



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

“CAMPUS ARAGÓN”

“DISEÑO DE DISPOSITIVOS PARA GENERAR
MOVIMIENTO A PARTIR DEL
COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO DE LOS
MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A
JESÚS ALEJANDRO RÍOS CORTÉS

ASESOR: DR. JACINTO CORTÉS PEREZ



SAN JUAN DE ARAGÓN, EDO DE MEX. 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Jurado asignado:

Presidente: Dr. Daniel Aldama Avalos.

Vocal: M. en I. Alberto Reyes Solís.

Secretario: Ing. Arturo Ocampo Álvarez.

Suplente: Dr. Jacinto Cortés Pérez.

Suplente: M. en I. José Antonio Souza Jiménez.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Estudios Superiores “Aragón”.
San Juan de Aragón, Edo de Mex. 2009.

Dedico este trabajo de tesis a las personas que más admiro y son un ejemplo a seguir, mis padres:

Francisca Cortés Aragón.

Alejandro Ríos García.

Gracias por todo el apoyo a lo largo de mi formación académica y por su infinita paciencia durante la realización de este trabajo.

Agradecimientos:

A mi tío Jacobo Ríos García:

Por el apoyo incondicional durante la carrera y por regalarme tantas ideas para mis proyectos escolares.

A mis hermanos:

Eric y Uzziel por cubrirme en el trabajo cuando mis deberes escolares me impedían asistir.

A Elsa Mireya:

Por tu disposición a ayudarme siempre, y especialmente por tu comprensión. Sé que tenemos las mismas metas.

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

Arturo, Paris, Carlos, Rodrigo, Arubi, Guillermo, Nestor por hacer siempre ameno el ambiente de trabajo.

Al Dr. Jacinto Cortés Pérez por dirigir esta tesis, por el apoyo que me brindo y por inculcar siempre el deseo de superación en sus alumnos.

A mis sinodales:

M. en I. Alberto Reyes Solís, M. en I. José Antonio Sousa Jiménez,

Dr. Daniel Aldama Aualos, Ing. Arturo Ocampo Álvarez por sus valiosos comentarios y sugerencias para esta tesis.

A COMECYT-CONACYT.

Por el apoyo económico brindado a través del programa "Becas para tesis de licenciatura" y por impulsar el desarrollo de la ciencia y tecnología en nuestro país.

A DGAPA- PAPIIME

Por el apoyo brindado para la construcción de los prototipos a través del proyecto PE 102505.

A la Secretaría de Educación Pública.

Por dirigir parte de los impuestos de la sociedad y destinarlos a la educación en nuestro país, y por el apoyo económico para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón.

Índice

Introducción	i
--------------	---

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS GENERALES DE LA MEMORIA DE FORMA

1.1.-Generalidades de los MMF	1
1.1.1.- Transformación martensítica (TM)	1
1.2.-Comportamiento Mecánico de los MMF	8
1.2.1.-Anisotropía mecánica de los MMF	12
1.3.- Modelos propuestos	12
1.3.1-Modelo ingenieriles	14

CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE MOVIMIENTOS

2.1.- Mecanismos	18
2.1.1.- Conceptos en la teoría de maquinas y mecanismos	18
2.1.2 Esquematización	21
2.1.3. Movilidad de un mecanismo	23
2.2.- Mecanismos planos	25
2.3.- Análisis cinemático de mecanismos	26
2.3.1.-Ramas de la cinemática de mecanismos	28
2.3.2 Análisis de posición de mecanismos con salida rotacional	29
2.3.3 Síntesis de mecanismos	29

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE MECANISMOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN GENERADO POR UN ALAMBRE CON MF

3.1.-Motor con alambres de Ni-Ti	35
3.1.1-Diseño conceptual	36
3.1.2- Descripción del funcionamiento	41
3.2.- Dispositivo recuperador de energía de desecho de máquinas térmicas	48
3.2.1-Diseño conceptual	48
3.2.2-Descripción del funcionamiento y de los elementos	50

CAPITULO 4

RESULTADOS

4.1-Diseño de detalle del motor con alambres de Ni-Ti	54
4.1.2-Criterios de diseño	54
4.2- Dispositivo recuperador de energía de desecho	69
Conclusiones	73
Referencias	
Apéndice	77

Introducción

El desarrollo actual en materiales ha generado una gran cantidad de avances tecnológicos que cada día se ven en diversos dispositivos capaces de realizar acciones que anteriormente eran imposibles de realizar o bien que eran ejecutadas por sistemas más complejos. Tal es el caso de los llamados Materiales con Memoria de Forma (MMF) los cuales tienen capacidad de tomar dos configuraciones geométricas al pasar por cierta temperatura crítica que depende de la composición del material y de su microestructura. De hecho dicho cambio de forma lo pueden experimentar estos materiales arrastrando una cierta carga por lo que son capaces de realizar trabajo mecánico empleando energía térmica a muy bajas temperaturas. Esta propiedad de los MMF ha permitido que estén siendo empleados en muchas áreas de la ingeniería como la automatización, donde es posible sustituir motores y sistemas completos de control por elementos mecánicos muy simples como barras o alambres.

Como sucede en muchos casos, esta tecnología está siendo desarrollada en países del primer mundo y está llegando a México como parte de dispositivos más complejos, como sistemas de aire acondicionado y automóviles. Es importante mencionar que en la Conferencia Internacional de Tecnología Super-elástica y Memoria de Forma, *The International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies 2008 (SMST)*, celebrada en septiembre del 2008 en la cd. de Stresa, Italia, una buena cantidad de los desarrollos empleando MMF que se presentaron estuvieron a cargo de empresas como: Fiat, Volvo así como de agencias gubernamentales como la Nasa entre otros.

Considerando lo anterior, hoy en día resulta de gran importancia estudiar el comportamiento de los MMF y desarrollar aplicaciones en las universidades ya que de otro modo, como ha sucedido de manera recurrente en la historia de nuestro país, estaremos quedando en el rezago de los avances tecnológicos, que en un futuro muy próximo se verá en la tecnología que se importa.

Cabe mencionar que para desarrollar aplicaciones de los MMF, es necesario en primer lugar estudiar el comportamiento de estos materiales y desarrollar modelos matemáticos que permitan diseñar dispositivos que aprovechen sus propiedades. Afortunadamente, esta actividad ha venido desarrollándose en México desde hace unos 15 años por lo que actualmente, se cuenta con fundamentos teóricos necesarios para emprender esta importante tarea.

En respuesta a esta demanda del progreso tecnológico en nuestro país, en el presente trabajo se exponen el desarrollo de aplicaciones de los MMF que consiste en el diseño de dispositivos capaces de convertir la energía, aplicada al material, en forma de calor en trabajo mecánico útil. En concreto se presentan los criterios de diseño de un dispositivo que denominamos “Motor con memoria de forma” que consiste en un alambre fabricado con una aleación de Ni-Ti colocado en un arreglo que permite que las contracciones y relajaciones que sufre el material, debido a la aplicación de ciclos de calentamiento y enfriamiento, sean transformadas en un movimiento circular continuo en un eje. Así mismo, este arreglo es posteriormente empleado para inducir un desbalance en un volante de inercia para generar una oscilación permanente que puede ser aprovechada para obtener energía proveniente de gases de expulsión de alguna máquina térmica convencional.

Para generar las aplicaciones que se muestran en el presente trabajo, fue empleado un modelo matemático desarrollado previamente que aproxima el comportamiento de los MMF a diferentes temperaturas mediante parábolas que cambian su foco al variar la temperatura. Dicho modelo fue adaptado para considerar la carga variable a la que está sujeto el alambre de Ni-Ti que se empleó y la respuesta calculada fue muy próxima a la del dispositivo real.

En el primer capítulo “Conceptos generales de la memoria de forma”, se presenta una breve descripción de las nociones fundamentales sobre los MMF, las características de su comportamiento así como los fenómenos asociados a éste y se mencionan algunos modelos propuestos en la literatura.

En el segundo capítulo “Sistemas de conversión de movimientos” se presenta una breve revisión bibliográfica sobre los mecanismos que pueden ser empleados para transformar el movimiento longitudinal que proporcionan los alambres con memoria de forma, en giro continuo u oscilante. Se pone especial énfasis en el mecanismo: biela-manivela-corredera que es el que se empleó finalmente para diseñar el “Motor con memoria de forma”.

En el capítulo tres “Diseño de mecanismos para el aprovechamiento de la deformación generado por un alambre con MF”, se presenta una descripción detallada de los componentes así como del funcionamiento de los dispositivos diseñados es decir: del “Motor con Memoria de Forma” y el “Dispositivo Recuperador de Energía de Desecho de Máquinas Térmicas Convencionales”.

Finalmente, en el capítulo 4 “Resultados” se presentan los criterios de diseño empleados para los dos dispositivos que se desarrollaron, en particular se presenta la aplicación del modelo matemático para predecir el comportamiento del MMF empleado así como la síntesis del mecanismo que se usó. Y se muestra la apariencia final de los prototipos en una serie de fotografías.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES DE LA MEMORIA DE FORMA.

1.1.-Generalidades de los MMF.

Los materiales con memoria de forma (MMF), son aleaciones metálicas que después de una aparente deformación plástica, vuelven a su forma original tras un calentamiento. Una vez deformados a bajas temperaturas (en su fase martensítica), estos materiales permanecerán así hasta ser calentados, entonces volverán espontáneamente a su forma original que tenían antes de dicha deformación. Las propiedades fundamentales y características de estas aleaciones son: la superelasticidad, la memoria de forma, el efecto combinado y el doble efecto de memoria de forma:

- El efecto superelástico consiste en que el material estando a una temperatura por encima de la crítica y sometido a esfuerzos, es capaz de experimentar deformación de hasta 100 veces mayor que la que pueden experimentar los materiales convencionales.
- El efecto de memoria de forma simple es la habilidad del material de recuperar grandes deformaciones inducidas mecánicamente (hasta el 8%), mediante moderados incrementos de temperatura.
- El efecto combinado consiste en que el material sujeto a una carga constante, toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura.
- El doble efecto de memoria de forma es esencialmente el mismo que en el caso anterior, es decir, el material toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura, sólo que en este caso no se aplica carga alguna. Dicho efecto se obtiene después de que el material es sometido a un proceso termo-mecánico llamado educación.

