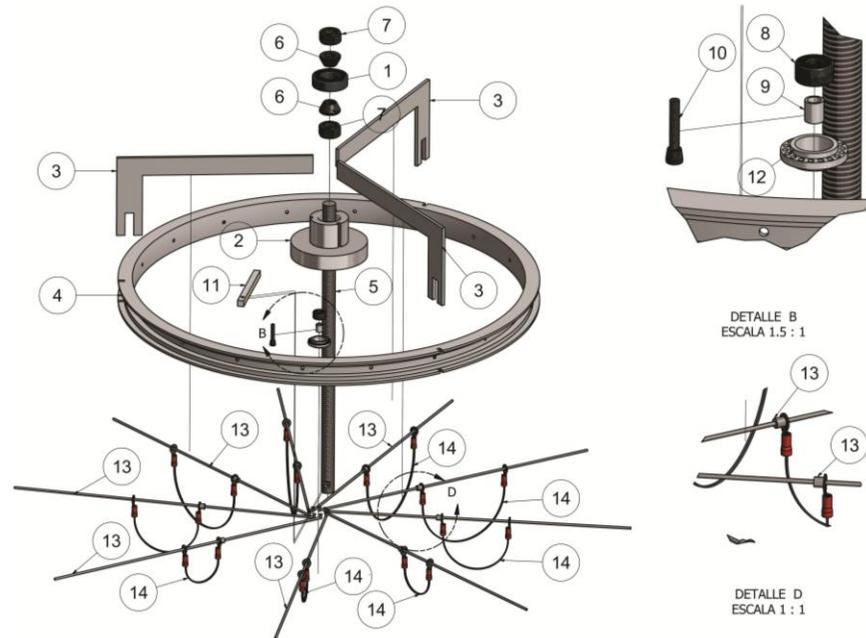
Del mismo modo, las máquinas herramientas que intervienen en el proceso son: torno, fresadora y cabezal divisor. La hoja de proceso es la siguiente.



Pieza: Anillo Sujetador de bielas	Número de plano: 12	Número de piezas: 1	Unidades: mm
Dimensiones originales: Pulgadas (in)		Material: Aluminio 6061	
Número	Operación	Máquina herramienta	
1	Montado de la pieza en el chuck	Torno	
2	Refrentar a 0.08 in de profundidad	Torno	
3	Cilindrado a 22.23 mm x 6.35 mm	Torno	
4	Cilindrado a 15.90 mm x 3.80 mm	Torno	
5	Barrenar con broca de centro de 1/4 in	Torno	
6	Barrenar hasta 6.35 mm	Torno	
7	Colocar herramienta para torneado interior	Torno	
8	Tornear interiormente hasta 12.70 mm	Torno	
9	Montar pieza en el cabezal divisor, sujetando del diámetro 22.23 mm	Fresadora	
10	Hacer 18 barrenos simétricos de 1/8 de diámetro	Fresadora	

- **Elementos comerciales:**

Los elementos comerciales son: rodamientos, bielas, aros, brazos. Estos elementos se ensamblan como se muestra en la Figura 2.34.



ELEMENTO	CTDAD	No DE PIEZA
1	1	Rodamiento 62300-2RS1 (10X35X17 mm)
2	1	Base Rotor (76X40.60 mm)
3	3	Brazos (195X84 mm)
4	1	Aro (417X24.13 mm)
5	1	Eje (311X12.70 mm)
6	2	Cono 1/2"
7	2	Tuerca Hexagonal (1/2"-13UNC)
8	1	Rodamiento R188ZZ (6.35X12.7X4.762 mm)
9	1	Separador (7.24X6.35 mm)
10	1	Tornillo Allen Cabeza Cilindrica (1/8"-40UNCX 3/4")
11	1	Manivela (76.2X6.35 mm)
12	1	Anillo Sujetador de Bielas (22.23X6.35 mm)
13	18	Bielas (306X2.00 mm)
14	1	Bucles de Alambres con MMF (180X0.86 mm)

Figura 2.34. Explosivo del motor y cuadro de partes.



Capítulo 3

3. Resultados y discusión.

3.1 Pruebas al prototipo.

El prototipo debe ser capaz de operar durante largos periodos de tiempo para una buena obtención de datos. Dichos datos son las temperaturas del agua en los contenedores y las revoluciones del motor con respecto al tiempo. A continuación se describe brevemente la instrumentación de la prueba.

3.1.1 Instrumentación y resguardo de datos.

Para obtener las temperaturas de los depósitos se utilizan termopares conectados a un controlador lógico programable (PLC) con el fin de registrar el gradiente térmico. En el caso de las revoluciones se utiliza un sensor óptico escalado mediante un transistor con el fin de conectarlo a una entrada digital de alta velocidad del controlador. Esta información será enviada a la computadora, con el fin de resguardarla para su posterior procesamiento. En la Figura 3.1 se muestra un esquema con los elementos de adquisición de datos y resguardo de información.

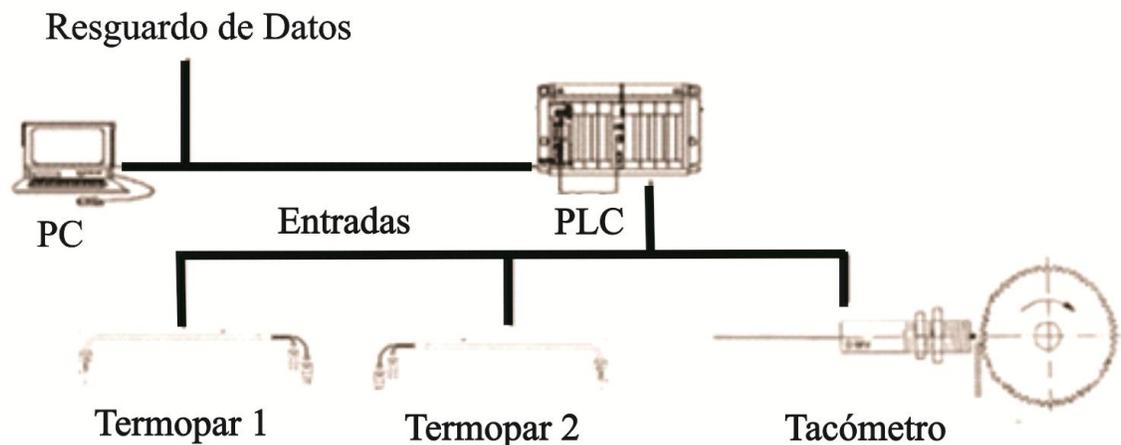


Figura 3.1. Elementos del sistema de control para la realización de pruebas.

El PLC a utilizar es de la marca UNITRONICS Modelo: Vision120-22-UN2. Dicho controlador tiene las siguientes características:

1. Bajo costo.
2. Programación flexible.
3. Interfaz hombre máquina integrada.
4. Software de programación con licencia libre.
5. Cuenta con expansiones para diversas aplicaciones.

En la Figura 3.2 se muestra dicho PLC.



Figura 3.2. PLC marca UNITRONICS modelo: Vision 120-22-UN2.

Los termopares utilizados son del Tipo J, los cuales alcanzan un rango de temperatura de 0 a 750 °C con un límite de error de 1.1°C por lo que es recomendado para bajas temperaturas, además de poderse utilizar en ambientes húmedos ya que está fabricado de un material inoxidable. En la Figura 3.3 se puede observar dicho termopar.



Figura 3.3. Termopar.

Para la medición de la velocidad angular se utilizó un encoder, éste nos proporciona 30 pulsos por revolución, está compuesto de un sensor óptico (optointerruptor) ITR8102 y un cilindro de aluminio ranurado como se muestra en la Figura 3.4.

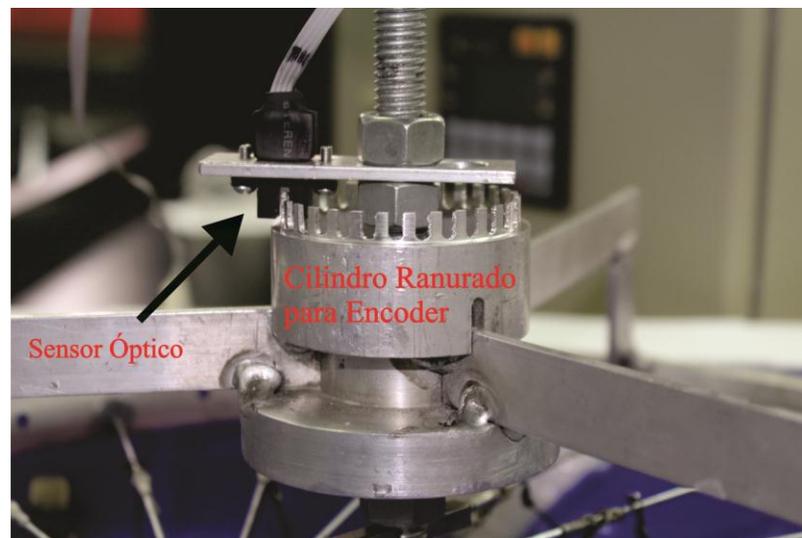


Figura 3.4. Encoder para la medición de las RPM.

En la Figura 3.5 se muestra el banco de pruebas para el motor sumergible con MMF, además se aprecian los elementos antes mencionados. Éste banco permite adquirir, visualizar y analizar los datos durante la prueba, mediante el programa Labview y Excel.

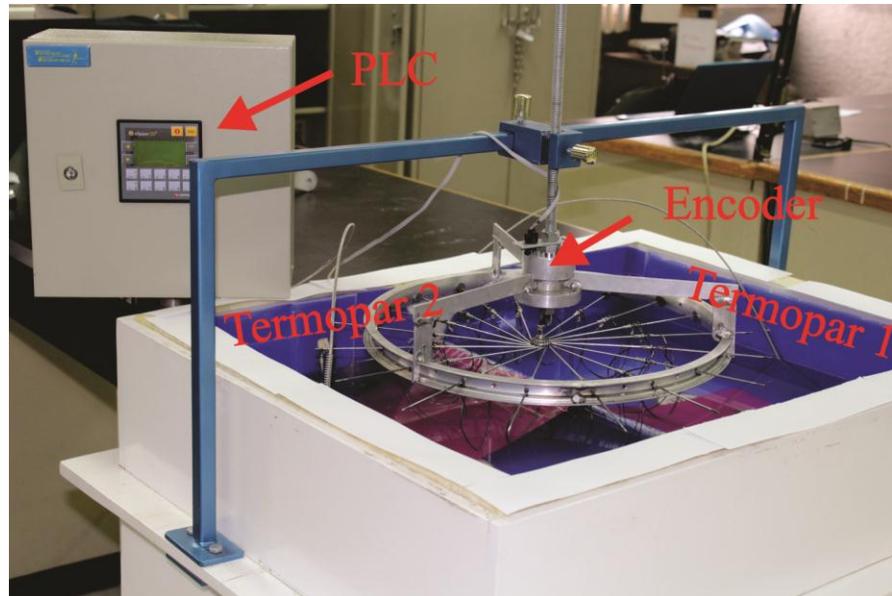


Figura 3.5. Instrumentación del Motor.

En la Figura 3.6 se muestra una captura de pantalla de la interfaz de Labview.

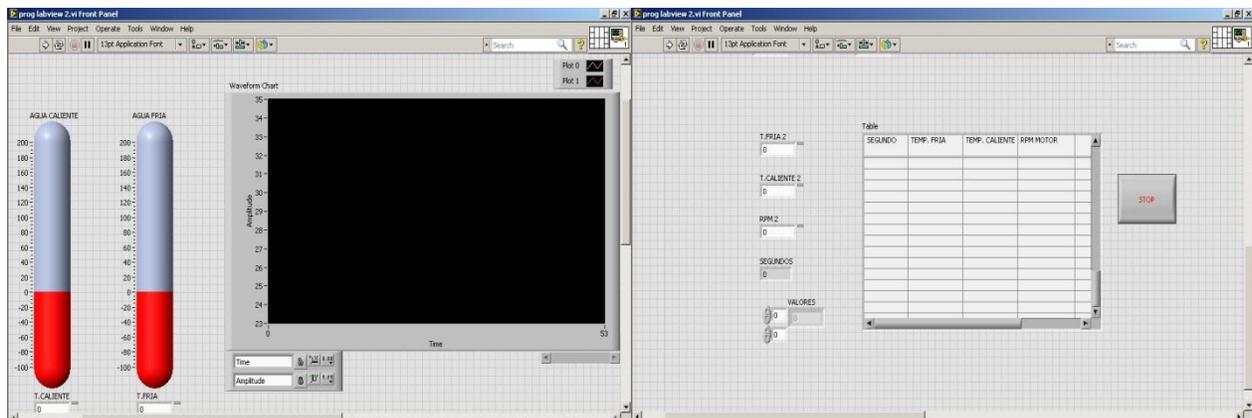


Figura 3.6. Monitoreo y Adquisición de Datos.

3.1.2 Caracterización del motor sumergible.

Como ya se mencionó anteriormente, el banco de pruebas posee dos contenedores, uno con resistencias para calentar el agua y el otro con agua a temperatura ambiente (25°C) al inicio de la prueba. Cabe mencionar que para el funcionamiento del motor es necesario un gradiente térmico de aproximadamente 60°C . Cuando se alcanza dicho gradiente se deja de suministrar energía a las resistencias y se inicia la prueba, en seguida se sumergen los alambres en ambos contenedores como se muestra en la Figura 3.7 de esta manera se pone en marcha el motor.

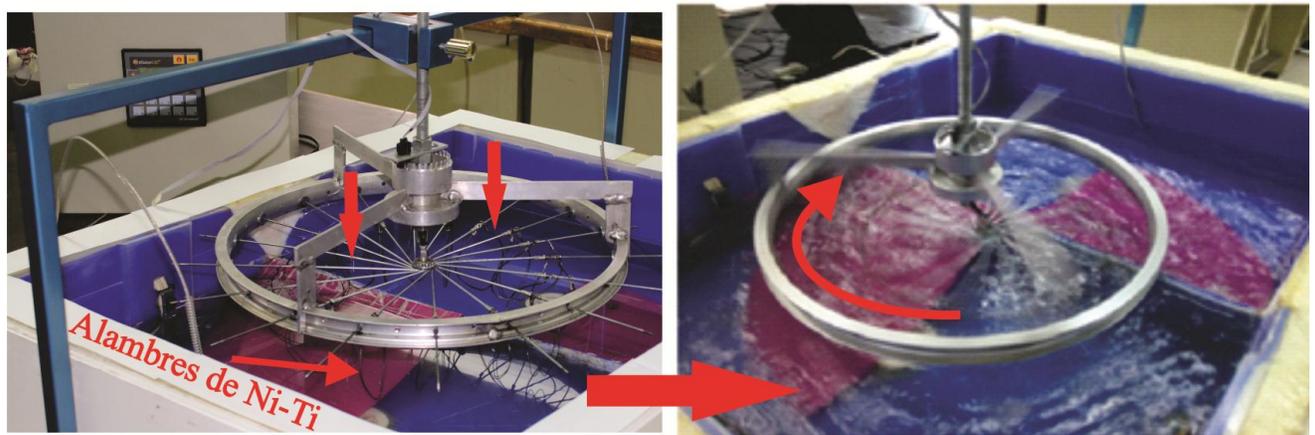


Figura 3.7. Inicio de las pruebas.

Unas de las características importantes a conocer del motor térmico son:

1. El gradiente térmico mínimo de operación.
2. El tiempo de autonomía con 40 litros de agua, 20 en cada contenedor de agua.
3. El comportamiento del gradiente térmico con respecto al tiempo.
4. La variación de las revoluciones de acuerdo al valor del gradiente térmico.
5. El torque y la potencia que nos puede entregar.

Para esto, se propusieron dos pruebas:

La primera prueba consiste en obtener la temperatura en ambos contenedores, la velocidad angular y el tiempo hasta que el gradiente térmico sea tan bajo que el motor pare. De modo que se obtienen las características de los puntos 1,2,3 y 4 de la numeración anterior.

La segunda prueba consiste en detener al motor en diferentes gradientes de temperatura y tomar el tiempo en el que se estabiliza la velocidad angular, este proceso se repetirá varias veces durante la prueba. Con esto conoceremos la aceleración angular y así el punto 5.



3.2 Análisis de resultados.

Al analizar los datos que se obtuvieron de la primera prueba se pudo graficar el gradiente térmico vs tiempo, el gradiente térmico vs rpm las cuales se muestran en la siguiente sección.

En la segunda prueba se calculó la aceleración angular del motor en diferentes gradientes de temperatura, ya que el banco de pruebas permite medir el tiempo en que el motor alcanza su velocidad máxima partiendo del reposo. De modo que se puede conocer el torque y la potencia. A continuación se desarrolla cada punto.

3.2.1 Prueba gradiente térmico vs tiempo.

En cada segundo, desde el inicio de la prueba 1, se registran las temperaturas de los dos contenedores así como las RPM de motor. De esta manera se sabe que la prueba 1 se inició con una temperatura en el agua de 88.2 °C en un contenedor y de 24.9 °C en el otro, teniendo un gradiente térmico de 63.3 °C y una velocidad angular de 50 RPM.

Una de las observaciones, ya que los elementos impulsores del motor se tienen que estar calentando y enfriando constantemente en ambos contenedores, existe un intercambio de calor entre uno y otro acelerando el equilibrio térmico. En la Figura 3.8 se muestra una gráfica en el que se puede ver cómo está variando el gradiente térmico respecto al tiempo. Los datos graficados se muestran en la Tabla 3.1.

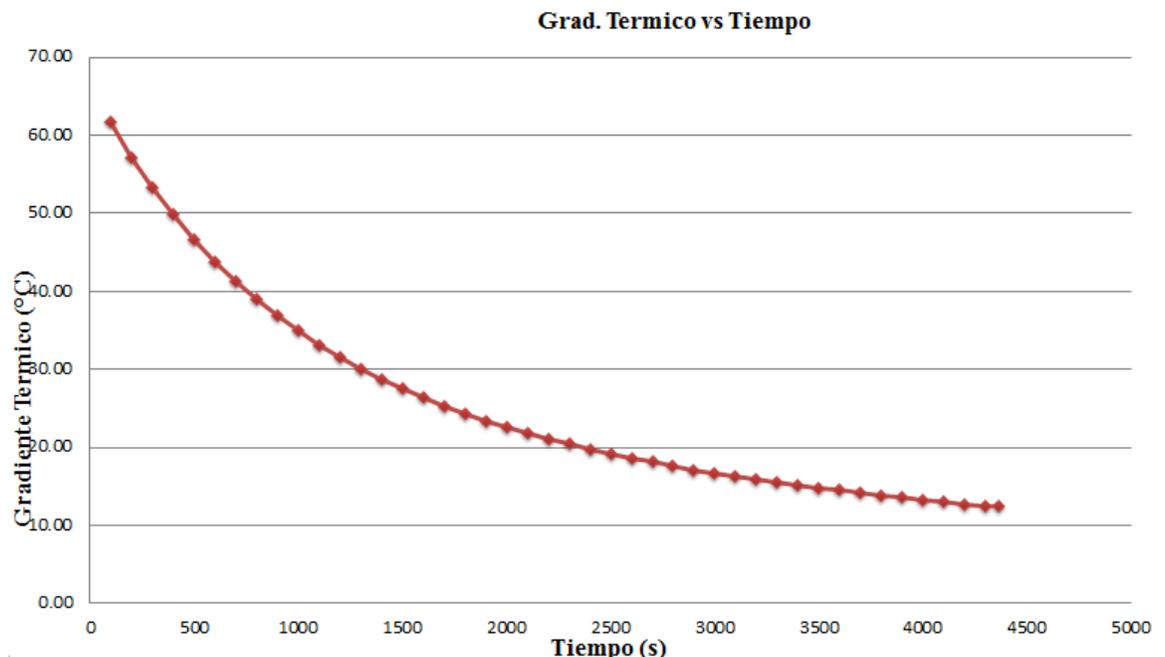


Figura 3.8. Gradiente térmico vs Tiempo.



Como se puede ver los datos son congruentes, ya que el intercambio en la temperatura se realiza más rápido cuando el gradiente es mayor debido a dos factores principales:

1. Cuando el gradiente térmico es más grande, la energía calorífica fluye más rápidamente.
2. Con un gradiente mayor, la velocidad angular del rotor aumenta, por lo que se alcanza el equilibrio térmico más rápidamente entre los dos contenedores.

3.2.2 Prueba gradiente térmico vs revoluciones por minuto.

Otro dato importante es, el comportamiento de las RPM según el gradiente térmico. En la Figura 3.9 se muestra una gráfica de gradiente térmico vs RPM.

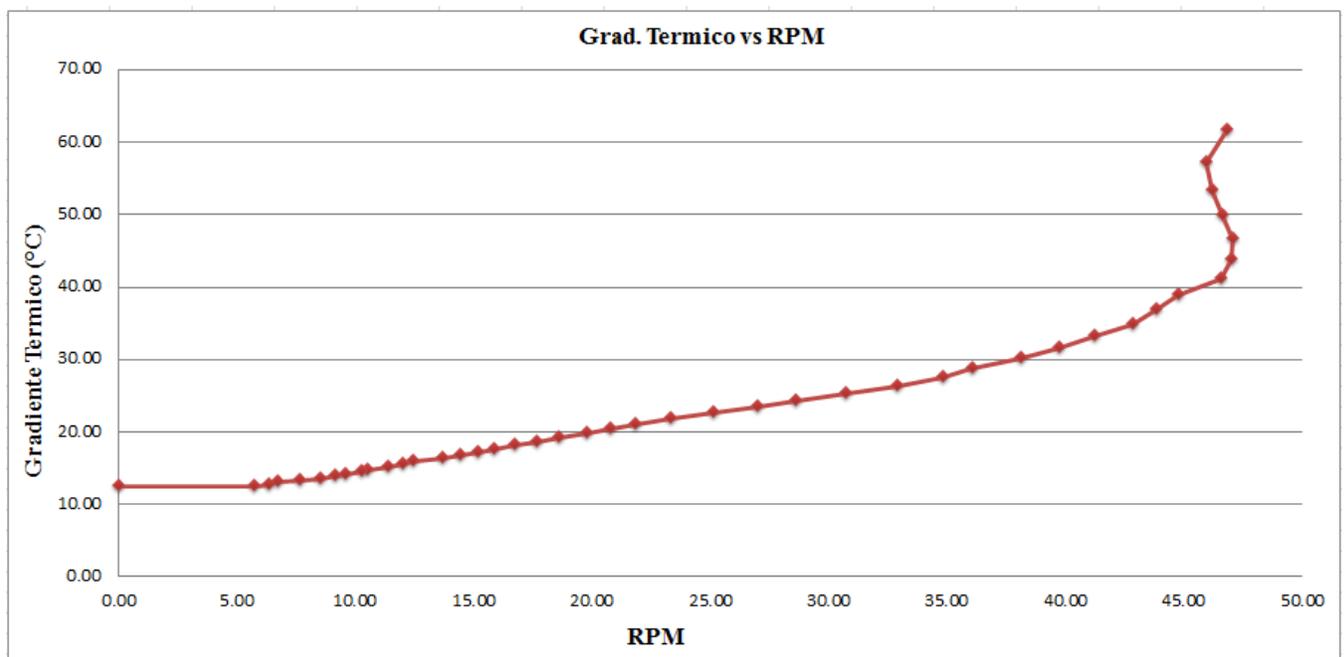


Figura 3.9. Gráfico gradiente térmico vs revoluciones.

Como se puede ver, al inicio de la prueba se tiene un gradiente térmico de 60°C manteniéndose casi las mismas rpm hasta un gradiente de 40°C, se observó durante la prueba que esta fluctuación fue provocada por falta de lubricación. A partir de este gradiente las rpm disminuyen como se muestra en la gráfica.



3.2.3 Tiempo de autonomía y gradiente mínimo de operación.

Como ya se mencionó en esta prueba se deja que las temperaturas en los dos depósitos se equilibren, es decir, que el gradiente se acerque a 0°C. La prueba termina cuando el motor se detiene y es entonces donde se obtienen dos datos interesantes: el tiempo de autonomía del motor y el gradiente mínimo de operación. En la Tabla 3.1 se muestran algunos valores que se obtuvieron en la experimentación.

Tabla 3.1. Valores promedio obtenidos durante la experimentación.

Tiempo (s)	Promedio RPM	Promedio Grad. Térmico (°C)	Velocidad Angular (Rad/s)
100	46.84	61.65	4.90
200	45.96	57.12	4.81
300	46.16	53.23	4.83
400	46.62	49.79	4.88
500	47.04	46.63	4.93
600	47.02	43.82	4.92
700	46.54	41.20	4.87
800	44.74	38.91	4.69
900	43.80	36.82	4.59
1000	42.84	34.91	4.49
1100	41.22	33.17	4.32
1200	39.70	31.57	4.16
1300	38.08	30.09	3.99
1400	36.02	28.76	3.77
1500	34.78	27.47	3.64
1600	32.86	26.34	3.44



Tiempo (s)	Promedio RPM	Promedio Grad. Térmico (°C)	Velocidad Angular (Rad/s)
1700	30.68	25.29	3.21
1800	28.62	24.35	3.00
1900	26.96	23.44	2.82
2000	25.12	22.55	2.63
2100	23.28	21.75	2.44
2200	21.82	21.06	2.28
2300	20.74	20.40	2.17
2400	19.78	19.76	2.07
2500	18.56	19.20	1.94
2600	17.64	18.60	1.85
2700	16.70	18.13	1.75
2800	15.86	17.62	1.66
2900	15.14	17.11	1.59
3000	14.40	16.69	1.51
3100	13.66	16.26	1.43
3200	12.44	15.91	1.30
3300	11.98	15.52	1.25
3400	11.34	15.18	1.19
3500	10.50	14.80	1.10
3600	10.22	14.48	1.07
3700	9.54	14.17	1.00
3800	9.14	13.86	0.96
3900	8.50	13.58	0.89



Tiempo (s)	Promedio RPM	Promedio Grad. Térmico (°C)	Velocidad Angular (Rad/s)
4000	7.66	13.30	0.80
4100	6.72	13.00	0.70
4200	6.34	12.75	0.66
4300	5.72	12.52	0.60
4366	0.00	12.42	0.00

El tiempo total de la prueba fue de 4366 seg de los cuales 4295 seg el motor seguía en operación, con un gradiente térmico de 12.5 °C y con 6 RPM.

3.2.4 Obtención de gradiente térmico vs torque.

Para obtener el torque que hay en el rotor, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\tau = I\alpha$$

Donde:

τ = Torque.

I = Momento de inercia de rotor.

α = Aceleración angular.

Para obtener la aceleración del motor a diferentes gradientes de temperatura, se realiza la prueba 2 que consiste en detener por completo el motor aplicándole una fuerza manualmente, luego se libera y se toma el tiempo en que alcanza de nuevo la velocidad máxima. El momento de inercia se obtiene con la ayuda de un software para diseño mecánico como se muestra en la Figura 3.10. En la Tabla 3.2 se muestran los valores calculados a partir de los datos adquiridos en la prueba. En la Figura 3.11 se puede observar una gráfica de torque vs gradiente de temperatura.

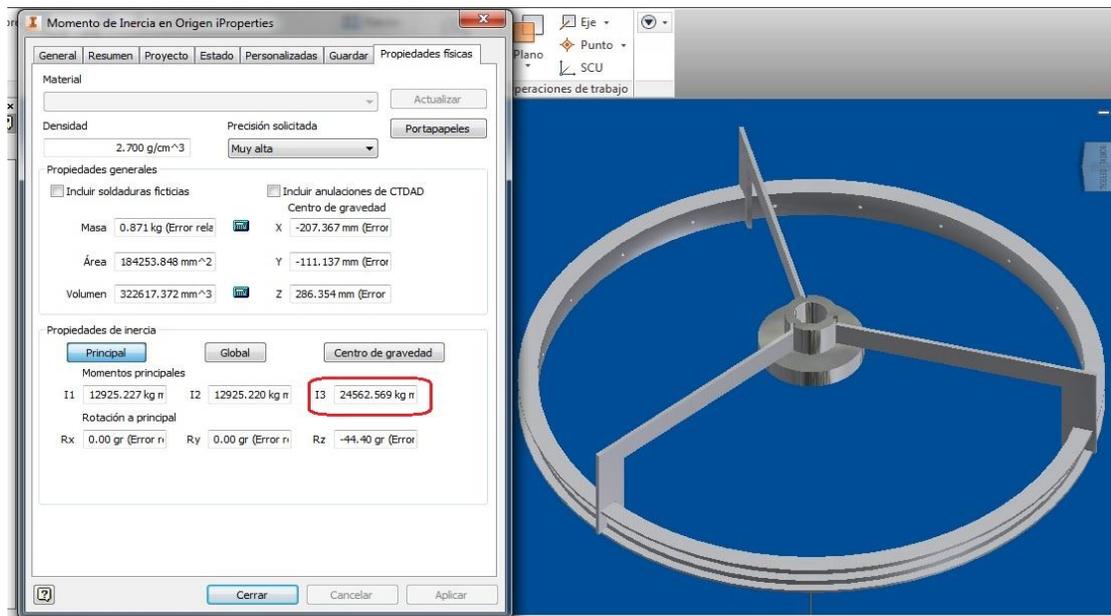


Figura 3.10. Obtención del momento de inercia en Autodesk Inventor.

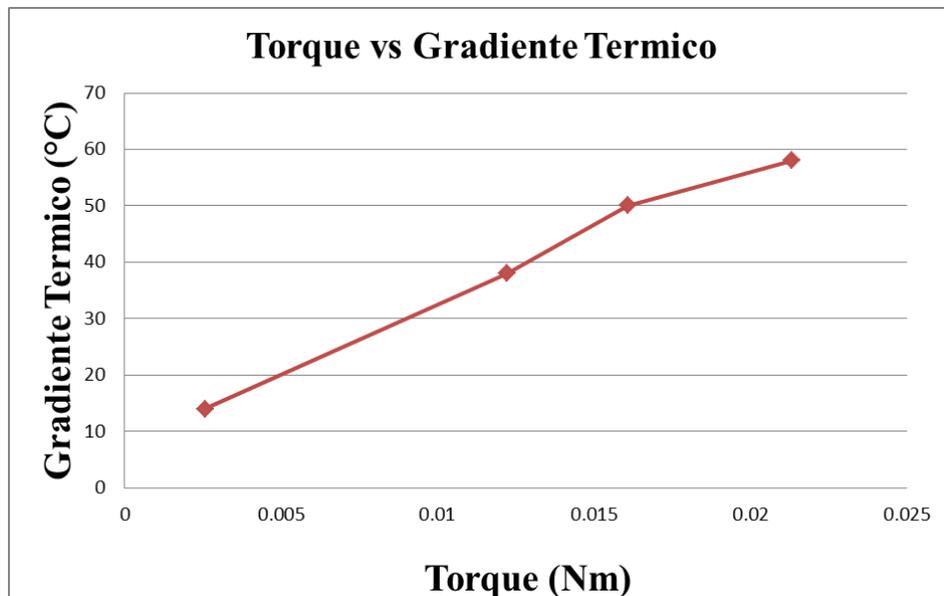


Figura 3.11. Torque vs gradiente térmico.



3.2.5 Obtención de la potencia generada.

Para obtener la potencia en el rotor se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = \tau\omega$$

Donde:

P = Potencia

τ = Torque

ω = Velocidad angular

En este caso todos los datos ya son conocidos. En la Figura 3.12 se puede observar una gráfica de potencia vs gradiente de temperatura.

Tabla 3.2. Resultados a Partir de la Prueba.

Momento de Inercia ($Kg m^2$)	Aceleración Angular (Rad/s^2)	Velocidad Angular (Rad/s)	Grad. Térmico ($^{\circ}C$)	Torque ($N m$)	Potencia (W)
0.024562569	0.87	6.07	58	0.02131245	0.129446706
	0.65	5.24	50	0.016076201	0.084174991
	0.50	3.98	38	0.012217913	0.048619475
	0.10	1.47	14	0.002572192	0.00377104

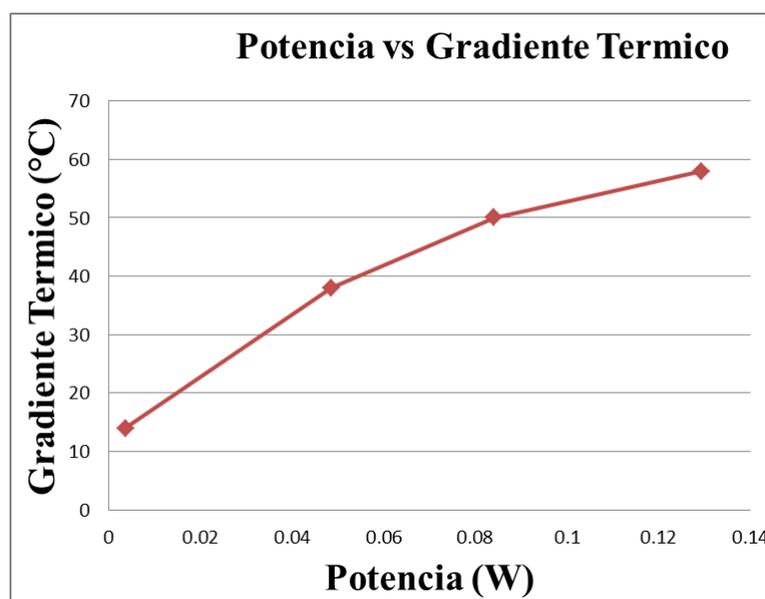


Figura 3.12. Potencia vs gradiente térmico.