Los MMF tienen la habilidad de sufrir transiciones de fase micromecánicas reversibles cambiando su estructura cristalográfica. Dicho comportamiento se debe a que en ellos se presenta una transformación de fase denominada martensítica a partir de una fase madre llamada austenita. Esta fase puede ser inducida por temperatura, esfuerzo o combinación de ambas y por la aplicación de campos magnéticos. [1,2] La base para la memoria de forma es que los materiales puedan transformarse desde y hacia la martensita fácilmente.

1.1.1.- Transformación martensítica (TM).

Las transformaciones de estado de los sólidos pueden ser de dos tipos: por difusión y por desplazamiento. En las transformaciones por difusión solo se pueden formar nuevas fases con movimientos aleatorios de los átomos que recorren distancias relativamente grandes, lo que significa que se lleva a cabo una migración atómica, por esta razón la evolución de este tipo de transformación depende de la temperatura y el tiempo. En la transformación por desplazamiento no se requieren grandes movimientos y en este caso los átomos se reordenan para llegar a una nueva estructura cristalina más estable pero sin cambiar la naturaleza química de la matriz. Dado que no se necesita una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento, generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de la interfase entre las dos fases es tremendamente rápido. Las transformaciones martensíticas pertenecen a este segundo tipo. [3]

Por lo tanto la transformación martensítica ha sido definida como una transformación displaciva de primer orden, constituida por una deformación de corte, por tanto se lleva a cabo sin difusión atómica, con movimientos menores al parámetro de red.[3] Se forma al enfriar una fase a alta temperatura desde una fase madre llamada austenita. Son, además, transformaciones de primer orden por presentar discontinuidades en las primeras derivadas de sus potenciales termodinámicos como son: entalpía, entropía, etc. Presentan una entalpía de transformación, una histéresis asociada a esa transformación y hay un rango de temperatura en el que existen austenita y martensita juntas.

A medida que la temperatura disminuye, una fracción de volumen de martensita aumenta, conservando la composición y ordenación atómica de la fase madre debido a la ausencia de difusión. Las propiedades físicas de la martensita y austenita son diferentes y por ello a medida que se atraviesa el punto de transformación mediante una variación de temperaturas, aparece una gran variedad de cambios en las propiedades significativas.

Cuando la TM es inducida por enfriamiento, puede ser descrita mediante un diagrama como el que se muestra en la Figura 1.1 donde se presenta una gráfica fracción volumétrica transformada-temperatura ($f - T$). En la figura se puede ver que existen cuatro temperaturas características para la transformación martensítica y su inversa. Dichas temperaturas son M_s , M_f , A_s , A_f las cuales representan el inicio y el fin de la transformación martensítica así como el inicio y fin de la transformación inversa, respectivamente.

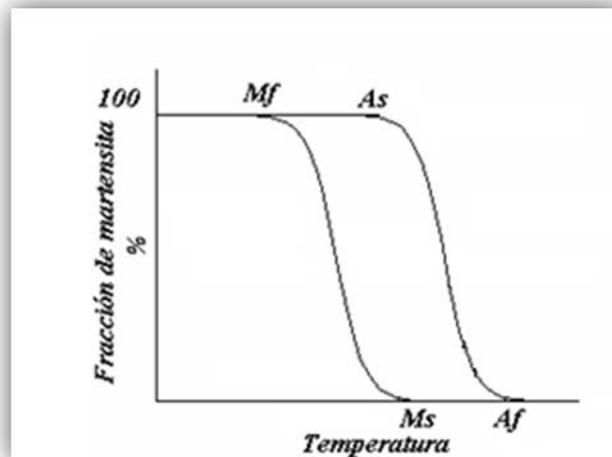


Figura 1.1 Curva fracción volumétrica-temperatura ($f-T$)

En el proceso de enfriamiento la primera de estas temperaturas es la temperatura de inicio de la transformación martensítica (M_s), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura. Esta transformación termina a medida que decrece la temperatura cercana a M_f o temperatura final de la transformación martensítica. El siguiente conjunto de temperaturas características de transformación es la temperatura de inicio de la transformación austenítica y la final de austenita, A_s , A_f respectivamente. La formación de la fase austenítica empieza a medida que durante el proceso de calentamiento, alcanza la temperatura A_s , se comienza a formar entonces una estructura cristalina cúbica centrada en las caras rígida y dura, que se termina de formar alrededor de A_f cuando el elemento se calienta mas allá de esta temperatura la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto de memoria de forma.

Por convención, se considera que la TM, así como su inversa, ha iniciado cuando el 10% de la fracción volumétrica del material ha transformado y se considera que ha finalizado cuando se alcanza el 90%. [1]

Debido a que la transformación martensítica es de primer orden se presenta una entalpía de transformación (ΔH) la cual puede ser observada en una prueba de calorimetría diferencial de barrido. En la Figura 1.2 se muestra una curva típica: flujo de calor-temperatura que se obtiene practicando en dicha prueba a un MMF.

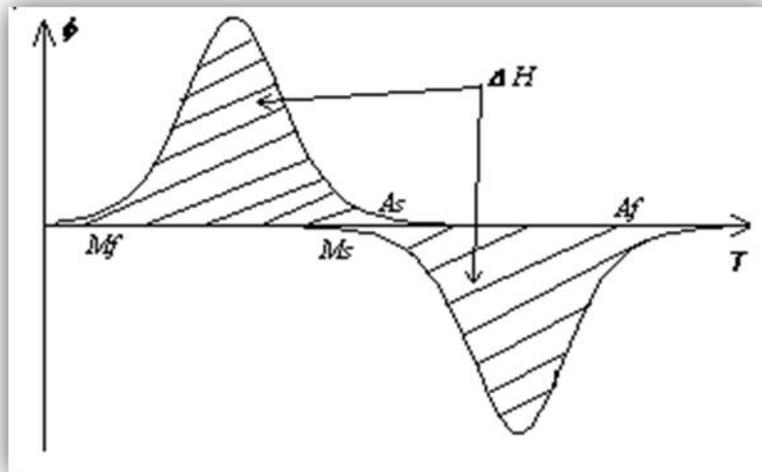


Figura 1.2 Curva flujo de Calor-Temperatura, típica de una prueba de calorimetría diferencial de barrido en un material con memoria de forma

La parte superior de la curva de la Figura 1.2 corresponde con el enfriamiento y la parte inferior con el calentamiento. Cabe destacar que en la Figura 1.2 se muestran las temperaturas críticas mostradas también en la Figura 1.1 así como la entalpía de transformación.

Según se ha reportado, [1,4] la fracción volumétrica transformada (f) es proporcional a la entalpía de transformación (ΔH) lo cual puede expresarse como:

$$f \propto \Delta H \tag{1.1}$$

Donde: ϕ , como se puede ver en la Figura 1.1, es el flujo de calor a través del material como función de la temperatura. Tomando solamente la parte superior de la curva mostrada en la Figura 1.1, que corresponde con el enfriamiento de la muestra, tenemos que T_1 puede ser tomada como $-\infty$ y T como una temperatura menor M_s . De lo anterior, se ve claramente que:

$$\Delta H = \int_{-\infty}^{\infty} \phi dT \tag{1.2}$$

La entalpía de transformación es un parámetro propio de cada tipo de TM en los MMF. Existen varios tipos de martensitas que pueden ser inducidas a partir de distintos tipos de austenitas que pueden presentarse en los MMF. La razón de las diferencias entre austenitas y martensitas se debe a que poseen diversas estructuras. Aunque la estructura de la fase austenita en los MMF posee simetría cúbica centrada en el cuerpo.

Como se mencionó, la transformación martensítica puede ser inducida por esfuerzo, por una combinación de esfuerzo y enfriamiento o solamente por enfriamiento. En la Figura 1.3 se muestra un diagrama esfuerzo-temperatura-transformación donde pueden ser apreciadas los distintitos tipos de transformación.

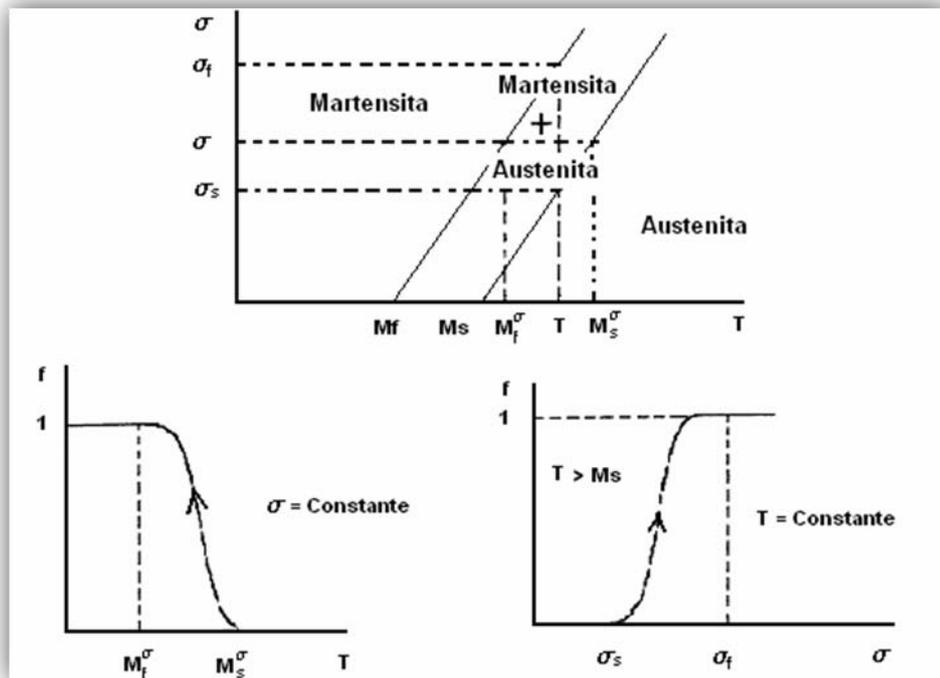


Figura 1.3. Diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación típico de un material con memoria de forma.