Según los resultados obtenidos el motor podría funcionar con un calentador solar comercial que puede alcanzar los 85 °C, por lo que se instala un calentador de este tipo en el banco de pruebas. Para evaluar el comportamiento del motor en el exterior y así conocer los requerimientos en estas condiciones. En la Figura 3.13 se aprecia este arreglo.



Calentador
Solar
Comercial

Motor
y
PLC

Figura 3.133. Banco de Pruebas con Calentador Solar.

Se observó que el gradiente térmico oscilaba por la pérdida de temperatura en el contenedor de agua caliente. Esto se debe al viento, de modo que el sistema deberá estar aislado del ambiente.

Cabe mencionar que se realizó una evaluación del motor, con un gradiente térmico de $68.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con un generador eléctrico a diseño para el motor, midiendo una potencia eficaz de 0.09 W en la salida del generador, el arreglo se muestra en la Figura 3.14.

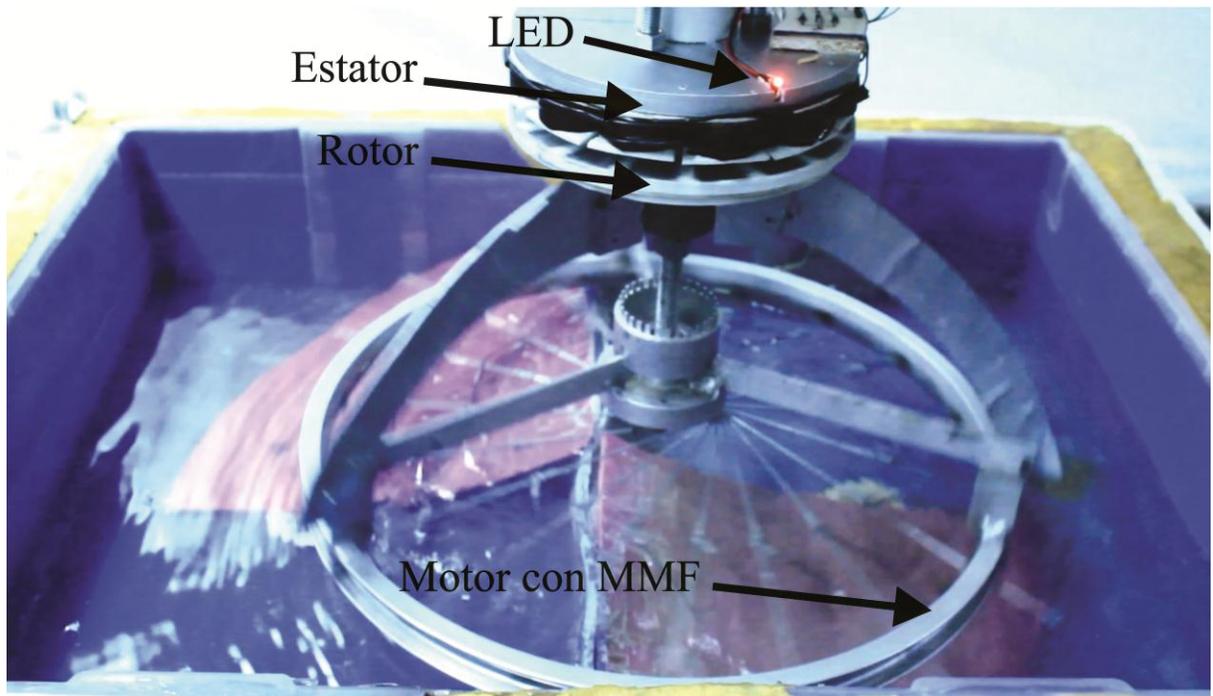


Figura 3.144. Arreglo del motor con MMF y generador eléctrico alimentando un LED.

Como se puede observar, la potencia a la salida del generador es menor a la calculada en la Tabla 3.2, esto se debe, ya que en el análisis no se tomaron en cuenta las fuerzas de fricción como:

La fricción entre los elementos del motor.

La fricción al pasar los alambres de MMF entre el flujo de agua.



Conclusiones

Se logró construir un prototipo de motor térmico que emplea alambre de 0.8 mm de espesor y 18 cm de largo, fabricados con una aleación de NiTi con memoria de forma a un costo razonable.

Los elementos del motor fueron fabricados empleando procesos convencionales como la fundición, el maquinado y la soldadura.

El motor construido es capaz de operar con agua a 60°C, en la fuente caliente, y a 20°C en la fuente fría.

La evaluación del prototipo del motor se realizó empleando un generador eléctrico diseñado específicamente para dicho fin.

Así mismo se realizó una prueba al motor empleando como fuente de calor agua procedente de un calentador solar comercial.

Trabajo a futuro.

Se recomienda continuar con el proyecto iniciado en el presente trabajo, específicamente abordando los siguientes puntos:

- a. Buscar en el mercado alambre de NiTi que transformen a temperaturas más cercanas a la ambiente.
- b. Elaborar el rotor empleando materiales más económicos como zamak o zinalco.
- c. Construir un par de prototipos de motores térmicos con dimensiones mayores que permitan aumentar la cantidad de energía transformada.
- d. Instalar un motor térmico que opere con un calentador solar y/o un colector parabólico cuidando que el motor se encuentre en una zona libre de corrientes de aire.



Bibliografía

1. IEM, 2012.
2. K. Otsuka and C. M. Wayman. Introduction to Shape Memory Materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.1-48. (1998).
3. Otsuka and C. M. Wayman. Mechanism of shape memory effect and superelasticity. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.49-96 (1998).
4. Otsuka and C. M. Wayman. Mechanism of shape memory effect and superelasticity. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.97-116 (1998).
5. M. Olson, G.B. Cohen, P.C. Clapp. On the classification of displacive phase transformations. Proceedings of the international conference on martensitic transformation. ICOMAT 79, Cambridge-Massachusetts, U.S.A., Pp. 1-11. (1979)
6. K. Otsuka and C. M. Wayman. Superelasticity Effects and Stress-Induced Martensitic Transformations in Cu-Al-Ni Alloys. Acta Metallurgica, 24, Pp. 207-226, (1976).
7. Wayman C. M., Duerig T.M., 1990, "An introduction to martensite and shape memory". Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. pp. 3-20.
8. Somerday, R. J. Comstock, JR. And J. A. Wert. Effect of Grain Size on the Observed Pseudoelastic Behavior of a Cu Zn Al Shape Memory Alloy. Metallurgical and Materials Transactions A. 28A. pp. 2335-2341. (1997).
9. D. Rios, S. Belkahala, A. Canales, H. Flores and G. Guenin. Elastic constants measurement of beta Cu-Al-Be Alloys. Scripta Metallurgica et Materialia, 25, 1315-1355, (1991).
10. T. E. Buchheit and J. A. Wert. Modeling the effects of stress state and crystal orientation on the stress-induced transformation of Ni-Ti single crystals. Metallurgical and materials transactions A. 25A. Pp. 2383-2389. (1994).
11. K. Otsuka, H. Sakamoto and K. Shimizu. Successive Stress-Induced Martensitic Transformations and Associated Transformation Pseudoelasticity in Cu-Al-Ni. Acta Metallurgica, 27, 585-601, (1979).
12. J. Cortés Modelación matemática de la transformación martensítica inducida por esfuerzo. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. (2007).



13. A. Ríos “Evaluación de la eficacia térmica de aleaciones con memoria de forma típicas para su uso en distintos dispositivos recuperadores de energía.” Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Aragón. (2013).
14. K. Otsuka, H. Sakamoto and K. Shimizu. Successive Stress-Induced Martensitic Transformation and Associated Transformation Pseudoelasticity in Cu-Al-Ni. *Acta Metallurgica*, 27, 585-601. (1979).
15. Characteristics and Development of Shape-Memory Alloy Heat Engine. Hisaaki Tobushi, Kousuke Date, Kouji Miyamoto. Aichi Institute of Technology 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota 470-0392 Japan.
16. Heat Engine Driven by shape Memory Alloys: Prototyping and Design. Ean H. Schiller 2009, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA
17. "The VT1 Shape Memory Alloy Heat Engine Design" Jilcha Fekadu Wakjira, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
18. Energy conversión in shape memory Alloy heat engine part I J.J. Zhu, N. G. Liang, W. M. Huang and K.M. Liew Centre for Advances for Numerical Engering Simulations, Nanyang Technological, Singapore 639798 LNM Institute os Mechanics, Chinese academu of Sciences, beijing 100080, China.
19. Characteristics and Development of Shape-Memory Alloy Heat Engine. Hisaaki Tobushi, Kousuke Date, Kouji Miyamoto. Aichi Institute of Technology 1247 Yachigusa, Yakusa-cho, Toyota 470-0392 Japan.
20. The Banks Engine, Ridgway Banks, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, California 94720, U.S.A. 1975.
21. Jackson, C.M., et al.: 55 Nitinol--The Alloy with a Memory. NASA SP-5110 (1972).
22. Beer, F., Russell, E., DeWolf, J., Mazurek, D.(2009). *Mecanica de Materiales* (5ed). Mc Graw Hill.

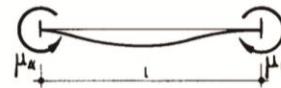


Apéndice 1.

Formulario Vigas.

VIGA EMPOTRADA
DISTINTAS HIPOTESIS DE CARGA

F, q y segmentos, en
valor absoluto.



SOLICITACION	MOMENTOS DE EMPOTRAMIENTO PERFECTO	REACCIONES EN LOS APOYOS	DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES
<p>nº de fuerzas = n-1</p>	$\mu_A = \frac{Fl(n^2-1)}{12n}$ $\mu_B = -\frac{Fl(n^2-1)}{12n}$	$R_A = \frac{n-1}{2}F$ $R_B = \frac{n-1}{2}F$	
<p>nº de fuerzas = n</p>	$\mu_A = \frac{Fl(2n^2+1)}{24n}$ $\mu_B = -\frac{Fl(2n^2+1)}{24n}$	$R_A = \frac{n}{2}F$ $R_B = \frac{n}{2}F$	
	$\mu_A = \frac{ql^2}{12}$ $\mu_B = -\frac{ql^2}{12}$	$R_A = \frac{ql}{2}$ $R_B = \frac{ql}{2}$	
	$\mu_A = \frac{qa^2}{12} \left[6 - \frac{a}{l} (6 - 3 \frac{a}{l}) \right]$ $\mu_B = -\frac{qa^2}{12} \left(4 - 3 \frac{a}{l} \right)$	$R_A = \frac{qa}{2} \left[2 - \frac{a^2}{l^2} (2 - \frac{a}{l}) \right]$ $R_B = \frac{qa}{2} \left(2 - \frac{a}{l} \right)$	



Anexo 1.

Caracterización del Resorte.

Para conocer la fuerza del alambre, según la distancia entre tope y el aro, en cada biela se fabrica un arreglo como el que se muestra en la Figura A.1. Como se puede ver cuando los alambres se accionan al calentarse comprimen un resorte. La distancia ΔL nos permite conocer la fuerza del alambre ya que este resorte se caracterizó.

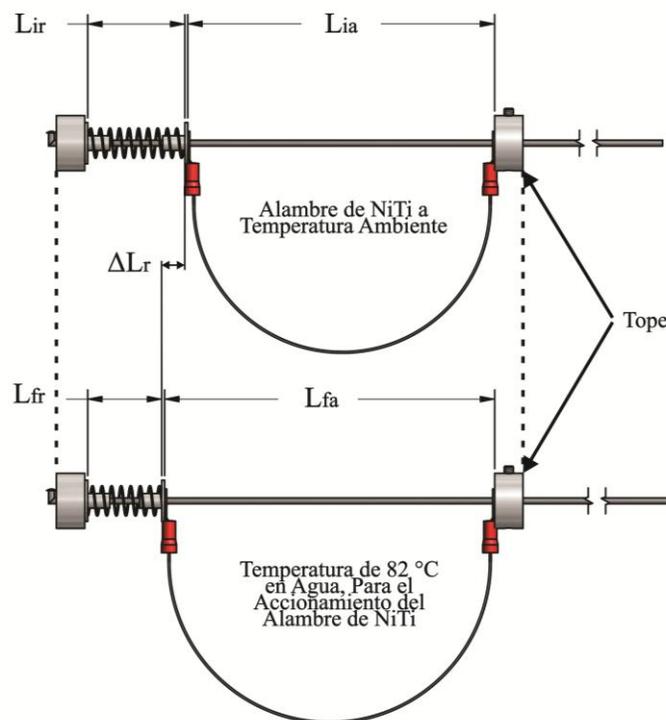


Figura 0.1. Arreglo para la medición de la fuerza del alambre mediante un resorte.

Para caracterizar este resorte se fabricó un arreglo como el que se muestra en la Figura A.2. como se puede ver se tiene una varilla concéntrica al resorte, la cual permite cargar el resorte con diferentes pesos. Mediante la ley de Hooke para los resortes que relaciona la fuerza aplicada con el desplazamiento (ΔL).

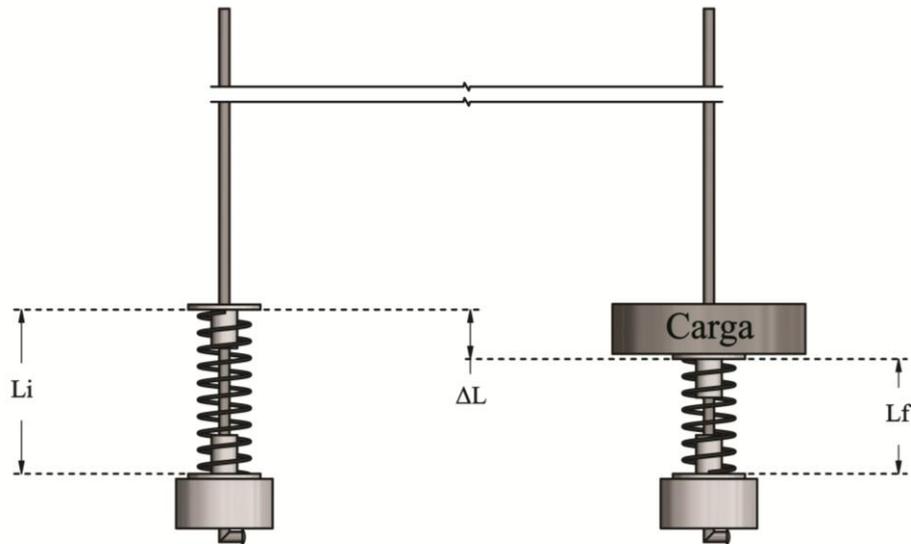


Figura 0.2. Arreglo para la caracterización del resorte.

Para calcular la constante K de este resorte se registró la ΔL para cada incremento de la carga. En la Tabla A.1. se muestra el incremento ΔL según las cargas.

Tabla 0.1. Mediciones para la caracterización del resorte.

Masa (Kg)	Longitud Final del Resorte (m)	ΔL (m)	Fuerza (N)	Pendiente
0	0.033	0	0	159.1356949
0.04	0.029718	0.003282	0.3924	
0.08	0.02794	0.00506	0.7848	
0.12	0.025273	0.007727	1.1772	
0.16	0.022606	0.010394	1.5696	
0.2	0.019939	0.013061	1.962	
0.3	0.014097	0.018903	2.943	

Con estas mediciones se realizó una gráfica Fuerza VS ΔL . Cabe mencionar que la constante K del resorte es la pendiente de la recta que se muestra en la Figura A.3.

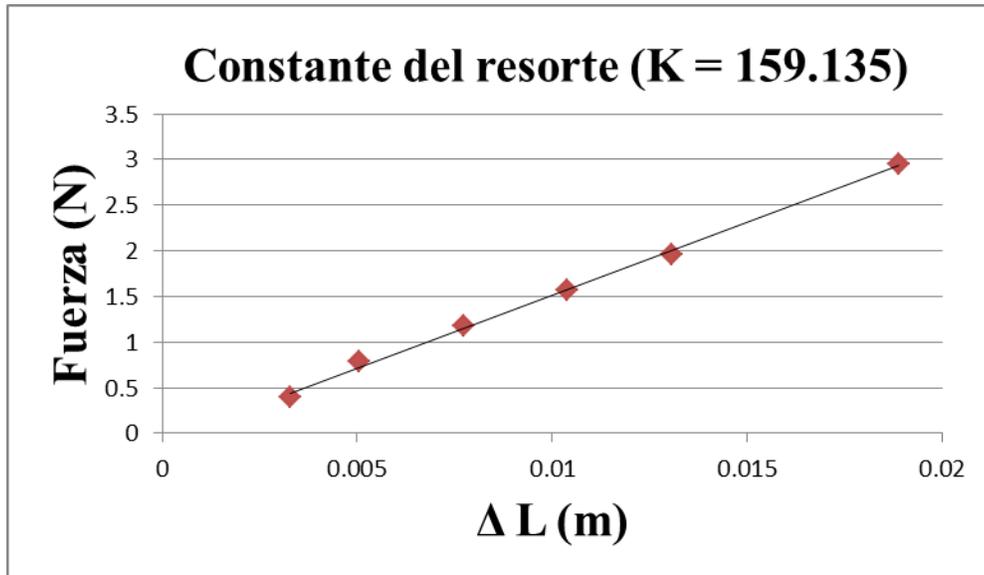
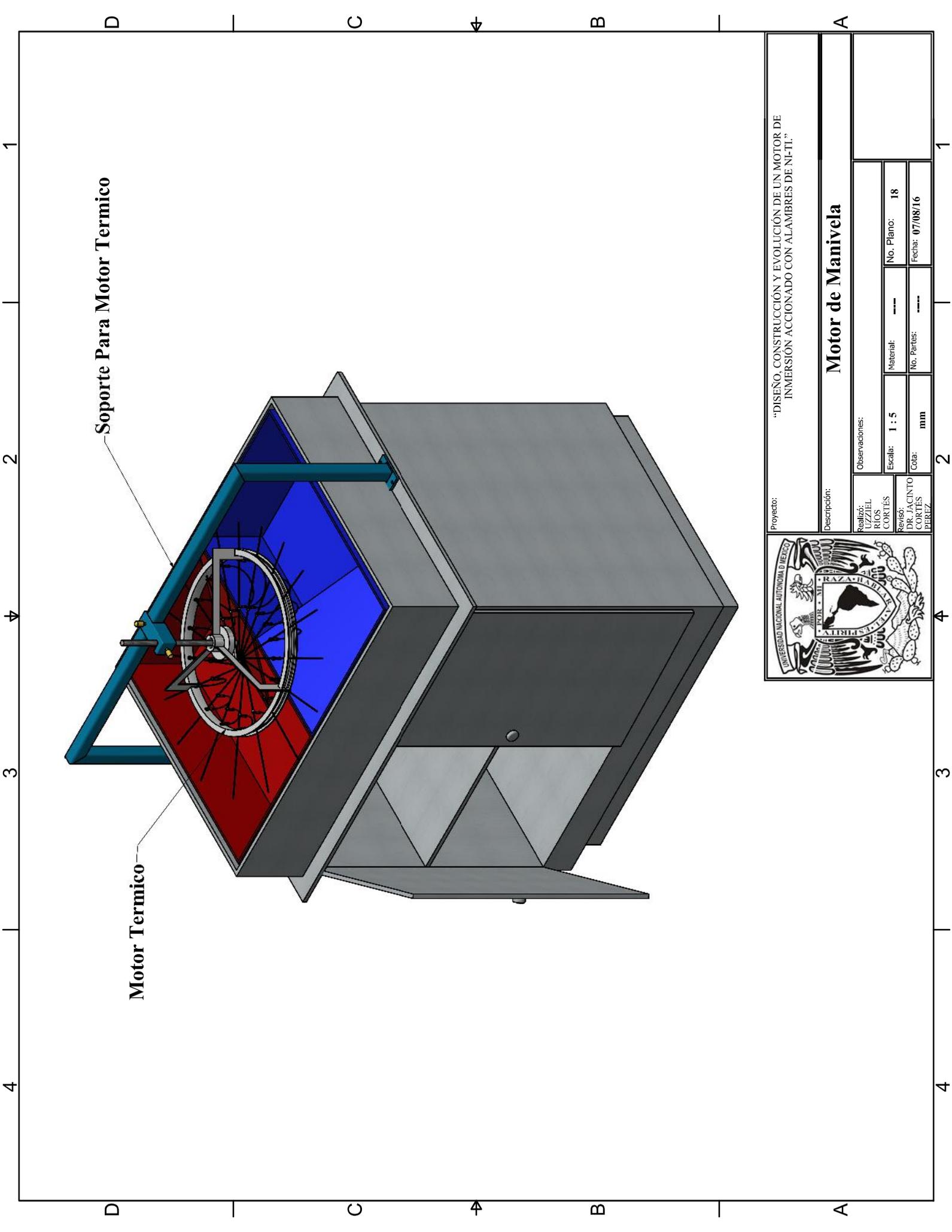


Figura 0.3. Grafica Fuerza vs ΔL .



Anexo 2.

Planos de Fabricación.

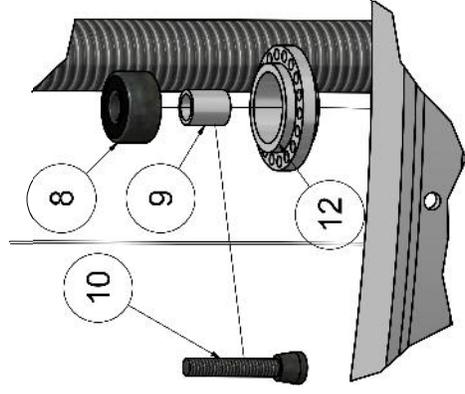
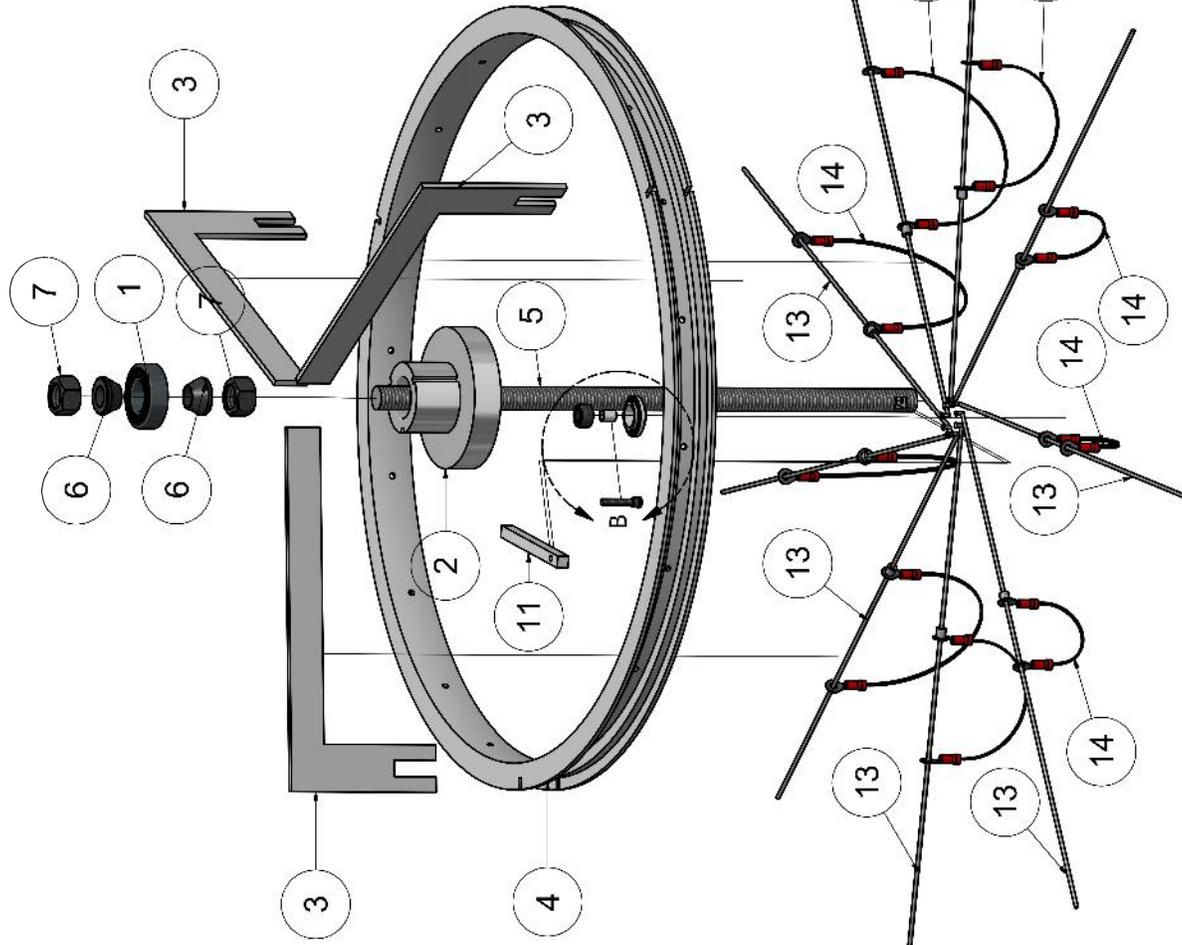


Soporte Para Motor Termico

Motor Termico



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: Motor de Manivela			
Realizó: UZZIEL RIOS CORTES	Observaciones:	Escala: 1 : 5	No. Plano: 18
Revisó: DR. JACINTO CORTES PEREZ	Material: ----	Cota: mm	Fecha: 07/08/16



DETALLE B
ESCALA 1.5 : 1



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

Explosivo Motor Termico

Observaciones:			
Realizó: RÍOS CORTÉS	Escala: 1 / 2	Material: ----	No. Plano: 17
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ	Cota: mm	No. Partes: ----	Fecha: 07/08/16

LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Rodamiento 62300-2RS1 (10X35X17 mm)
2	1	Base Rotor
3	3	Brazos
4	1	Aro
5	1	Eje
6	2	Cono 1/2"
7	2	Tuerca Hexagonal (1/2"-13UNC)
8	1	Rodamiento R188ZZ (6.35X12.7X4.762 mm)
9	1	Separador
10	1	Tornillo Allen Cabeza Cilíndrica (1/8"-40UNC X 3/4")
11	1	Manivela
12	1	Anillo Sujetador de Bielas
13	18	Bielas
14	1	Bucles de Alambre con MMF



Proyecto:

"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

Descripción:

Lista de Piezas

Observaciones:

Realizó:

UZZIEL RIOS CORTÉS

Revisó:

DR. JACINTO CORTÉS PEREZ

Material: ---

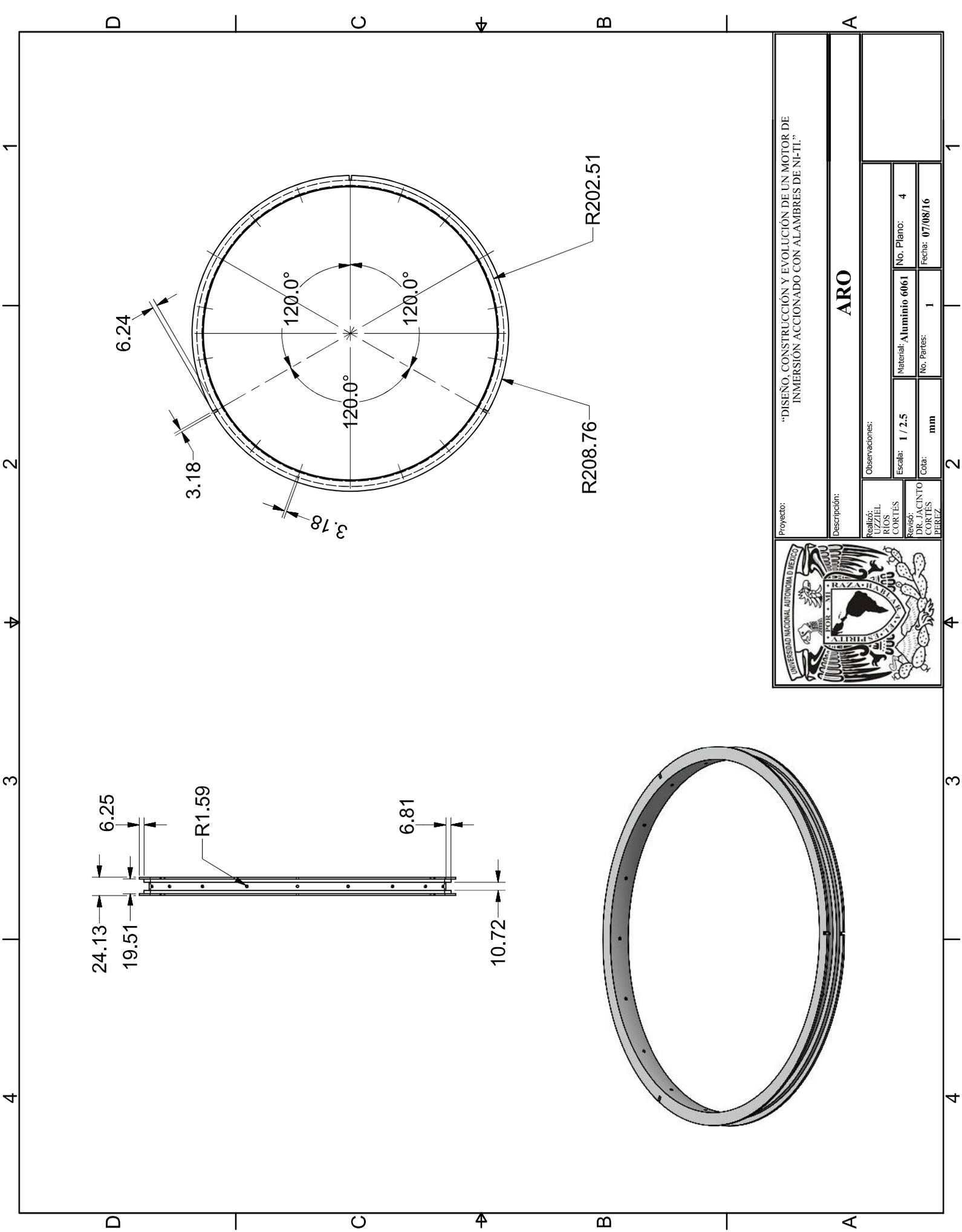
Escala: ---

No. Plano: 16

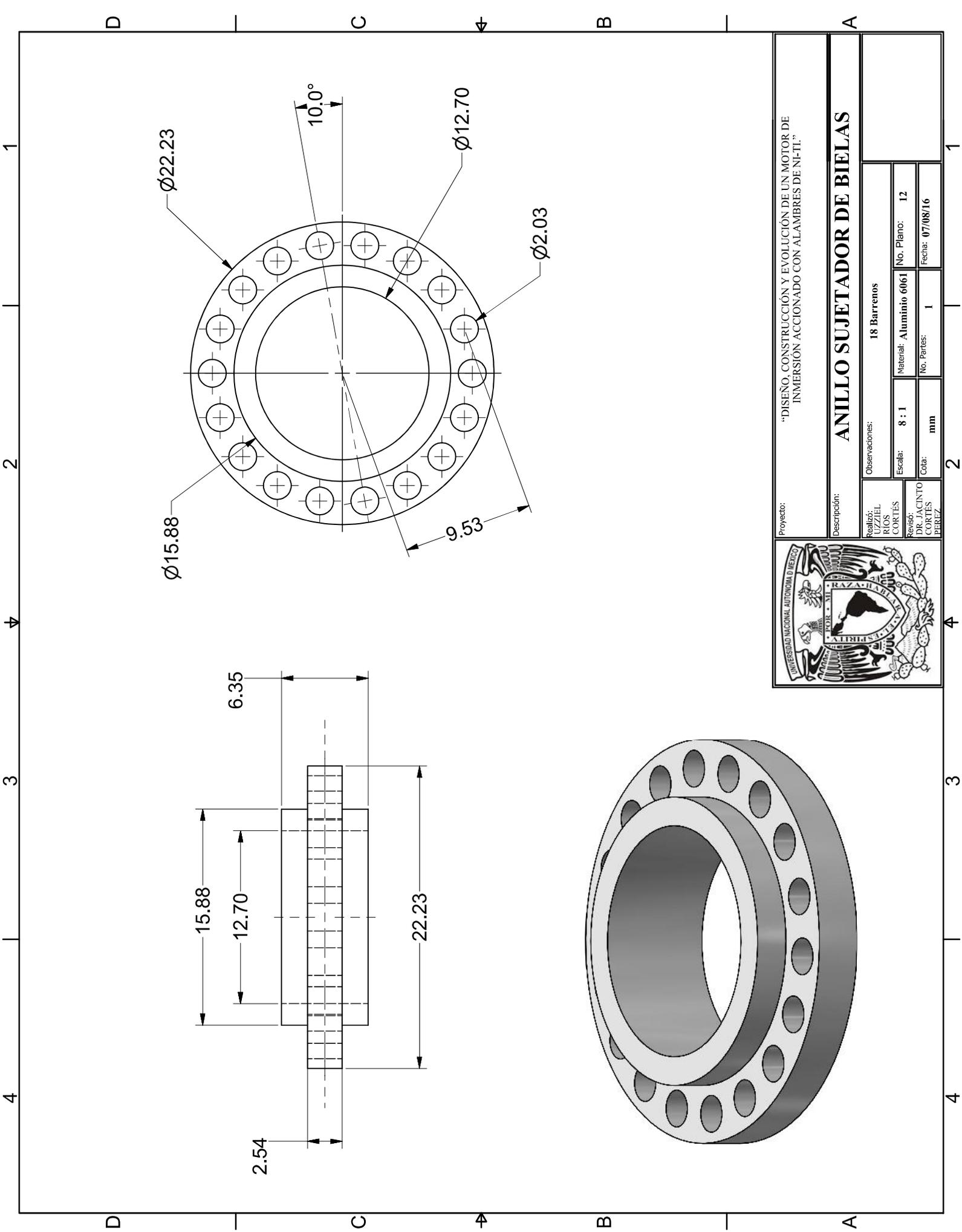
No. Partes: ---

Fecha: 07/08/16

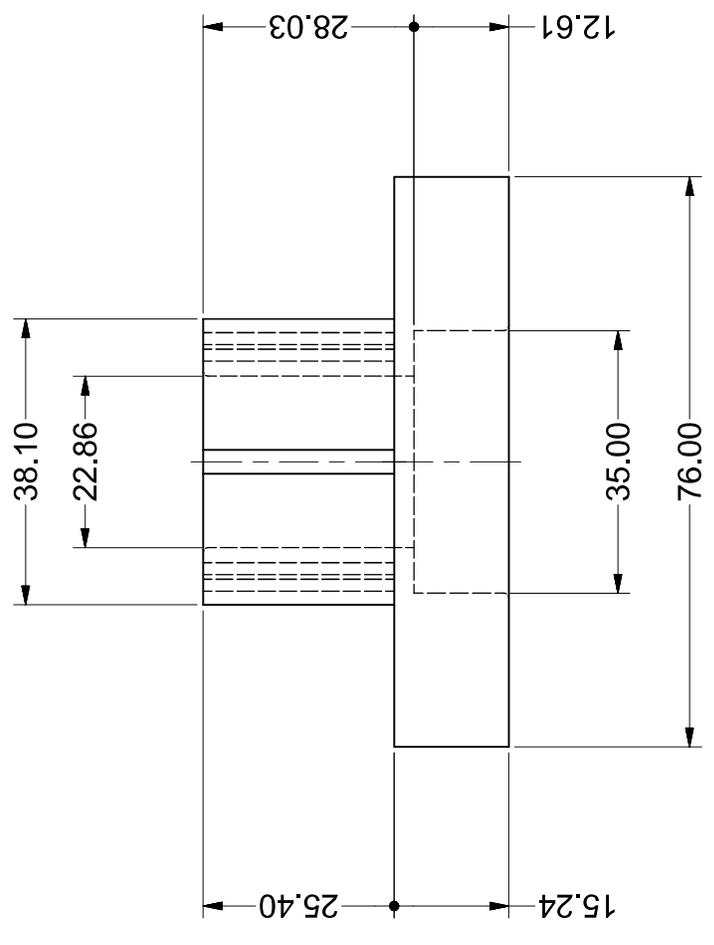
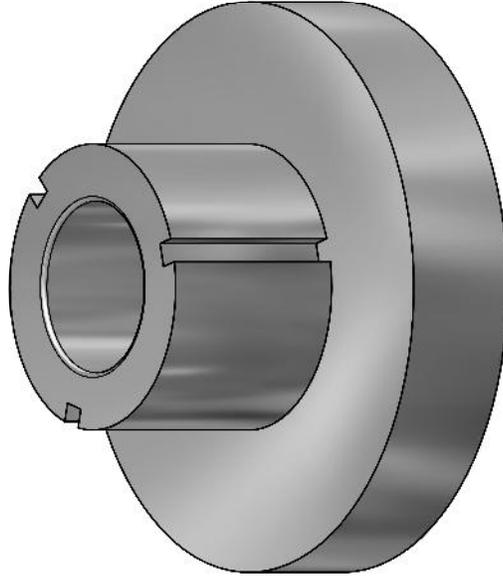
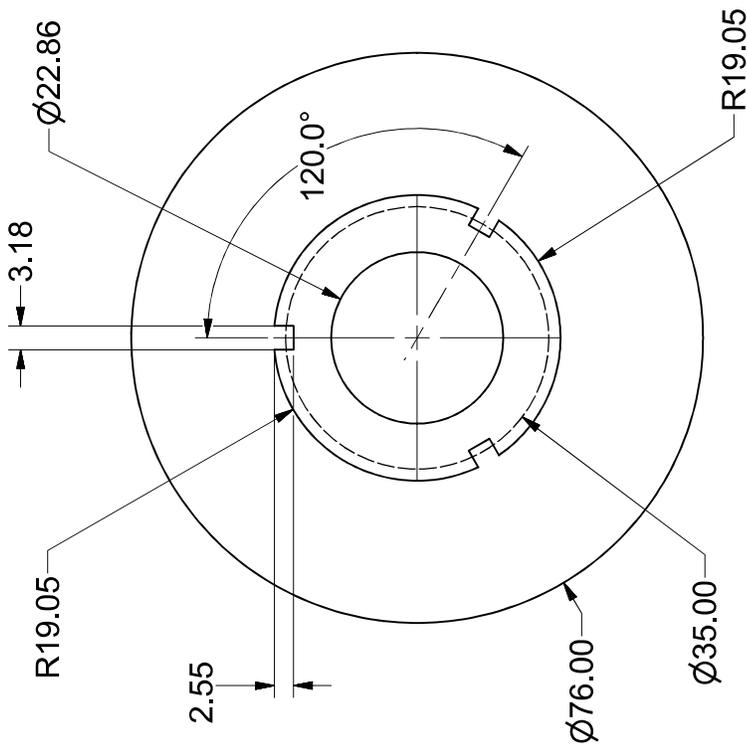
Cota: mm



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: ARO			
Realizó: RIGOS CORTÉS	Observaciones:	Escala: 1 / 2.5	No. Plano: 4
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ		Cota: mm	Fecha: 07/08/16



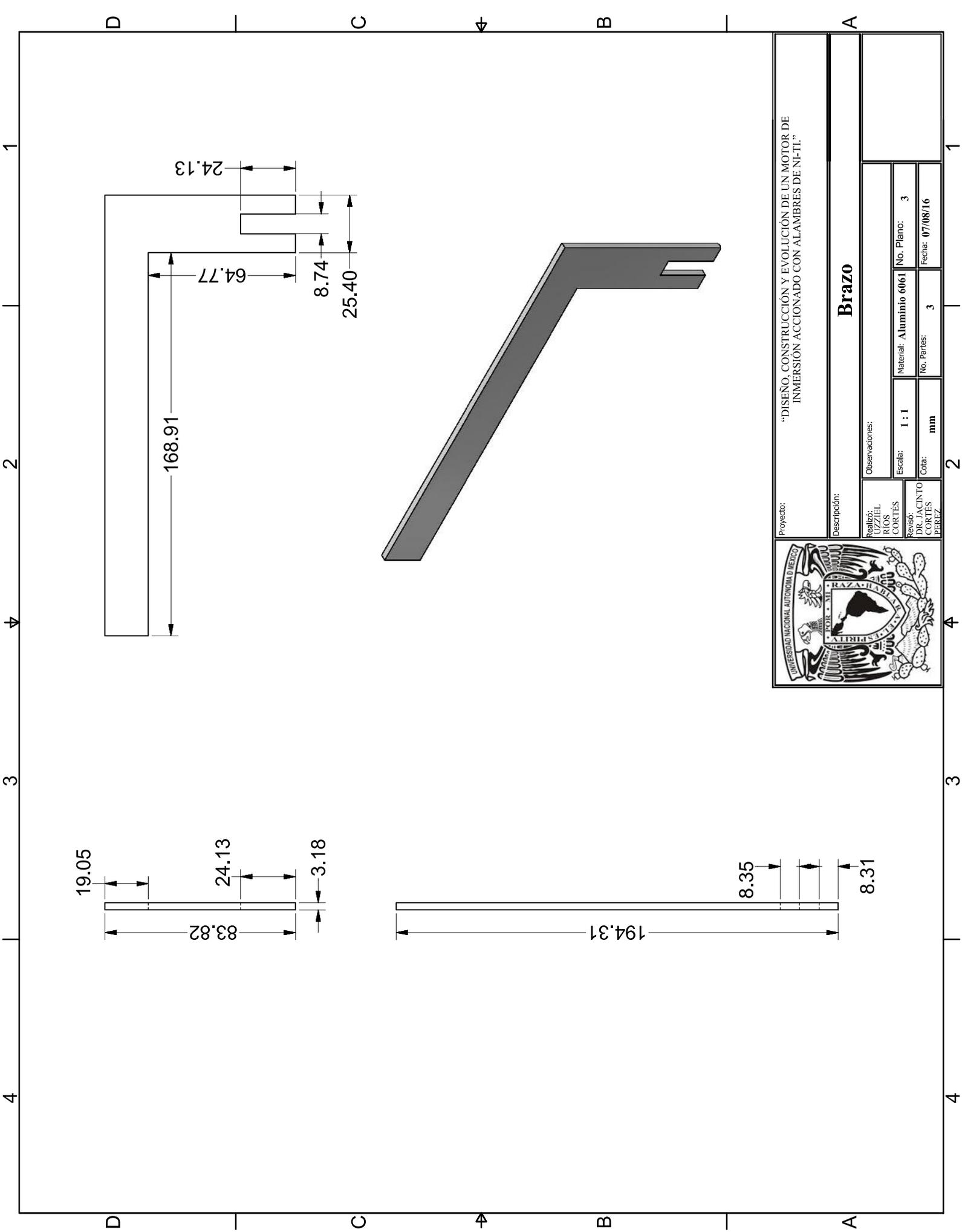
Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: ANILLO SUJETADOR DE BIELAS			
Realizó: UZQUEL RIOS CORTÉS	Observaciones: 18 Barreros		
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ	Escala: 8 : 1	Material: Aluminio 6061	No. Plano: 12
	Cota: mm	No. Partes: 1	Fecha: 07/08/16



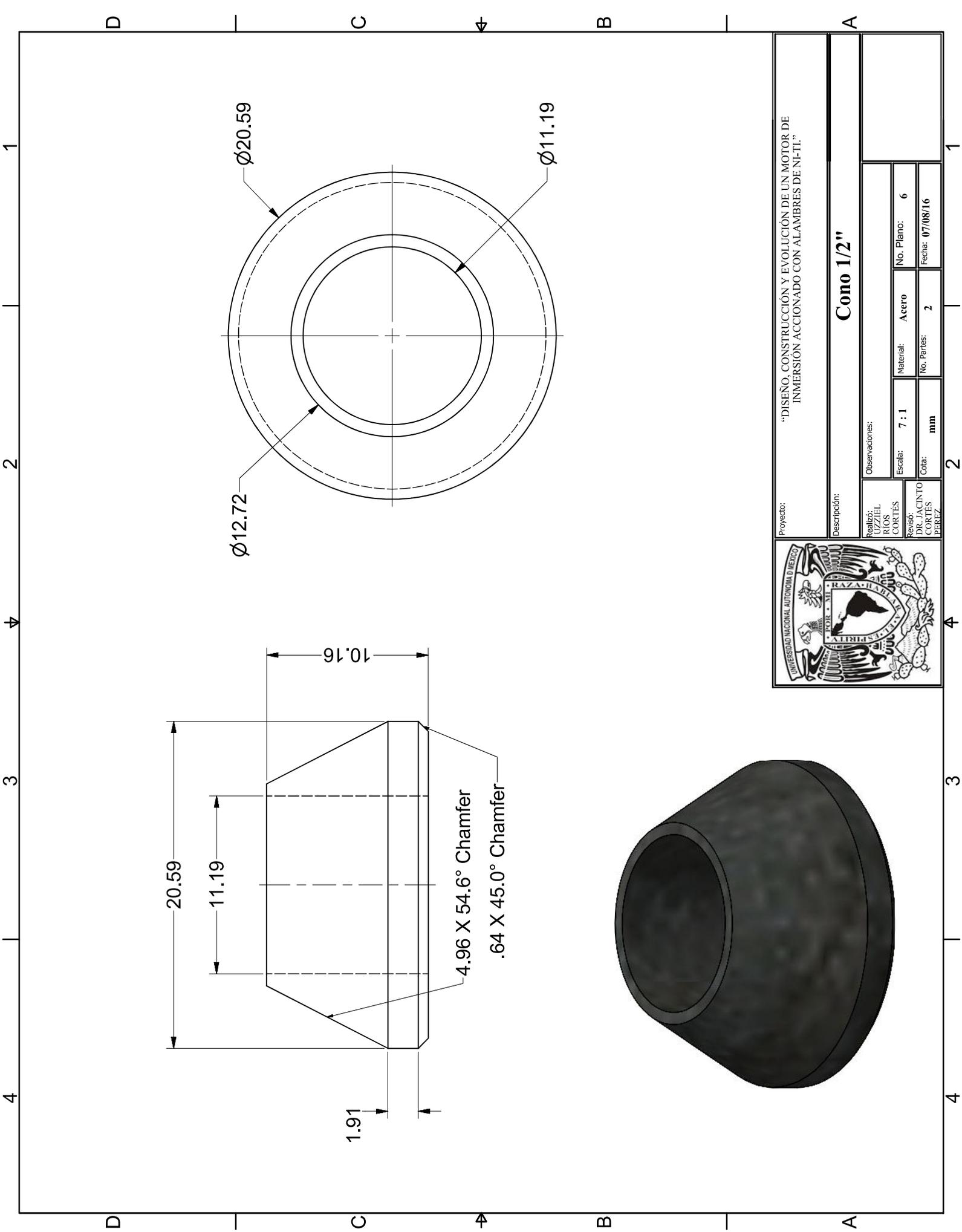
Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