En la Figura 1.3 se aprecia que cuando la transformación martensítica es inducida por enfriamiento (σ constante) esta inicia en $T=M_s$ y finaliza en $T=M_f$. Además se puede ver que cuando la transformación martensítica es inducida por esfuerzo, es decir que la temperatura se mantiene constante y mayor a M_s , ésta inicia cuando el esfuerzo alcanza un cierto valor crítico σ_c y termina cuando el esfuerzo es igual a σ_f y que ambos dependen de la temperatura a la cual se realiza la prueba.

En realidad, los diagramas esfuerzo-temperatura-transformación son considerablemente más complejos que el de la Figura 1.3 ya que algunos MMF presentan diferentes tipos de transformaciones en determinados rangos de temperatura, como es el caso de aleaciones de Cu-Al-Ni, [5,6] y en la mayoría de los casos se presentan transformaciones sucesivas es decir transformaciones del tipo: martensita-martensita. En la Figura 1.4 se muestran los diagramas esfuerzo-temperatura-transformación correspondientes al Cu-Al-Ni, Cu-Zn-Al y Cu-Al-Be.[8]

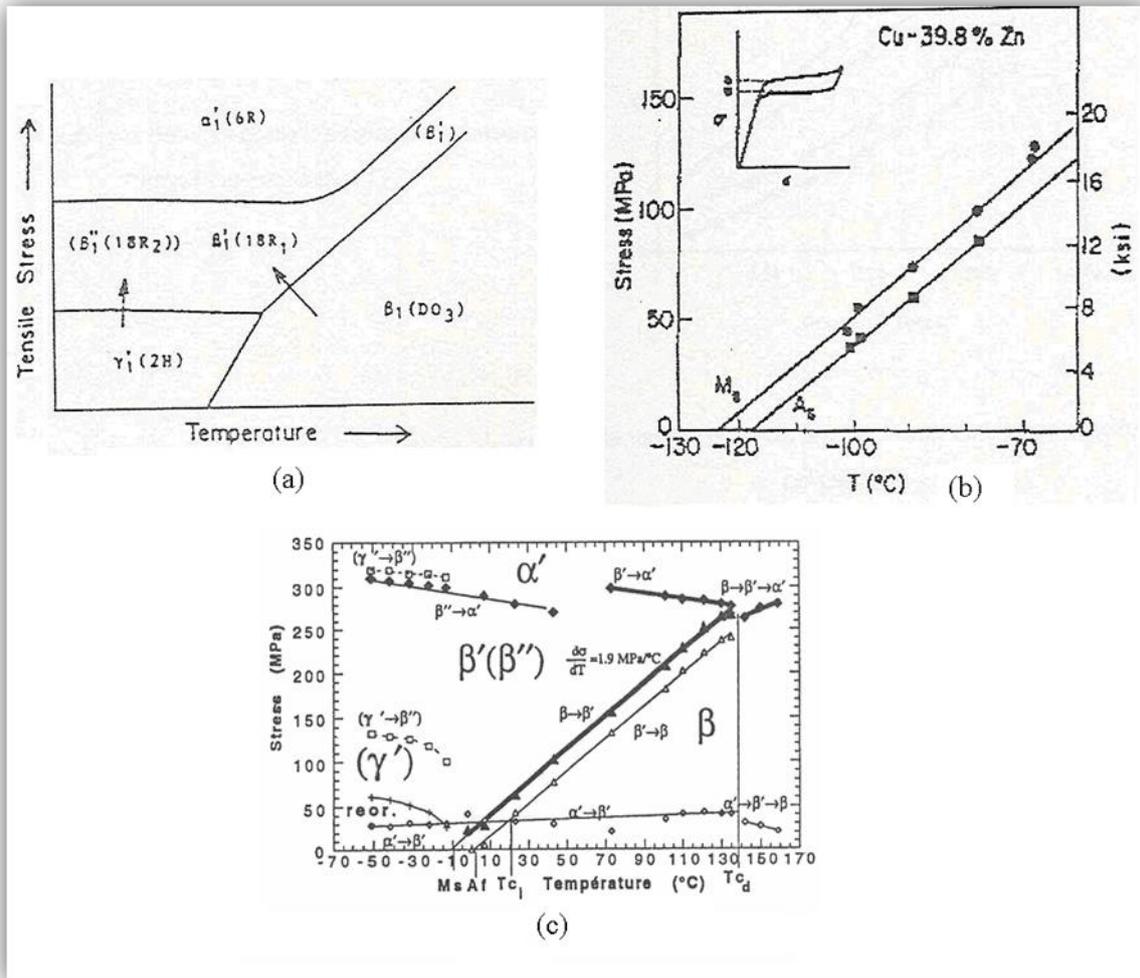


Figura 1.4 Diagrama esfuerzo-temperatura-transformación correspondientes a: a) Cu-Al-Ni [6], b) Cu-Zn-Zl [7] y c) Cu-Al-Be [8]

La magnitud del esfuerzo crítico (σ_c) depende de la temperatura y sigue la relación de Calssius-Clapeyron, la cual puede ser escrita como:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial M_s} = - \frac{\Delta H}{T \varepsilon_o} \quad (1.3)$$

donde: $\frac{\partial \sigma}{\partial M_s}$ es la razón de esfuerzo (la cual corresponde con la pendiente de la recta que se muestra en la Figura 1.3 y en la 1.4c se conoce el valor de esta cantidad), ΔH es la entalpía de transformación, T es la temperatura a la cual se induce la transformación y ε_o es la deformación transformacional la cual depende de la orientación cristalográfica del material.

El valor de la razón de esfuerzos, la entalpía de transformación y la deformación transformacional son diferentes para cada tipo de TM que se presenta en cada MMF. El esfuerzo crítico (σ_c), que es el esfuerzo necesario para iniciar la transformación a temperatura constante, corresponde con el que se obtiene en pruebas en tensión uniaxial. Para estados de esfuerzos planos o tridimensionales, la determinación del esfuerzo crítico es considerablemente más complejo ya que se trata más bien del esfuerzo "efectivo" necesario para iniciar la transformación.

En los últimos años se han venido realizando una serie de estudios al respecto, ya que este parámetro del comportamiento de los MMF es uno de los que presenta alta anisotropía mecánica. [9,10,11,12,13]

Microscópicamente la transformación de austenita a martensita puede explicarse separada en dos partes: deformación de la red cristalina y la formación de variantes autoacomodantes. Aunque la deformación de la red es un proceso más complicado, se puede hacer una aproximación en dos dimensiones. Como se puede apreciar la Figura 1.5, durante la TM la estructura de la fase madre sufre una distorsión del tipo cortante puro, acompañado de un pequeño movimiento coordinado de los átomos del centro llamado “Shuflé”.

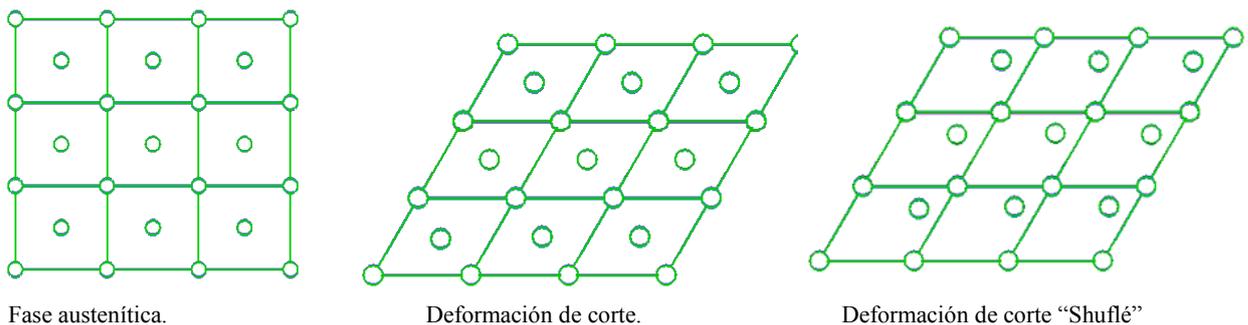


Figura 1.5 Diagrama que muestra la deformación que sufre la estructura de la fase madre durante la TM.

La martensita de los aceros implica un cambio de volumen y forma, mientras en las aleaciones con memoria de forma, como por ejemplo el NiTi, básicamente tienen solo cambio de forma. Existe una diferencia apreciable entre la estructura de la fase austenítica y la fase martensítica; sin embargo, cuando la transformación es inducida por enfriamiento el volumen del material se mantiene prácticamente constante. Esto se debe a que en los MMF, a diferencia de lo que ocurre en otros tipos de transformaciones martensíticas, se presenta un mecanismo de auto acomodación reversible llamado: “formación de variantes autoacomodantes”. Dicho mecanismo consiste esencialmente en que las variantes de martensita que aparecen en el material se orientan de tal manera que se compensa la deformación de una con la de otra que se orientó en dirección opuesta. En las Figuras 1.6 (a) y 1.6 (b) se puede apreciar las representaciones bidimensional y tridimensional respectivamente de la formación de variantes autoacomodantes.

En los MMF la transformación martensítica es de tipo termoelástica, a diferencia de otras transformaciones martensíticas observadas principalmente en aceros, por lo que progresa sólo si disminuye la temperatura en el material y se recupera en cuanto la temperatura incrementa. Así mismo, es importante mencionar que cualquiera de las variantes de martensita que se forme en el material recuperará la estructura de la fase austenítica que la originó. La importancia de las dos características anteriores es que son las que permiten que se presente en los MMF el llamado: “efecto memoria de forma simple”.

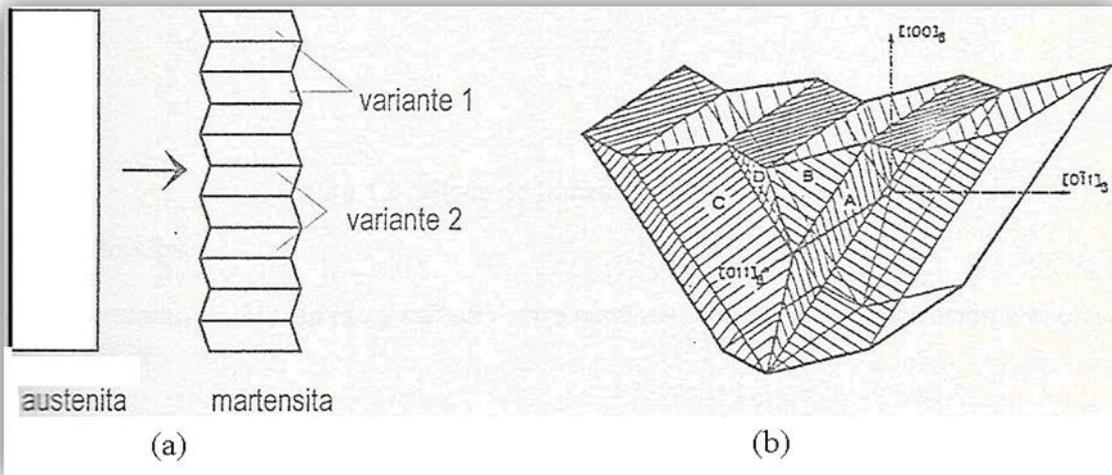


Figura 1.6 Diagramas que muestran el mecanismo de autoacomodo que se presenta en los MMF durante la transformación martensítica inducida por enfriamiento: (a) Diagrama bidimensional y (b) diagrama tridimensional. [14]

En el caso de transformaciones martensíticas no termoelásticas, el mecanismo de autoacomodo es el deslizamiento de planos atómicos el cual no es reversible. Esta característica se manifiesta en el tamaño de la histéresis la cual es considerablemente mayor que el de transformaciones martensíticas termoelásticas como las que se presentan en MMF. En la Figura 1.7 se muestran una serie de curvas energía libre de Gibbs-temperatura ($G-T$) para diferentes tipos de transformaciones martensíticas en donde se aprecia claramente el gran tamaño de la histéresis para transformaciones tipo Burts típica de transformación martensítica no termoelásticas.

Por otro lado, cuando la transformación es inducida por esfuerzo el mecanismo de formación de variantes autoacomodantes no se presenta y debido a ello la transformación se caracteriza por una gran deformación elástica.

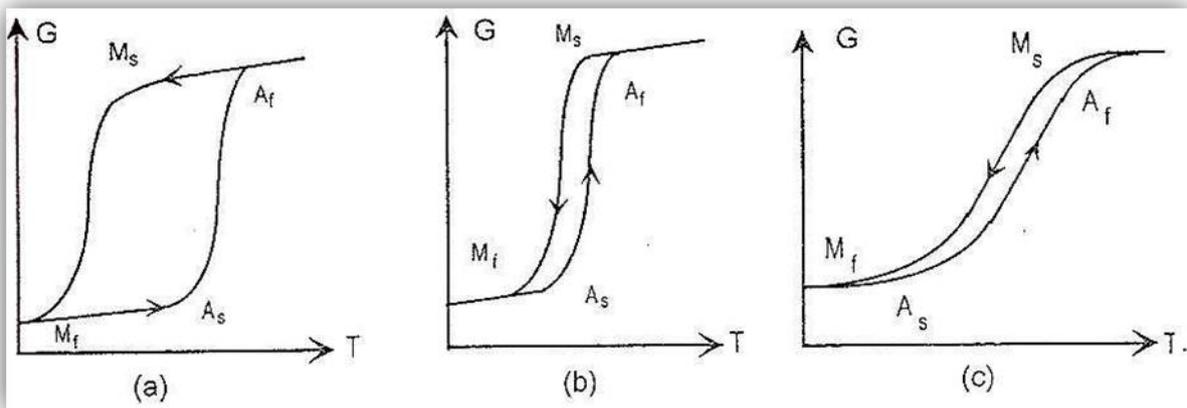


Figura 1.7 Diferentes tipos de curvas G-T para distintos tipos de transformaciones martensíticas. a) tipo Burst b) y c) termoelásticas

1.2.-Comportamiento Mecánico de los MMF.

La transformación martensítica inducida por esfuerzo involucra una variación considerable del comportamiento esfuerzo-deformación respecto al que presentan los materiales convencionales. En la Figura 1.8 se muestra un diagrama esfuerzo-deformación-temperatura donde se aprecian los diferentes comportamientos que presenta el Ni-Ti. [7]

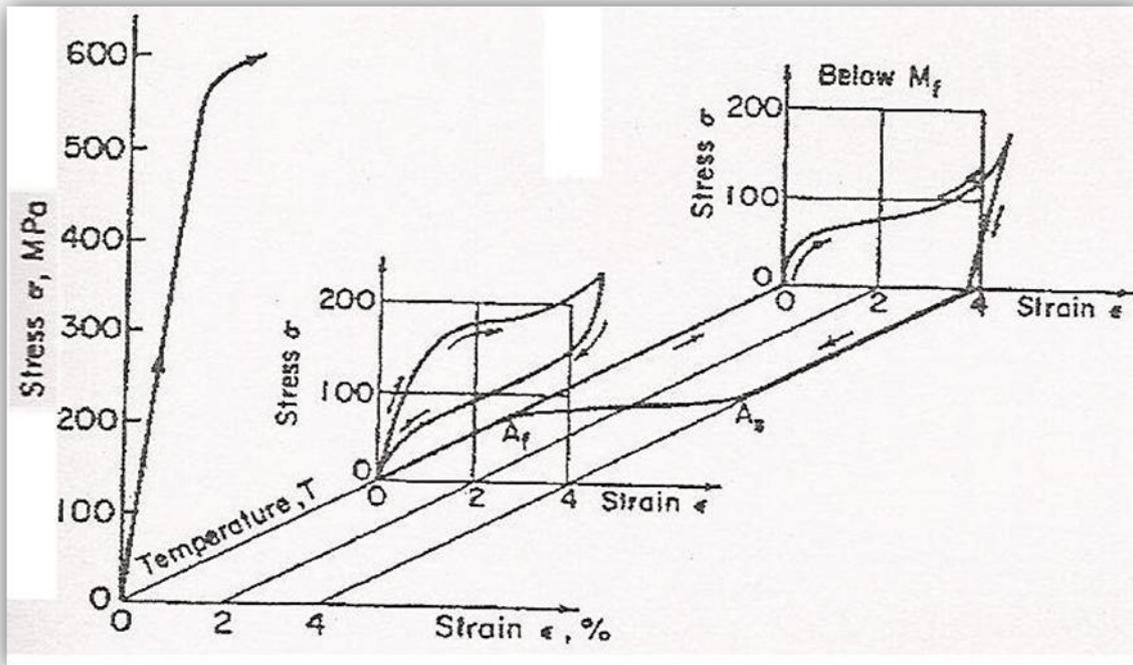


Figura 1.8 Comportamiento mecánico a diferentes temperaturas que presentó una aleación de Ni-Ti con memoria de forma.[7]

Se puede observar que a una temperatura menor que M_f , si el material es cargado y descargado persiste una deformación aparentemente plástica que es recuperada al calentar el material por encima de la temperatura A_f . Este comportamiento corresponde con el llamado: “efecto memoria de forma simple”. Al enfriar el material, por debajo de M_f , se presenta el mecanismo de formación de variantes autoacomodantes por lo que la forma de la muestra se mantiene prácticamente invariable. Las variantes de martensita que se reorientan, debido a la aplicación de una carga, siguen la dirección donde los esfuerzos cortantes inducidos son mayores. Al retirar la carga sólo algunas de las variantes reorientadas recuperan su orientación original mientras que otras no, lo que ocasiona que en el material persista una deformación macroscópica. Cuando el material es calentado por encima de A_f , todas las variantes de martensita retornan a la estructura de la fase austenítica, que es cúbica, por lo que la deformación es totalmente recuperada. Este mecanismo se muestra en un esquema simple en la Figura 1.9 en donde se emplea un modelo bidimensional.

De la Figura 1.8 se observa que estando el material a una temperatura mayor que A_f , es decir en fase austenítica, al ser aplicado un ciclo de carga y descarga en una prueba de tensión uniaxial la curva esfuerzo-deformación que se obtiene corresponde con el llamado: “lazo superelástico” el cual se asocia a la transformación martensítica inducida por esfuerzo.[5]

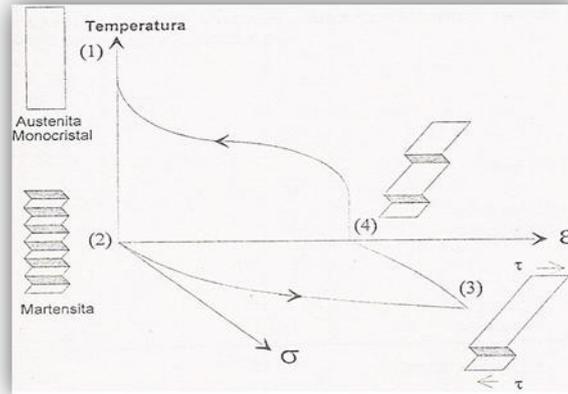


Figura 1.9 Diagrama esquemático que muestra los efectos estructurales involucrados en el efecto memoria de forma simple. [14]

Para valores bajos de esfuerzo el material presenta un comportamiento lineal, similar al que presentan los materiales que siguen la ley de Hooke. Sin embargo a determinado valor de esfuerzo, que depende de la temperatura de prueba, se presenta una meseta que se caracteriza por un aumento en la deformación originada por pequeños incrementos en el esfuerzo. En la Figura 1.10 se muestran una serie de curvas esfuerzo-deformación correspondientes a una aleación de Cu-Zn-Al [7] sometida a cargas de tensión uniaxial a temperaturas $T > A_f$. Se observa que el valor del esfuerzo crítico (σ_c), que corresponde con el esfuerzo al cual se presenta la meseta, cambia con la temperatura lo que es congruente con el diagrama mostrado en la Figura 1.3.