BASE ROTOR

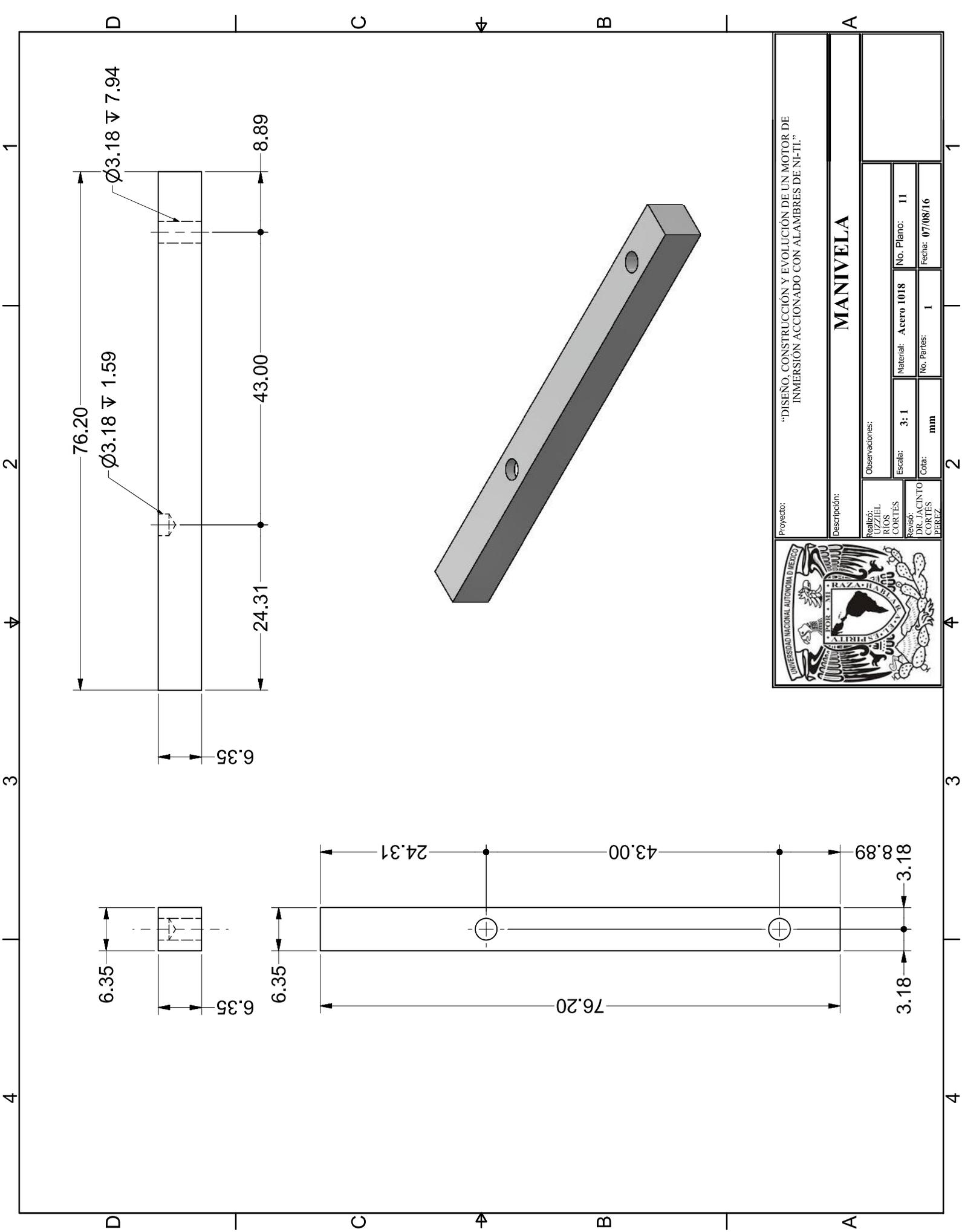
Realizó: UZQUEL RIOS CORTES	Escala: 2 : 1	Material: Aluminio 6061	No. Plano: 2
Revisó: DR. JACINTO CORTES PEREZ	Cota: mm	No. Partes: 1	Fecha: 07/08/16



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: Brazo			
Realizó: UZQUEL RIOS CORTES	Observaciones:		
Revisó: DR. JACINTO CORTES PEREZ	Escala: 1 : 1	Material: Aluminio 6061	No. Plano: 3
	Cota: mm	No. Partes: 3	Fecha: 07/08/16



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: Cono 1/2"			
Realizó: UZQUEL RIOS CORTES	Observaciones:	Escala: 7 : 1	No. Plano: 6
Revisó: DR. JACINTO CORTES PEREZ		Material: Acero	No. Partes: 2
		Cota: mm	Fecha: 07/08/16



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

MANIVELA

Observaciones:

Realizó:
UZZIEL
RIOS
CORTÉS

Revisó:
DR. JACINTO
CORTÉS
PEREZ

Escala: 3:1

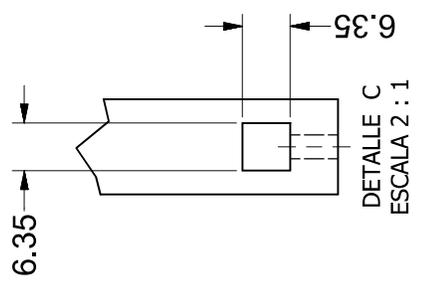
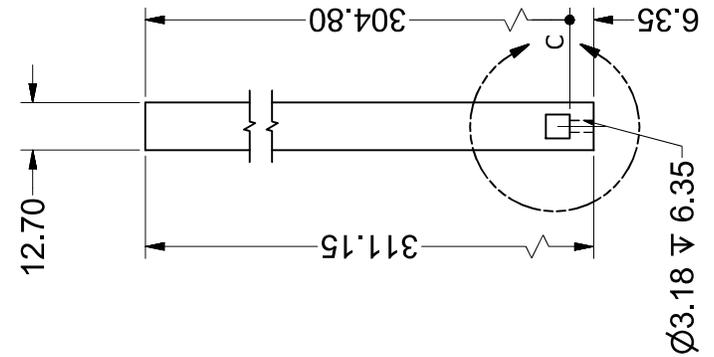
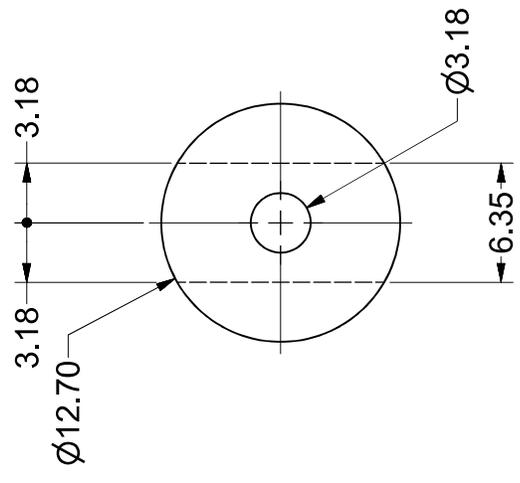
Material: Acero 1018

No. Plano: 11

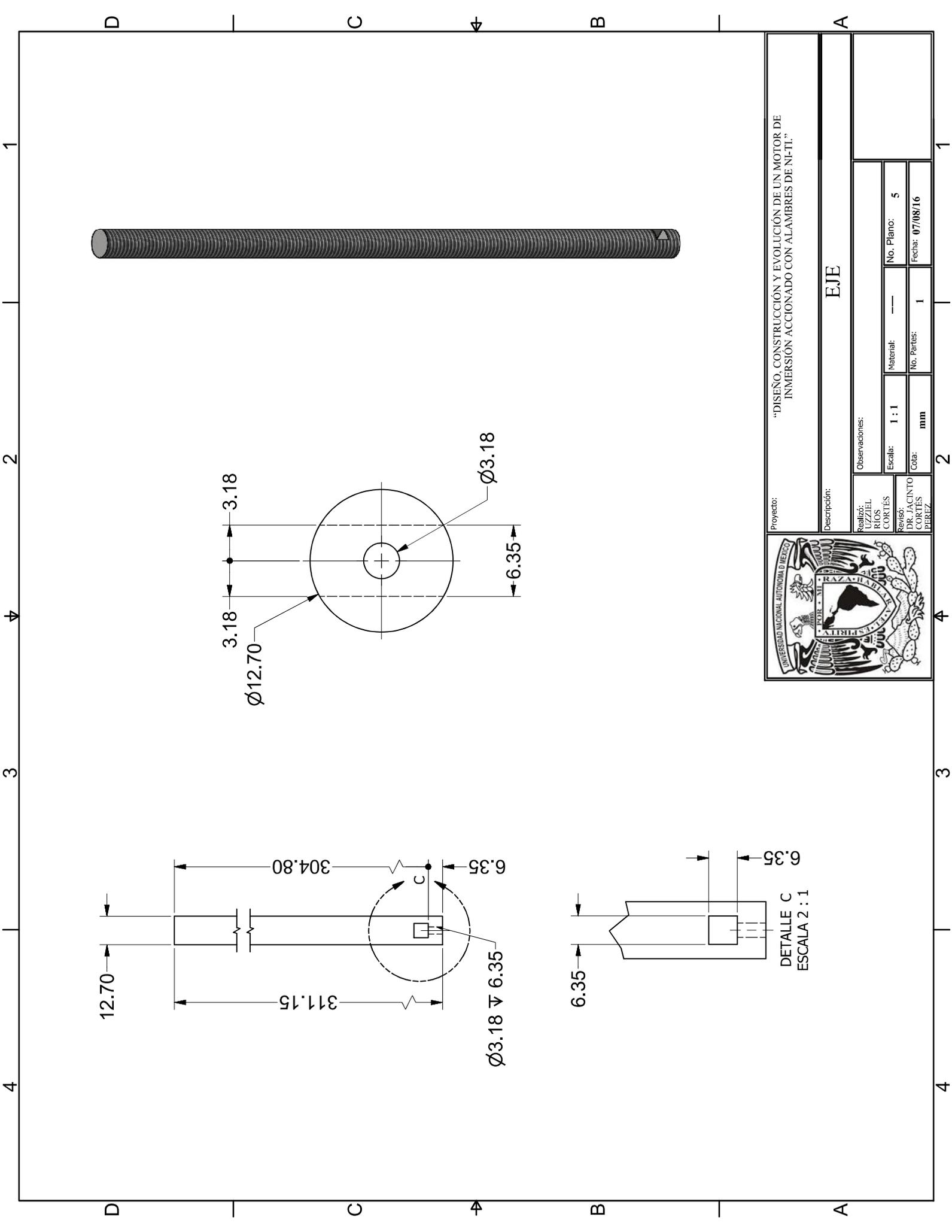
Cota: mm

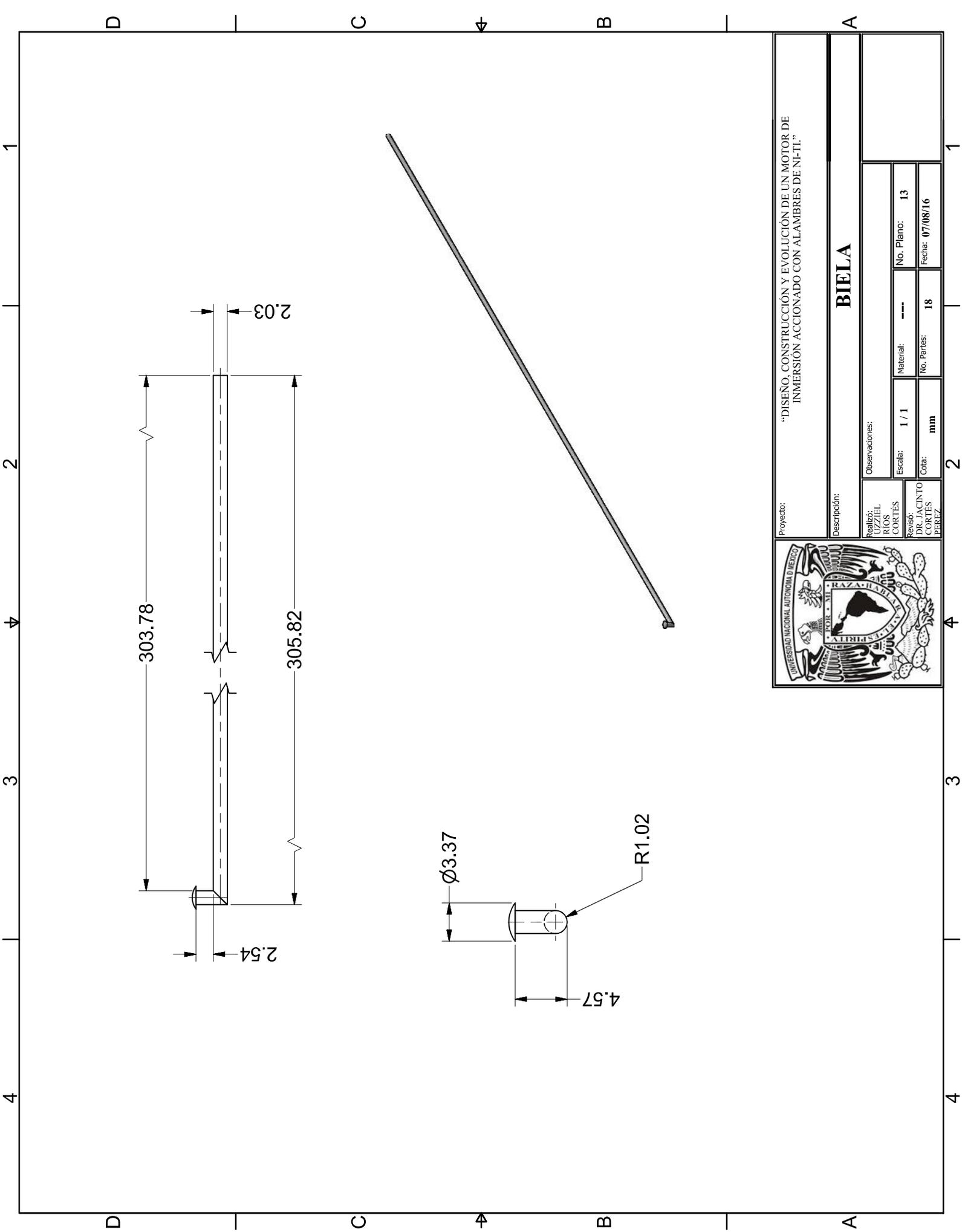
No. Partes: 1

Fecha: 07/08/16



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: EJE			
Realizó: UZZIEL RIOS CORTÉS	Escala: 1 : 1	Material: ---	No. Plano: 5
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Cota: mm	No. Partes: 1	Fecha: 07/08/16