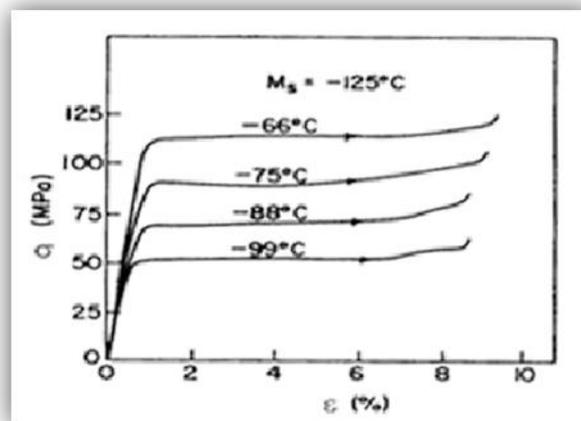


Figura 1.10 Comportamiento esfuerzo-deformación correspondiente a una muestra de Cu-Zn-Al con memoria de forma sometida a pruebas de tensión uniaxial a diferentes temperaturas $T > A_f$. [7]

En la región lineal de las curvas esfuerzo-deformación, el material se encuentra en fase austenítica, por lo que el comportamiento elástico es el de dicha fase, mientras que la meseta se asocia a la transformación martensítica inducida por esfuerzo (TMIE) y la deformación es proporcional a la fracción volumétrica del material transformado. La deformación que sufre el material durante la transformación, es llamada: “deformación transformacional” (ϵ_0), [1] depende de cada MMF y de la orientación cristalina y se debe a que sólo se induce en el material aquellas variantes de martensita que se ven favorecidas por el esfuerzo aplicado, es decir, no se presenta el mecanismo de autoacomodo.

Es importante mencionar que la deformación transformacional corresponde con el tamaño de la meseta en materiales monocristalinos como se muestra en la Figura 1.11

Al finalizar la meseta en el material, nuevamente se presenta un comportamiento lineal con una pendiente constante, la cual se debe a que se ha transformado totalmente y la pendiente constante se asocia al comportamiento elástico de la fase martensítica. Finalmente, al descargar el material se observa claramente que se presenta una histéresis debida a la disipación de energía, en forma de calor, que caracteriza a la transformación martensítica.

En el caso de MMF monocristalinos se presenta la meseta de deformación, descrita anteriormente, mientras que en materiales policristalinos se observa más bien un cambio de pendiente como se aprecia en la Figura 1.11.

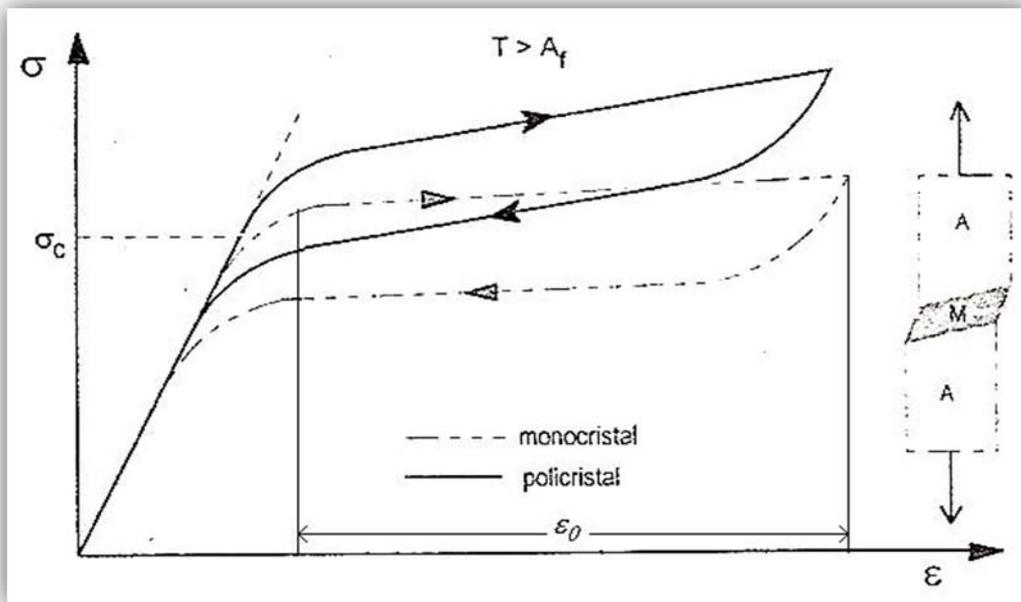


Figura 1.11. Curvas esfuerzo-deformación correspondientes a un MMF monocristalino y otro policristalino.

El cambio de pendiente en los materiales policristalinos, se asocia a la alta anisotropía que presenta la deformación transformacional así como a otros efectos asociados a la microestructura. Recientemente, se ha reportado que en pruebas [15,16] de tensión uniaxial el tamaño real del grano altera considerablemente el valor del esfuerzo crítico y las temperaturas críticas en los MMF. [17]

Las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a cada tipo de transformación martensítica suelen presentar cambios importantes como se aprecia en la Figura 1.13. En la figura se muestran las curvas esfuerzo-deformación que se obtienen al inducir, en pruebas de tensión uniaxial, dos tipos de transformación martensítica por esfuerzo: una del tipo $\beta \rightarrow \beta'$ y la otra del tipo $\beta \rightarrow \gamma'$ en una aleación de Cu-Al-Ni. [18,19]

La letra griega β corresponde con la fase austenítica, generalmente desordenada, cuya estructura puede ser ya sea B2 o A2 mientras que las estructuras DO₃ o L2₁ corresponden con estructuras ordenadas y se denotan como β_1 . En la figura 1.12 se ilustran estas estructuras.

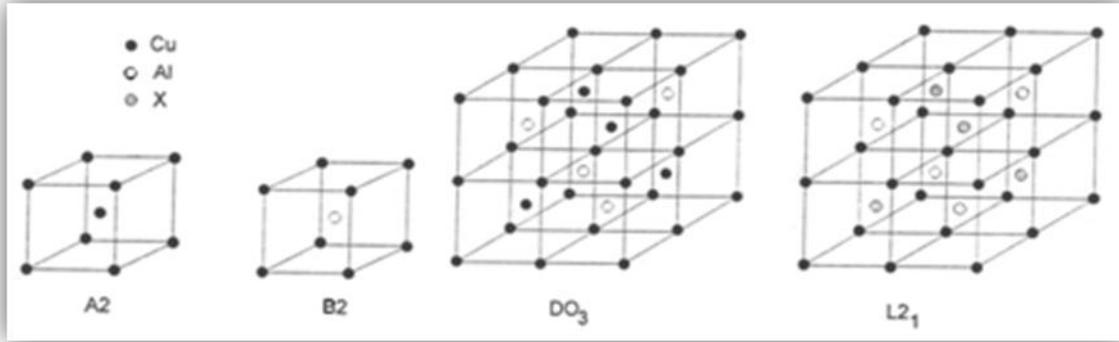
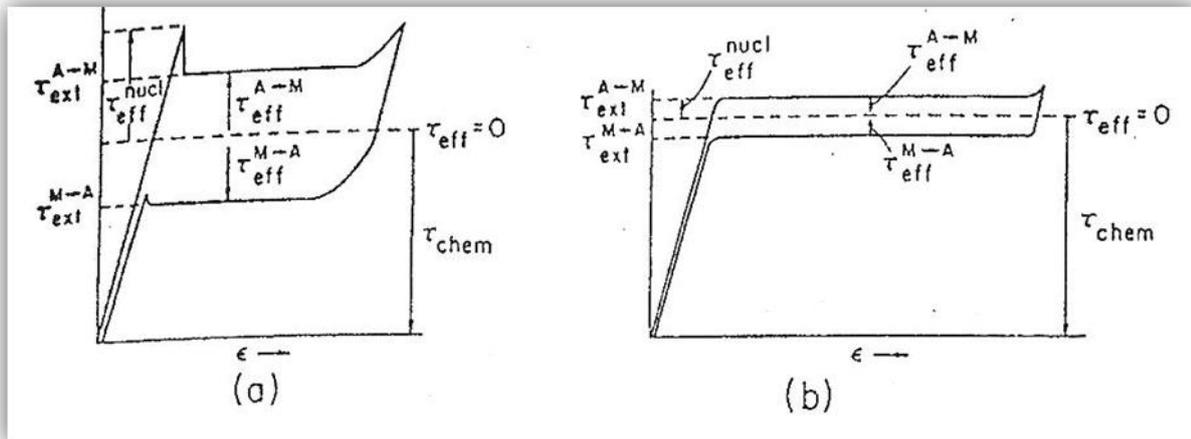


Figura 1.12 Representación gráfica de las simetrías A2, B2, DO₃ y L2₁

Figura 1.13. Diferentes tipos de curvas esfuerzo-deformación generadas por dos tipos diferentes de transformaciones martensíticas presentes en aleaciones de Cu-Al-Ni. a) $\beta \rightarrow \beta'$ y b) $\beta \rightarrow \gamma'$. [18]

Kind of transformation	$(d\sigma)/dT$ (MPa/K)	ϵ_0	ΔS (J/mole · K)	ΔH (J/mole)	ΔH (cal/mole)	T (K)
$\gamma_1 \rightleftharpoons \beta_1^r$	-0.206	0.056	0.086	17.3	4.1	200
$\beta_1^r \rightleftharpoons \alpha_1^r$	-0.139	0.112	0.117	46.7	11.2	400
$\beta_1^r \rightarrow \alpha_1^r$	-0.174	0.145	0.145	36.4	8.7	250
$\beta_1 \rightleftharpoons \beta_1^r$	2.04	0.085	-1.30	-389	-93.0	300

Tabla 1.1. Parámetros correspondientes a los diferentes tipos de transformación martensítica inducida por



esfuerzo que se presentan en un aleaciones de Cu-Al-Ni. [18]

Adicionalmente, la magnitud de la deformación transformacional (ϵ_0), que se muestra en la Figura 1.11, presenta también un efecto anisotrópico severo ya que varía con la orientación cristalográfica. [5, 20,21, 22, 18]

1.2.1.-Anisotropía mecánica de los MMF.

La Anisotropía mecánica en los MMF tiene aspectos relacionados con la estructura de la fase austenítica, con la posición relativa de los planos de hábito y con la proyección de la deformación relativa al sistema de observación.

La fase austenítica de las aleaciones con memoria de forma (AMF) posee generalmente una estructura de simetría cúbica centrada en el cuerpo, en sus distintas modalidades; B2, L2 y DO₃. Por su parte, la estructura de la fase martensítica es generalmente de largo período con celdas unitarias que pueden ser: ortorrómbica, monoclinica, triclinica, entre otras. [1]

Una de las principales limitantes para poder diseñar nuevos dispositivos que aprovechen los efectos de los materiales con memoria de forma es que estos materiales presentan alta anisotropía mecánica. Debido a ello la anisotropía es de gran interés por lo que es estudiada y ha sido continuamente reportada en la literatura en tres sentidos: relacionada con la fase austenita, la deformación transformacional y esfuerzo crítico transformacional.

En la fase austenítica el material llega a presentar variaciones del Modulo de Young de entre 17 y 70 MPa en Cu-Al-Ni [1], En cuanto a la deformación transformacional se presentan variaciones importantes para transformaciones por ejemplo: de $\beta \rightarrow \beta'$ varía entre 8.6% cuando la orientación del eje de aplicación de la carga es cercana a la dirección [001] y disminuye hasta menos de 1% cuando la orientación correspondiente es cercano a la dirección [111]. De manera similar para el mismo material, Oztuka encontró que para una transformación del tipo $\beta \rightarrow \gamma'$ la deformación transformacional varía entre 4.7 y 1% para las mismas orientaciones. El mismo efecto ha sido reportado para AMF tales como Ni-Ti y Ni-Al [20, 21]

Por otro lado los estudios presentados en cuanto al esfuerzo transformacional, estan basados en la teoría fenomenológica de la transformación martensítica (TFTM) y en el Factor de Taylor (FT), muestran que el valor del esfuerzo crítico, más bien definido como un esfuerzo equivalente, depende fuertemente de la orientación del cristal [20,21]

1.3.- Modelos propuestos.

Existen buena cantidad de modelos matemáticos que buscan simular el comportamiento esfuerzo-deformación-temperatura que presentan los MMF en la región superelástica. Estos modelos buscan simular el comportamiento macroscópico tanto en MMF monocristalinos como policristalinos. Varios de estos modelos se basan en teorías conocidas como son: la elastoplásticidad y la viscoelásticidad, entre otros. Se presenta una breve descripción de los principales modelos reportados en la literatura.

El modelo desarrollado por Delobelle y Lexcellent [23] es citado como un modelo viscoplástico con variables cinemáticas internas. El modelo parte suponiendo que la deformación está compuesta de 3 partes: una elástica, una viscoplástica y otra pseudoelástica. Las dos últimas componentes de la deformación son funciones de una variable interna global. El modelo también considera la interacción entre variantes de martensita.

Por otra parte, en un estudio sobre el efecto del comportamiento pseudoelástico en pruebas a esfuerzo uniaxial constante, [24] proponen un modelo termodinámico donde usa la fracción transformada como variable interna y considera la deformación total compuesta por una parte elástica y una transformacional. Las ecuaciones que se proponen son las siguientes:

$$\begin{aligned}\sigma &= \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon^e} = E \varepsilon^e \\ \varepsilon &= \varepsilon^e + \varepsilon^{tr} \\ \dot{\varepsilon}^{tr} &= \gamma \dot{z}_\sigma\end{aligned}\tag{1.4}$$

donde: σ es el esfuerzo aplicado, ρ es la densidad, ψ es la energía libre específica, E es el módulo elástico de la austenita, ε^e es la deformación elástica, ε^{tr} es la deformación transformacional, γ es la máxima deformación durante la transformación en el caso unidimensional, z_σ fracción volumétrica de la martensita orientada, \dot{z}_σ es la derivada de z_σ con respecto al tiempo de z_σ .

Otro modelo reportado en la literatura es el propuesto por Graesser y Cozzarelli [25] quienes proponen un conjunto no lineal de ecuaciones constitutivas parametrizadas para simular el comportamiento pseudoelástico. Los parámetros son los que controlan la histéresis, el esfuerzo residual, las mesetas de carga y descarga y la transición de fase misma. El modelo consta de dos partes una elástica y una inelástica, las cuales se superponen para describir los distintos comportamientos observados en los MMF. Este modelo se basa en un modelo elastoplástico que los autores desarrollaron previamente para estudiar el comportamiento mecánico de materiales convencionales tanto en la región elástica como en la plástica. Un aspecto relevante de este modelo es que considera la histéresis transformacional.

En un primer trabajo, Graesser propone un modelo unidimensional el que luego es generalizado al caso tridimensional. El modelo unidimensional propuesto por Graesser es el siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma &= E \left[\varepsilon - |\varepsilon| \left| \frac{\sigma - \beta}{Y} \right|^{n-1} \left(\frac{\sigma - \beta}{Y} \right) \right] \\ \beta &= E \alpha \left[\varepsilon - \frac{\sigma}{E} + f_T |\varepsilon|^c \operatorname{erf}(a \varepsilon) \right]\end{aligned}\tag{1.5}$$

donde: σ esfuerzo uniaxial, ε es la deformación uniaxial, β esfuerzo residual, E es el Módulo de Young, ν razón de Poisson, Y es el esfuerzo necesario para inducir la transformación martensítica a una temperatura dada, α es una constante que determina la pendiente de la región inelástica, n es una constante que controla transición de la región elástica a la inelástica, f_T es una constante que controla el tipo y el tamaño de la histéresis, a es constante que controla la cantidad elástica recobrada, c es una constante que controla la pendiente de la meseta de descarga, $|x|$ es el valor absoluto de x , $\operatorname{erf}(x)$ es la función error de argumento x .

Posteriormente, este modelo fue generalizado al caso tridimensional de donde los autores proponen las siguientes ecuaciones constitutivas para el comportamiento pseudoelástico de MMF:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\dot{y}} &= \frac{1-\nu}{E} \sigma_{\dot{y}} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{\dot{y}} + \sqrt{3K_2} \left(\sqrt{3J_2^o} \right)^{n-1} \left(\frac{\varepsilon_{\dot{y}} - b_{\dot{y}}}{\sigma_c} \right) \\
b_{\dot{y}} &= \frac{2}{3} E \alpha \left[\varepsilon_{\dot{y}}^{jn} + f_T \left(\frac{2}{3} \sqrt{3I_2} \right)^{c-1} \operatorname{erf} \left(\frac{2}{3} a \sqrt{3I_2} \right) \right] \\
\varepsilon_{\dot{y}}^{jn} &= \varepsilon_{\dot{y}} - \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\dot{y}} + \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{\dot{y}}
\end{aligned} \tag{1.6}$$

donde I_2 , K_2 y J_2^o son respectivamente los segundos invariantes de: los tensores de distorsión (deviator) de la deformación y de la rapidez de deformación y del tensor de “sobre esfuerzo”. La cantidades $\sqrt{3I_2}$ y $\sqrt{3K_2}$, son análogos a las respectivas mediciones de deformación plástica efectiva y rapidez de esfuerzo plástico efectivo que se usan en plasticidad.

Por su parte Rohan [26] ha propuesto un modelo uniaxial que se basa en la variación de los potenciales termodinámicos durante formación de una variante “doble”. El modelo toma como punto de partida que dichos potenciales son biconvexos. Otros autores como Brinson, [27,28] han retomado el principio en el que la deformación del material durante la TM es esencialmente un cortante simple paralelo al plano de hábito. Bajo este principio y consideraciones de energía representadas por una relación cinética para la fracción volumétrica de material transformado (f), Brinson han propuesto un modelo para simular el comportamiento de los MMF. El modelo considera la evolución de la deformación durante la transformación, pero ha sido empleado mejor para estudiar los efectos de disipación de energía durante el proceso de descarga.

1.3.1-Modelo ingenieriles.

Los llamados modelos ingenieriles, los cuales son esencialmente fenomenológicos, son aquellos que se desarrollan para simular el comportamiento mecánico de elementos típicos, generalmente los más simples, pueden ser empleados en múltiples aplicaciones. Estos modelos analizan alambres sujetos a tensión, vigas en flexión, barras en torsión o bien ciertas combinaciones de éstos. A continuación, se presenta un modelo desarrollado por Cortés [34] que permite simular el comportamiento de elementos sujetos a tensión simple. El modelo se basa en una aproximación del comportamiento mecánico del MMF en tensión, mediante parábolas.

Como se sabe, el comportamiento esfuerzo-deformación de los MMF policristalinos, a una temperatura mayor que A_f , presenta dos pendientes como se muestra en la Figura 1.14.