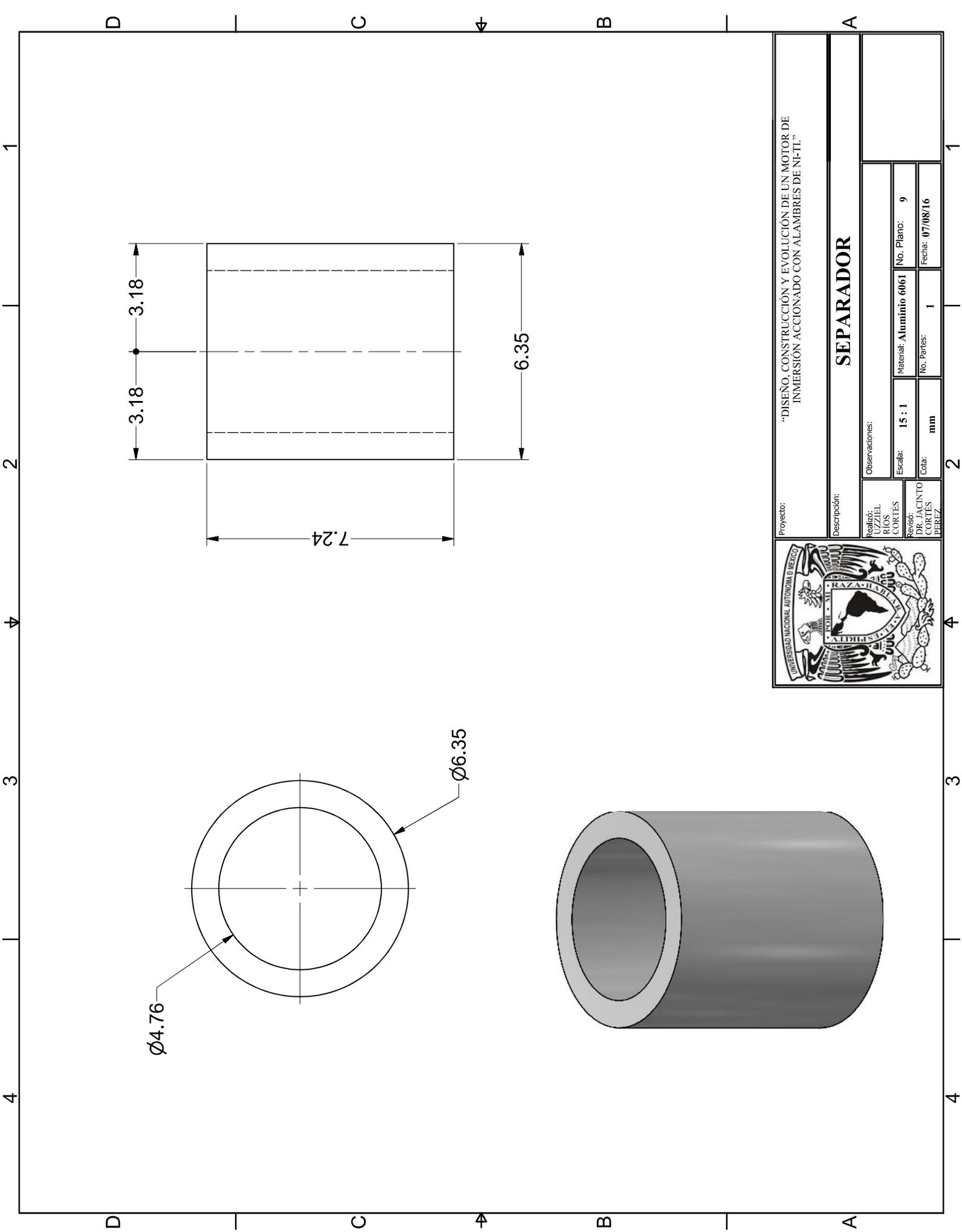




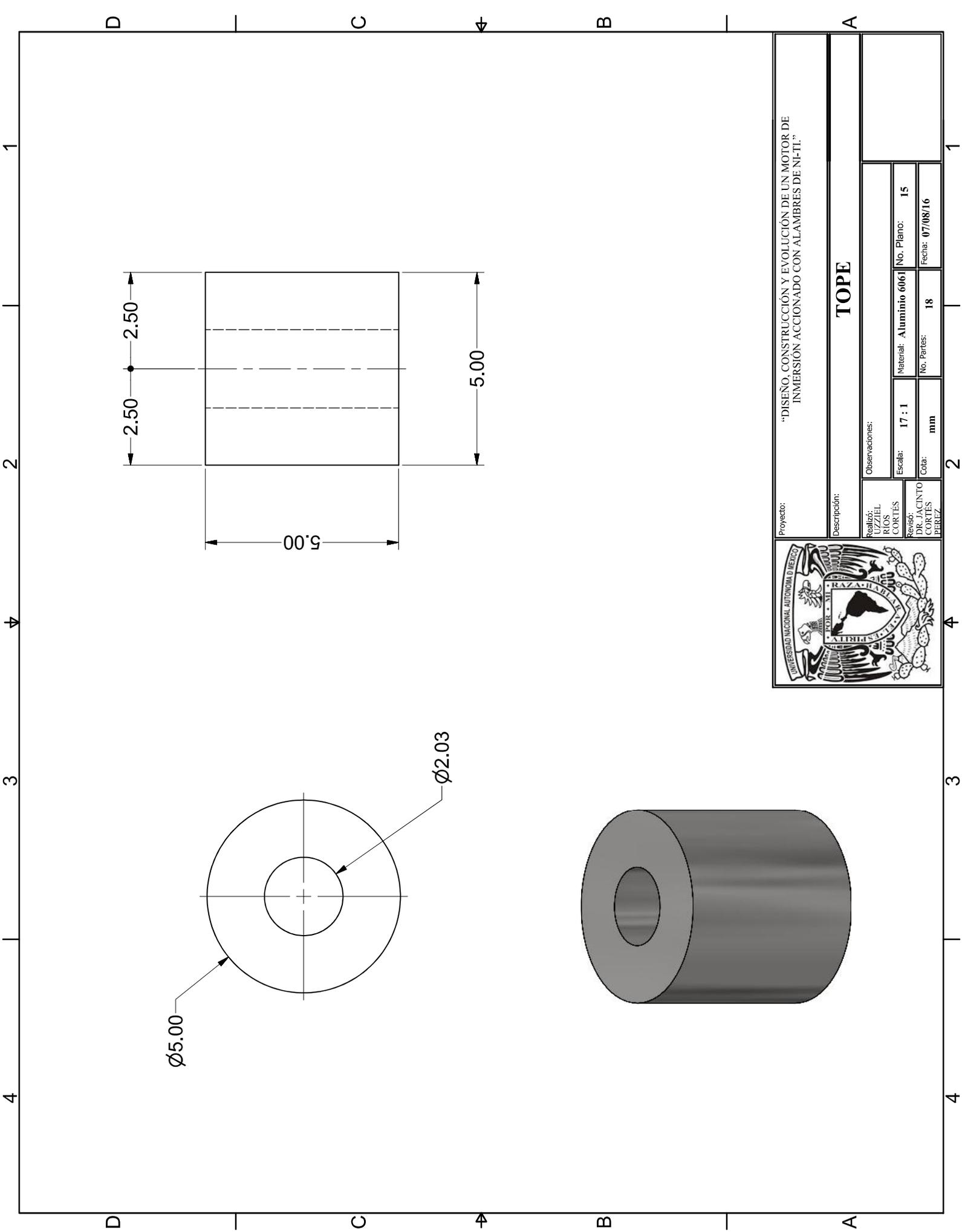
Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

BIELA

Observaciones:			
Realizó: RÍOS CORTÉS	Escala: 1 / 1	Material: ---	No. Plano: 13
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Cota: mm	No. Partes: 18	Fecha: 07/08/16



Proyecto:			
"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción:			
SEPARADOR			
Realizó: RÍOS CORTÉS	Observaciones:		
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ	Escala: 15 : 1	Material: Aluminio 6061	No. Plano: 9
	Cota: mm	No. Partes: 1	Fecha: 07/08/16



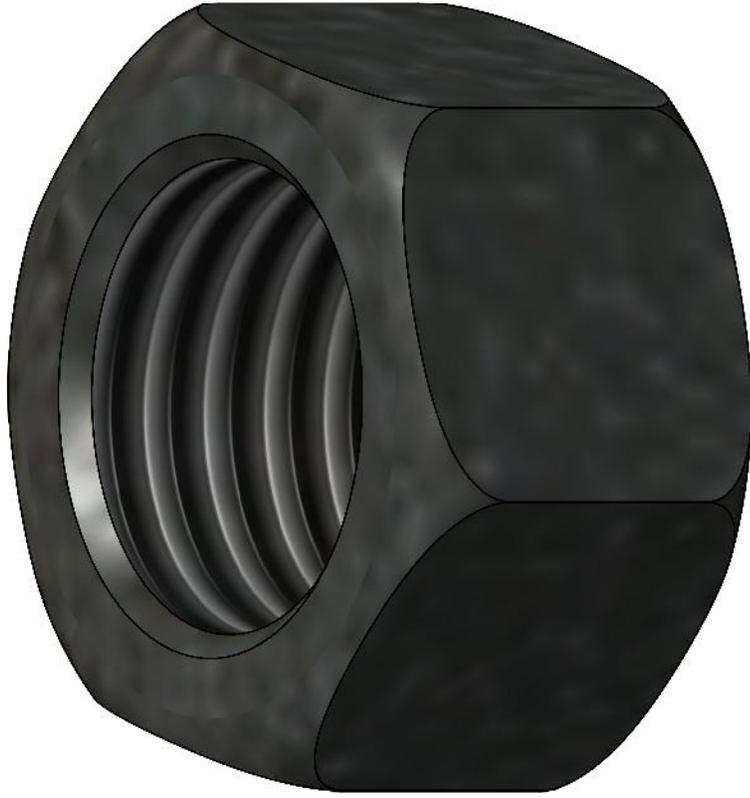
Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: TOPE			
Realizó: UZQUEL RIOS CORTÉS	Observaciones:		
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Escala: 17 : 1	Material: Aluminio 6061	No. Plano: 15
	Cota: mm	No. Partes: 18	Fecha: 07/08/16

Tornillo Allen 1/8" Cabeza Cilíndrica



Proyecto:		"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."	
Descripción:		Tornillo Allen 1/8" Cabeza Cilíndrica	
Realizó: RÍOS CORTÉS	Observaciones:	Tornillo Allen Cabeza Cilíndrica (1/8"-40UNC X 3/4")	
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Escala:	10 : 1	Material: —
	No. Partes:	1	No. Plano: 10
	Cota:	mm	Fecha: 07/08/16

Tuerca Hexagonal 1/2"



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: Tuerca Hexagonal 1/2"			
Realizó: UZZIEL RIOS CORTÉS	Observaciones: Tuerca Hexagonal (1/2"-13UNC)	Material: ---	No. Plano: 7
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS	Escala: 10 : 1	No. Partes: 1	Fecha: 07/08/16
	Cota: mm		

Rodamiento 62300-2RS1

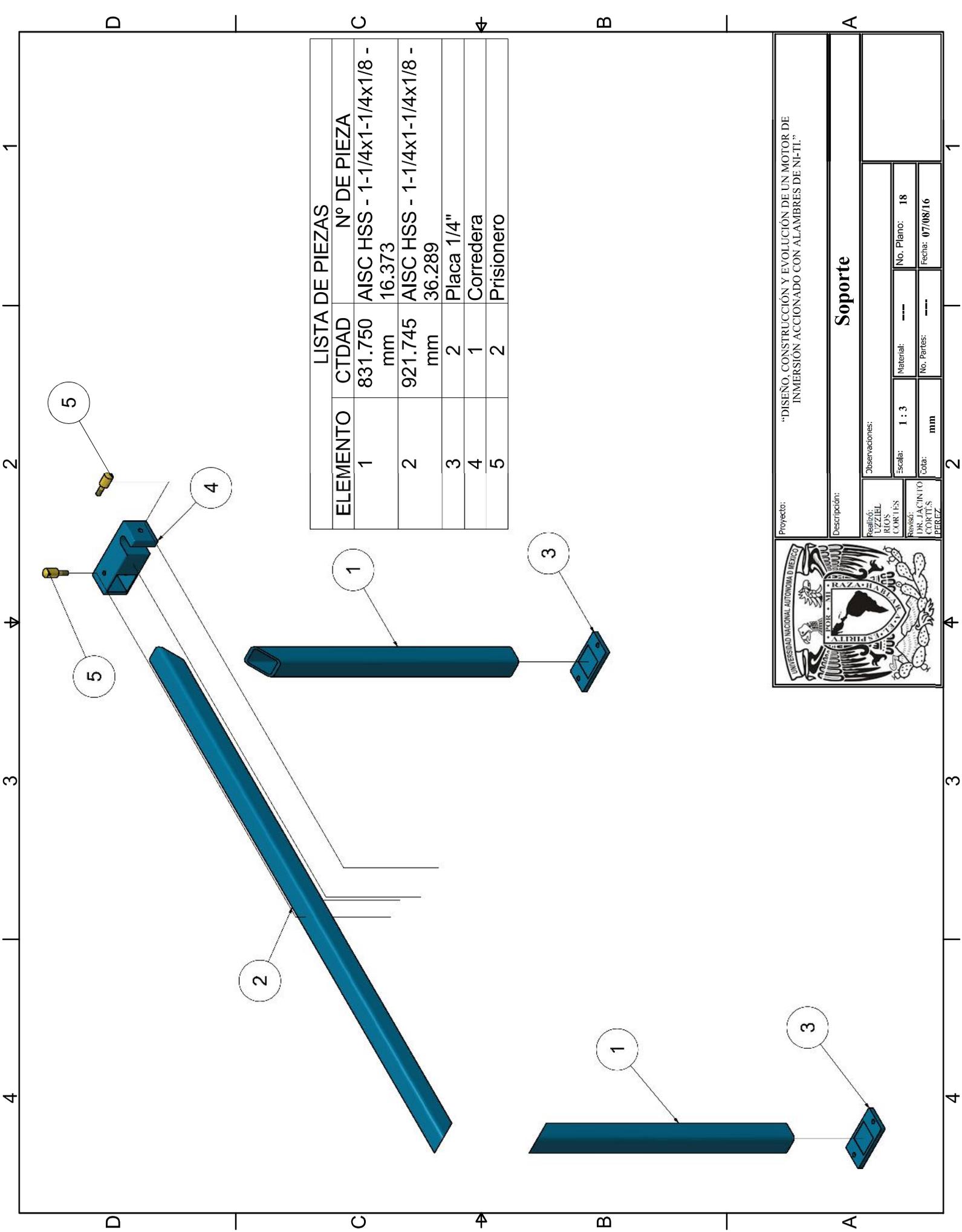


Proyecto:		"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción:		Rodamiento 62300-2RS1			
Realizó: RÍOS CORTÉS	Observaciones:	Rodamiento 62300-2RS1 (10X35X17mm)			
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Escala:	6 : 1	Material:	—	No. Plano: 1
	Cota:	mm	No. Partes:	1	Fecha: 07/08/16

Rodamiento R188ZZ



Proyecto:		"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."				
Descripción:		Rodamiento R188ZZ				
Realizó: RÍOS CORTÉS	Observaciones:	Rodamiento R188ZZ (6.35X12.7X4.762mm)				
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ	Escala:	14 : 1	Material:	----	No. Plano:	8
	Cota:	mm	No. Partes:	1	Fecha:	07/08/16



LISTA DE PIEZAS

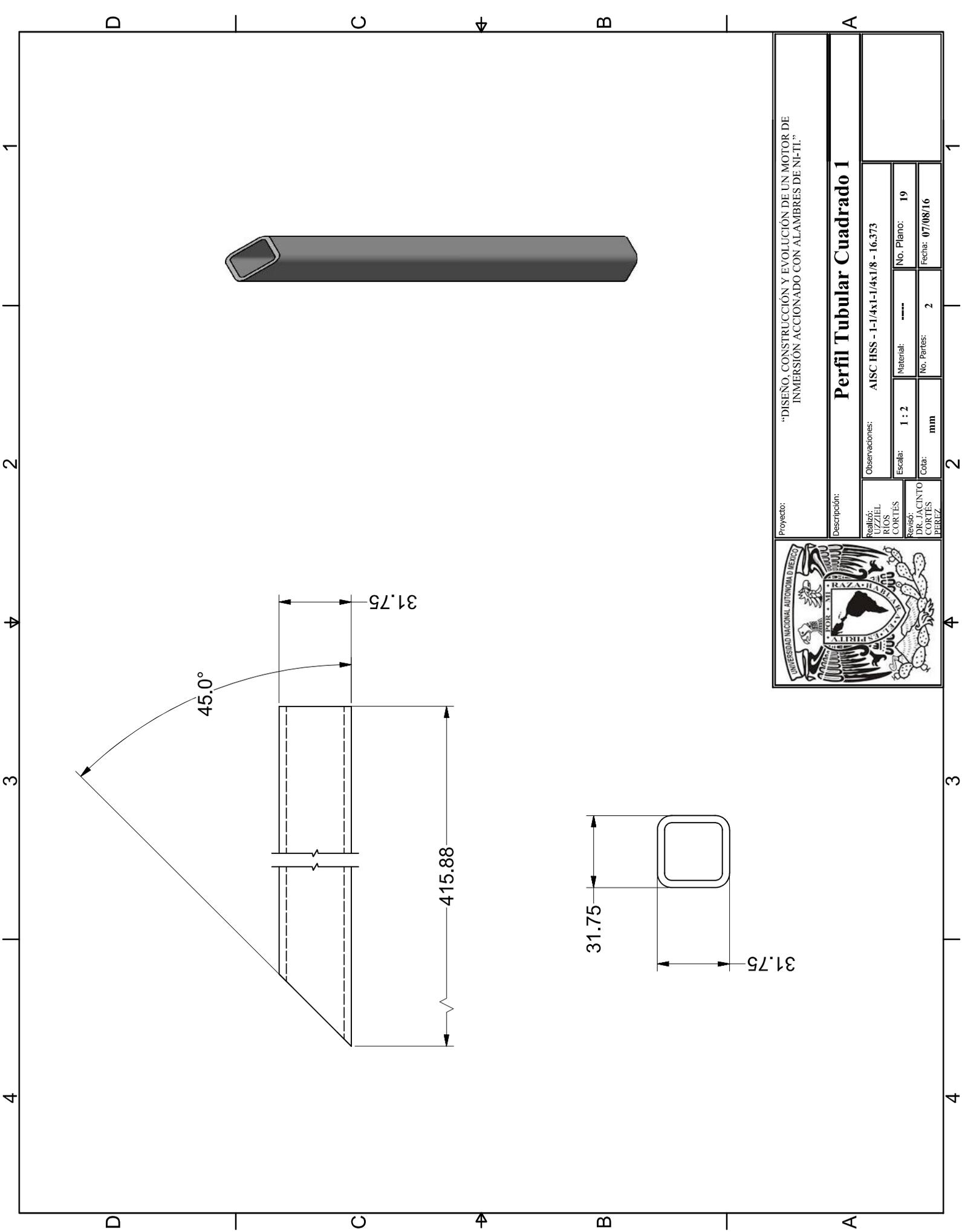
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	831.750	AISC HSS - 1-1/4x1-1/4x1/8 - mm
2	921.745	AISC HSS - 1-1/4x1-1/4x1/8 - mm
3	2	Placa 1/4"
4	1	Corredera
5	2	Prisionero