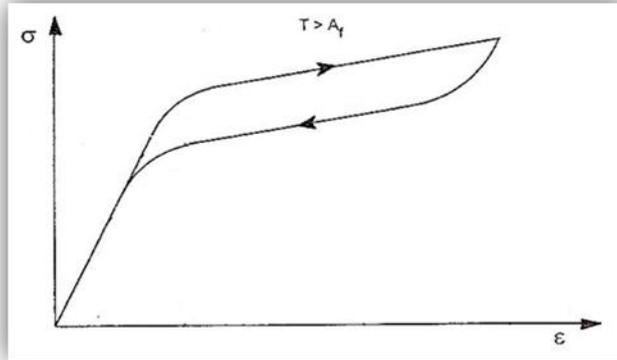


Figura 1.14. Diagrama esfuerzo-deformación donde se muestran las dos pendientes que se presentan en el comportamiento.

Es claro que dicho comportamiento puede ser aproximado mediante una parábola cuya ecuación tiene la siguiente forma:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.7)$$

Donde n debe cumplir con $0 < n < 1$

De la ecuación anterior, es claro que:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.8)$$

Por otro lado, en la Figura 1.15a) se muestran las curvas esfuerzo-deformación correspondientes al comportamiento de un MMF sujeto a tensión simple a distintas temperaturas, todas ellas mayores que M_s . Mientras que en la figura 1.15b) se puede ver una curva deformación-temperatura a esfuerzo constante. Dichas curvas son obtenidas experimentalmente. Es claro que si se pretende simular el comportamiento de dichas figuras empleando parábolas, se debe hacer variar la constante K en función de la temperatura.

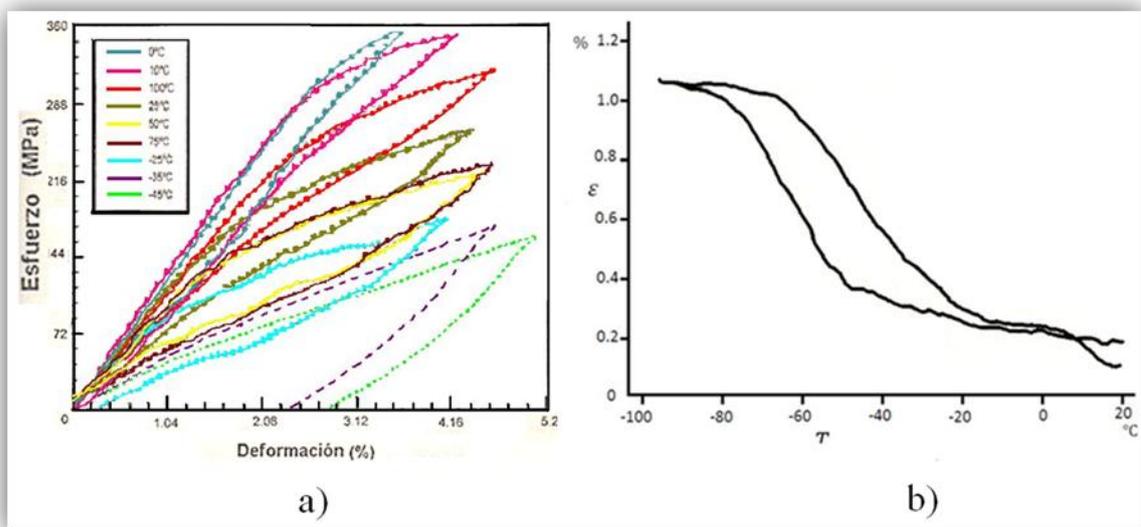


Figura 1.15 a) Diagrama $\sigma - \varepsilon$ [38] y b) Diagrama $\varepsilon - T$ con σ constante. [37]

Puesto que la variación del comportamiento del MMF se presenta entre dos temperaturas, M_f y M_s , la constante K puede ser parametrizada de manera que varíe entre dos valores extremos K_1 y K_2 en función de la temperatura. Para lograr lo anterior, se propone emplear una función de Boltzman la cual varía entre dos valores extremos, 0 y 1 por ejemplo, y se puede definir en función de la temperatura y usar como parámetro la temperatura crítica M_s del material. Considerando lo anterior, se obtuvo la siguiente expresión:

$$f = \frac{e^{\left(\frac{T-M_s-T_c}{T_a}\right)}}{1+e^{\left(\frac{T-M_s-T_c}{T_a}\right)}} \quad (1.9a) \quad T_c = \frac{\sigma}{\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}} \quad (1.9b) \quad T_a = \frac{\sigma}{\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}} \ln(99) \quad (1.9c)$$

Donde: T es la temperatura de prueba, M_s es la temperatura de inicio de la transformación martésítica, σ es el esfuerzo aplicado, $\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}$ es la razón de esfuerzo

que es un valor característico de cada tipo de transformación martésítica.

Luego los valores extremos K_1 y K_2 se definen como:

$$k_1 = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^n \sigma^{1-n} \quad (1.10a) \quad k_2 = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^n \frac{\sigma^{1-n}}{2} \quad (1.10b)$$

Donde: E , n y α son parámetros que se toman de la curva esfuerzo-deformación a $T > A_f$ para el material empleado.

Finalmente, cuando material es sometido a enfriamiento y a carga constante, el modelo desarrollado por Cortés [34] se expresa como:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sigma_A}{f(k_2 - k_1) + k_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1.11)$$

Donde: σ es sustituido por σ_A en las ecuaciones 1.9, y 1.10, σ_A es el esfuerzo aplicado sobre el material.

En la Figura 1.16, se muestran una serie de curvas: esfuerzo-deformación para distintas temperaturas y deformación-temperatura para un valor de carga constante, obtenidas empleando el modelo de la ecuación 1.11.

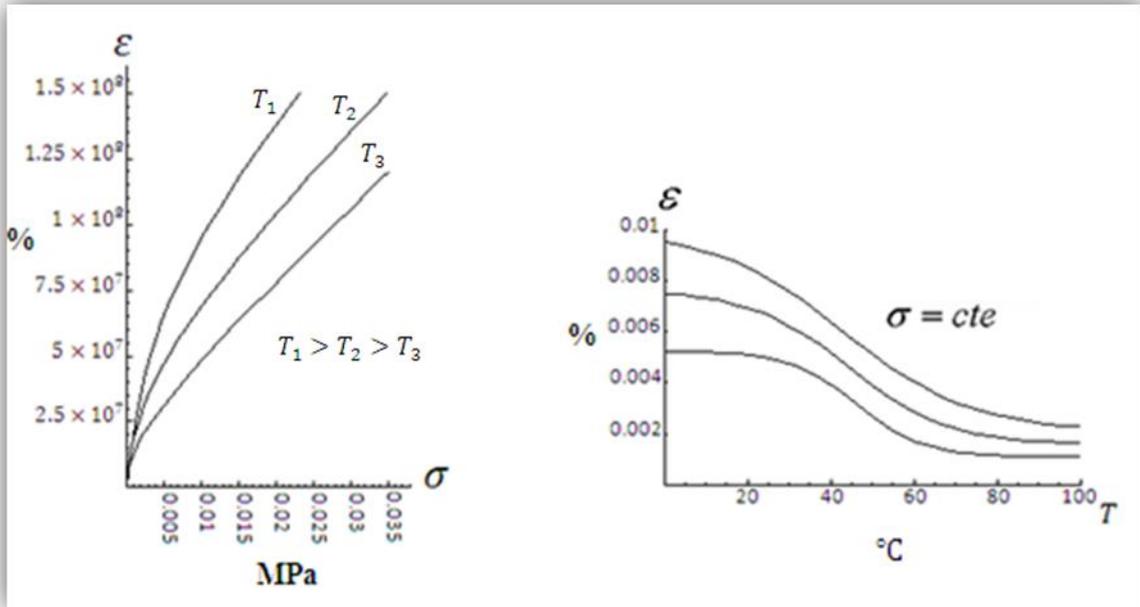


Figura 1.16 Comportamiento según el modelo propuesto por Cortés [34].

Como se puede ver el modelo se acerca al comportamiento que se describen en la Figura 1.15.

CAPÍTULO 2. SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE MOVIMIENTOS.

2.1.- Mecanismos.

La teoría de máquinas y mecanismos (TMM) es una ciencia aplicada que trata de las relaciones entre la geometría y el movimiento de los elementos de una máquina o un mecanismo, de las fuerzas que intervienen en estos movimientos y de la energía asociada a su funcionamiento [29].

Este capítulo estará dedicado a conocer los elementos necesarios para llevar a cabo el diseño de detalle de un dispositivo que aproveche el comportamiento de los materiales con memoria de forma. Ya que en el diseño se pueden observar dos condiciones críticas que son: el comportamiento del MMF (ya mencionado en el Capítulo 1) y la teoría y análisis de mecanismos (al que se dedica la presente sección).

2.1.1.- Conceptos en la teoría de máquinas y mecanismos.

Algunas de las definiciones de los conceptos utilizados en la teoría de máquinas y mecanismos son:

Máquina: Aun cuando ni los especialistas en el tema han llegado a una definición clara y única de este concepto, debido entre otras razones, a su gran complejidad y a los diferentes enfoques que se le puede dar a la propia máquina. En el diccionario de la Lengua Española, máquina es cualquier artificio que sirve para aprovechar, dirigir o regular la acción de una fuerza. Según Rouleaux [30], máquina es una combinación de sólidos resistentes, dispuestos de manera que obligan a las fuerzas de la naturaleza a efectuar un trabajo, produciéndose ciertos movimientos, respuesta en función de movimientos de entrada ejecutados y previstos. Modernamente, la máquina se considera el resultado de un diseño en el que intervienen dos grupos de factores: unos de naturaleza puramente mecánica (las piezas y los mecanismos que la constituyen) y otros de naturaleza no mecánica (estética, impacto social, régimen político imperante, mercados, etc.).

Ambos factores hacen que las máquinas modernas adquieran diversas configuraciones y características según el entorno sociopolítico y económico en el que se diseñan, construyen y se utilizan [30]. Se puede concluir que para este trabajo una máquina es un sistema concebido para realizar una tarea determinada que comparta la presencia de fuerzas y movimiento y, en principio, la realización de un trabajo.