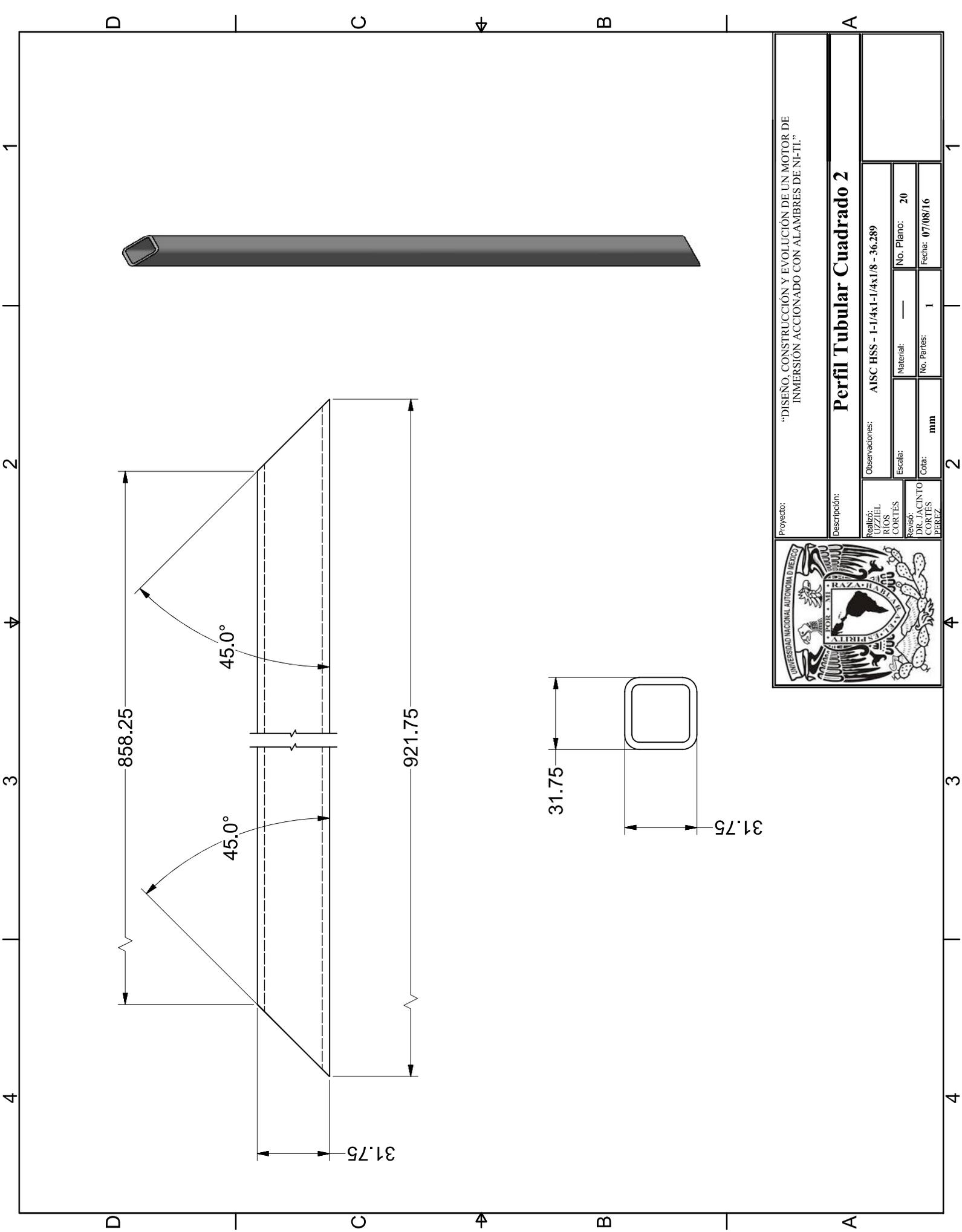
Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

Soporte

Descripción:		Observaciones:	
Realizó: LUZZIEL RIOS CORTEZ	Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Escala: 1 : 3	No. Plano: 18
Cota: mm		No. Partes: ----	Fecha: 07/08/16



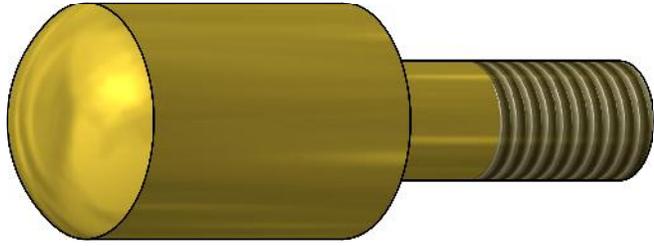
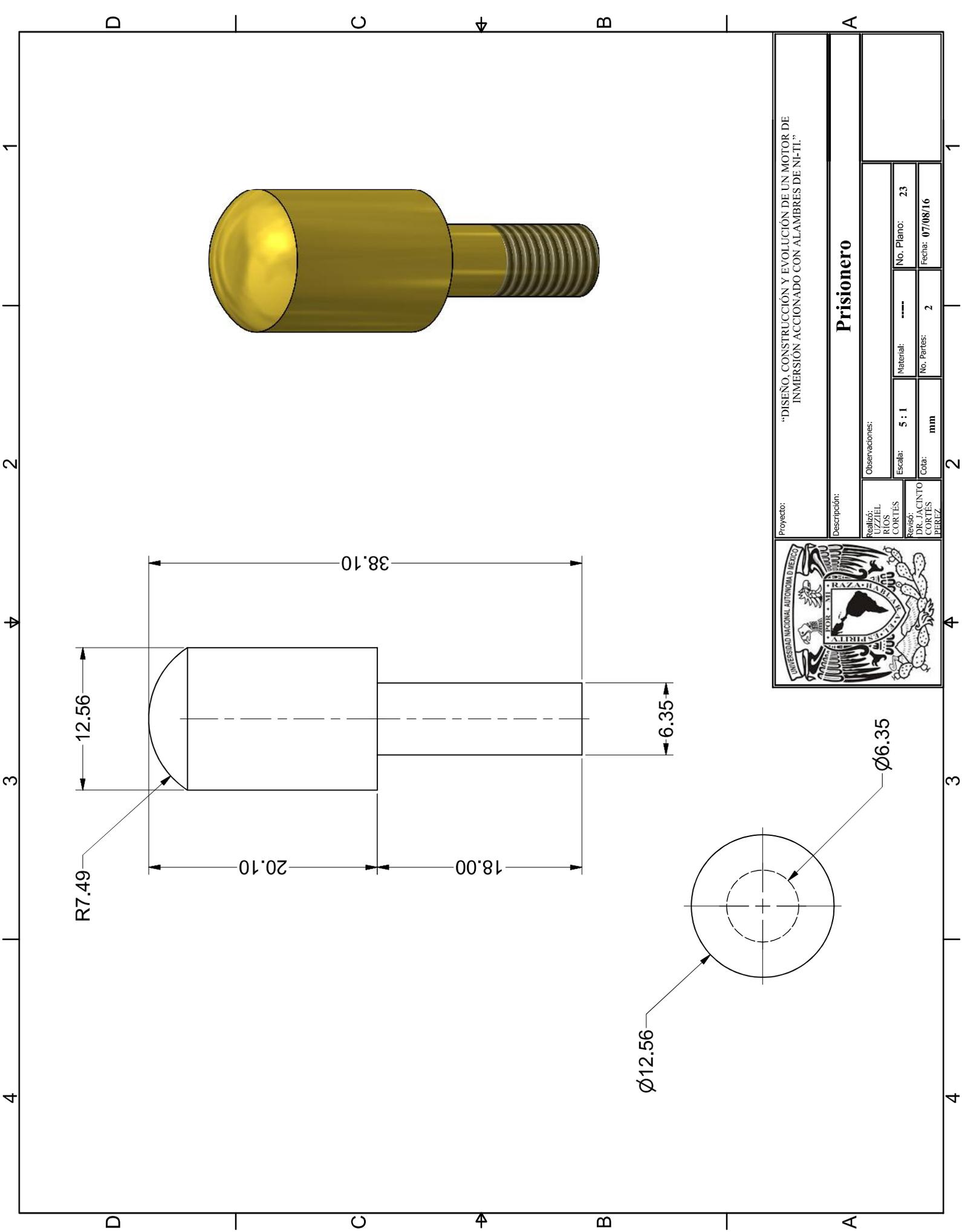
Proyecto:				"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción:				Perfil Tubular Cuadrado 1			
Realizó:	Observaciones:	Escala:		Material:		No. Plano:	
UZQUEL RIOS CORTES	AISC HSS - 1-1/4x1-1/4x1/8 - 16.373	1 : 2		-----		19	
Revisó:	Cota:	No. Partes:		Fecha:			
DR. JACINTO CORTES PEREZ	mm	2		07/08/16			



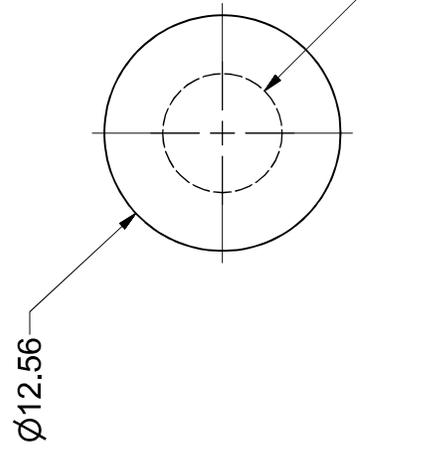
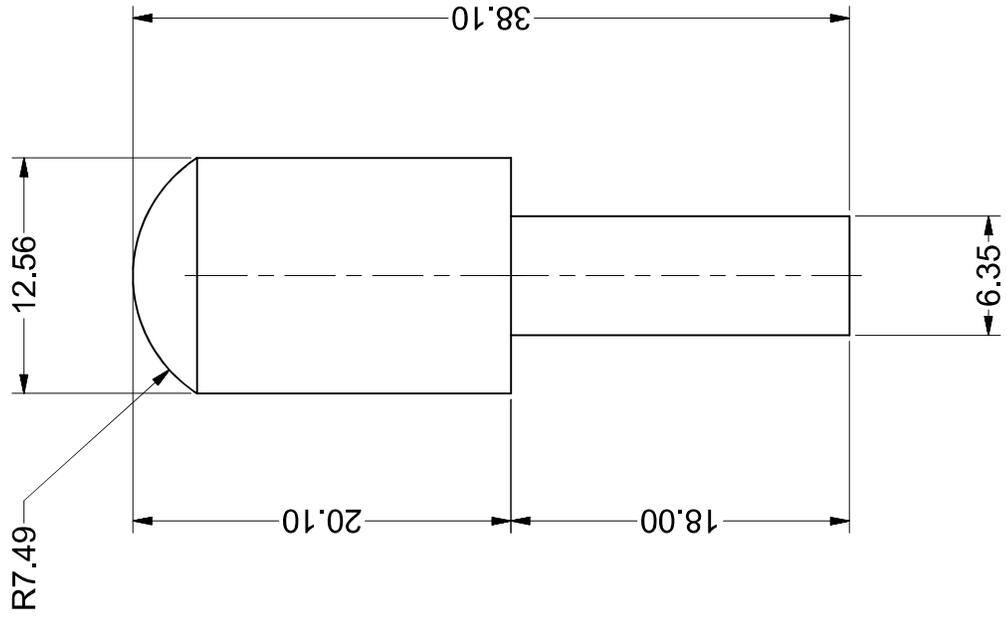
Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."

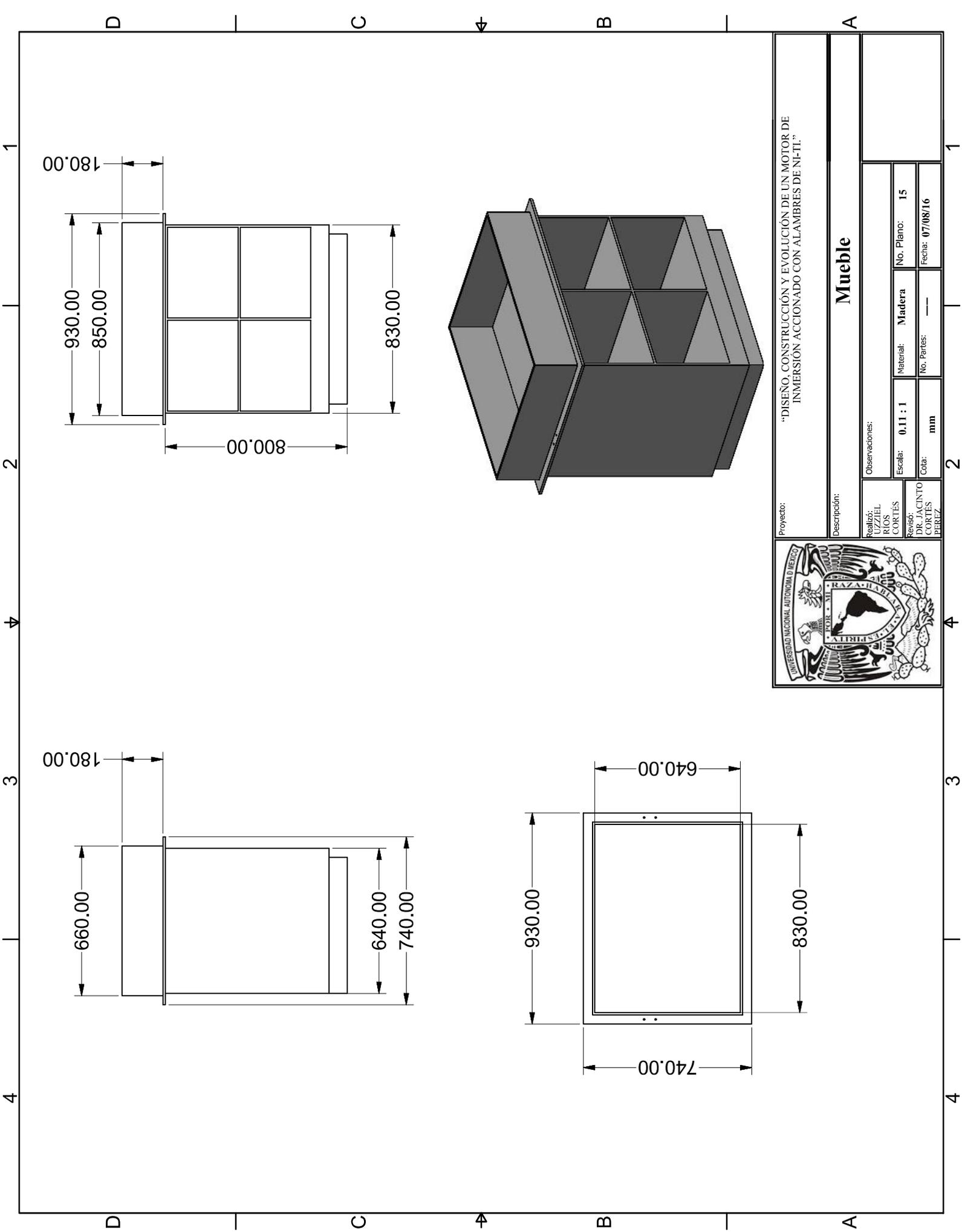
Perfil Tubular Cuadrado 2

Realizó: UZQUEL RIOS CORTÉS	Observaciones: AISC HSS - 1-1/4x1-1/4x1/8 - 36.289	Material: —	No. Plano: 20
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Escala: —	No. Partes: 1	Fecha: 07/08/16
	Cota: mm		



Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción: Prisionero			
Realizó: UZQUEL RIOS CORTES	Observaciones:	Material: 5 : 1	No. Plano: 23
Revisó: DR. JACINTO CORTES PEREZ		Escala: 5 : 1	Fecha: 07/08/16
		Cota: mm	No. Partes: 2





Proyecto: "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN MOTOR DE INMERSIÓN ACCIONADO CON ALAMBRES DE NI-TI."			
Descripción:			
Realizó: UZZIEL RIOS CORTÉS	Escala: 0.11 : 1	Material: Madera	No. Plano: 15
Revisó: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ	Cota: mm	No. Partes: ---	Fecha: 07/08/16
Mueble			