Mecanismo:

- Es una cadena cinemática en la que se han inmovilizado uno de sus miembros. A este miembro fijo se le llama bastidor. Este concepto de miembro fijo requiere importantes matizaciones: por ejemplo, puede haber una máquina compuesta por varios mecanismos, en la que un miembro móvil en uno de ellos sea el bastidor o miembro fijo de otro de sus mecanismos [30].
- Conjunto de elementos mecánicos que hacen una función determinada en una máquina. El conjunto de las funciones de los mecanismos de una máquina ha de ser el necesario para que esta realice la tarea encomendada [29].
- Es un dispositivo para transformar un movimiento en otro [32].

- Es una combinación de piezas de materiales resistentes cuyas partes tienen movimientos relativos restringidos [31].

De las definiciones anteriores se puede concluir que un mecanismo es un medio para transmitir, controlar o limitar el movimiento relativo, sin embargo los movimientos que son resultado de fenómenos eléctricos, magnéticos o neumáticos son excluidos del concepto de mecanismo [31]. Así mismo, una máquina es una combinación de cuerpos rígidos o resistentes conectados de tal forma que se mueven con movimientos relativos específicos, transmiten fuerza y por lo tanto realizan trabajo.

La diferencia entre una máquina y un mecanismo es que la máquina transforma energía para realizar un trabajo mientras que los mecanismos no necesariamente cumplen esta función. En general, una máquina está compuesta de varios mecanismos.

Grupo o unidad: conjunto diferenciado de elementos de una máquina. (A veces grupo se utiliza como sinónimo de máquina).

Elemento: toda entidad perteneciente a una máquina o mecanismo que se le considera como unidad.

Eslabón: es una pieza rígida de una máquina o un componente de un mecanismo. Si el elemento se considera rígido, no puede haber movimiento relativo entre dos puntos del eslabón.

Miembro: elemento material de una máquina o mecanismo que puede ser sólido rígido, sólido flexible o fluido. En la contabilización de los miembros de un mecanismo no se debe olvidar, si existe miembro fijo a la referencia de estudio, que recibe diferentes nombres según el contexto: base soporte, bancada, bastidor, etc.

Cadena cinemática: conjunto o subconjunto de miembros de un mecanismo enlazados entre sí. Los miembros de una cadena cinemática se denominan eslabones [29].

- Cadena cerrada o anillo: cadena cinemática tal que cada uno de sus miembros está enlazado con dos miembros de la misma cadena.
- Cadena abierta: cadena cinemática que no tiene ningún anillo. En la Figura 2.1 se observa la diferencia entre estas dos cadenas cinemáticas.

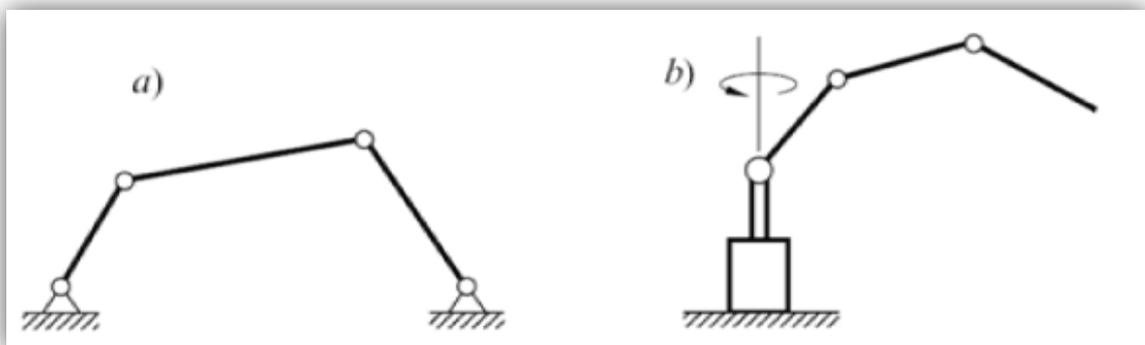


Figura 2.1. Cadena cinemática a) cerrada y abierta b). [29]

Junta. Ligadura entre dos miembros de un mecanismo que realiza mediante elementos intermedios, como puede ser una junta elástica, una junta universal, etc.

Movilidad. Número de grados de libertad de un mecanismo. Son el número de parámetros de entrada que se deben controlar independientemente, con el fin de llevar al mecanismo a una posición en particular.

Par cinemático. Enlace entre dos miembros de un mecanismo causado por el contacto directo entre ellos y que puede ser puntual, según una recta o según una superficie. En la materialización del enlace pueden participar sólidos auxiliares de enlace, por ejemplo, las bolas en una articulación con movimiento. Los pares cinemáticos suelen clasificarse en dos categorías: pares cinemáticos inferiores y superiores [29, 31, 32]

Pares cinemáticos inferiores: son aquellos en los cuales el contacto entre dos eslabones se realiza a través de una superficie. En la tabla 2.1 se muestran los seis tipos de pares inferiores: revoluta o giratorio, prismático, helicoidal, cilíndrico, esférico y plano.

Tabla 2.1. Los seis pares inferiores [29].

Pares cinemáticos inferiores.	
<p>Par giratorio o de revoluta. Sólo permite rotación relativa y posee un solo grado de libertad.</p>	
<p>Par prismático. Solo permite movimiento relativo de deslizamiento y posee un solo grado de libertad.</p>	
<p>Par de tornillo o helicoidal. Cuenta con un solo grado de libertad porque los movimientos de deslizamiento y rotación están relacionados por el ángulo de hélice de la rosca.</p>	
<p>Par cilíndrico. Permite tanto rotación angular como un movimiento de deslizamiento independiente. Tiene dos grados de libertad.</p>	
<p>Par esférico. Es una articulación de rótula. Posee tres grados de libertad, una rotación en torno a cada uno de los ejes coordenados.</p>	
<p>Par plano. Permite dos desplazamientos y una rotación, por consiguiente, tiene tres grados de libertad.</p>	

Pares cinemáticos superiores: en los cuales el contacto entre los dos eslabones se realiza a través de una línea o punto. Como ejemplos se pueden mencionar: dientes de engranes acoplados, una rueda que gira sobre un riel, una bola que rueda sobre una superficie plana, una leva con su seguidor.

Carga. Conjunto de fuerzas conocidas, función del estado mecánico y explícitamente del tiempo, que actúa sobre los miembros del mecanismo. Las cargas pueden ser muy diversas.

2.1.2 Esquematización.

Con el fin de simplificar el estudio de los mecanismos, nunca se dibujan estos en su totalidad, con la forma y dimensiones de cada uno de sus miembros y pares, si no que se sustituye el conjunto por un esquema, formado generalmente por los ejes de los diferentes miembros (o por las líneas de unión de cada una de sus articulaciones). Estas articulaciones no se dibujan por regla general (aunque a veces se representan por pequeños círculos) [29, 31].

En todo el estudio que sigue, y para unificar la nomenclatura, se denominara siempre al miembro fijo de cualquier mecanismo con el número 1, numerando todos los demás miembros por orden creciente, con números sucesivos.

A las articulaciones fijas (unión de un miembro móvil con el bastidor) se le denomina con la letra O , y los subíndices que indican los miembros que se unen. Por ejemplo, la unión del miembro 4 con el bastidor se representa por O_{14} .

Las articulaciones móviles se designaran por letras mayúsculas, sin subíndice (A , B , C , etc.).

Cuando se va a realizar el estudio de un mecanismo conviene obtener una representación gráfica que incluya las características suficientes. Dependiendo de la información que se desee se pueden realizar uno u otro de los esquemas:

- Si la información que se quiere presentar es únicamente la de los componentes del mecanismo, se puede realizar un diagrama de bloques.
- Si se quiere estudiar las posibilidades de movimiento de un mecanismo, se requiere un esquema con los símbolos normalizados UNE-EN ISO 3952. En la Tabla 2.2 se muestran algunos de los símbolos utilizados para la esquematización.
- Si el estudio que se requiere realizar es geométrico o cinemático, es necesario añadir al esquema de símbolos, información de la ubicación de los pares cinemáticos respecto cada miembro. Como por ejemplos las distancias entre centros o la de ángulos entre direcciones.
- Si se está estudiando la dinámica del mecanismo se deben incluir las características inerciales de los elementos, así como las de las cargas con las que actúan.

Tabla 2.2. Representación simbólica de algunos elementos según la norma UNE-EN ISO 3952

par de revolución o articulación	<p>movimiento plano entre barras con el suelo</p> <p>movimiento en el espacio</p>	leva plana de rotación	<p>con articulación fija</p>
par prismático o guía-corredera		leva plana de traslación	
par helicoidal		palpadores	<p>de traslación de rotación</p> <p>plano </p> <p>de rodillo </p> <p>puntual </p> <p>curvo </p>
par cilíndrico			
par plano			
par esférico o rótula esférica			
junta universal		ruedas dentadas	<p>cilíndrica exterior cilíndrica interior cónica</p>
corredera con articulación		transmisión por ruedas de fricción	
par guía-botón			
unión rígida entre miembros		transmisión por ruedas dentadas (engranajes)	<p>cilíndrico cónico hipoide</p>
articulaciones enmedio de barras			

- Identificar los miembros y pares cinemáticos sobre el mecanismo real, la maqueta, dibujo o fotografía que se tenga.
- Situar los símbolos de los pares en un dibujo, de manera que su disposición espacial se aproxime a la real, y unir mediante segmentos –barras– o superficies poligonales los que pertenecen a un mismo miembro. Algunas veces, si la complicación del mecanismo lo requiere, se pueden esquematizar primero cada uno de los miembros por separado –con los pares cinemáticos que contienen– y juntarlos posteriormente en otro dibujo. En todo caso, hace falta obtener un dibujo comprensible y puede ser necesario a veces partir el esquema y utilizar la misma identificación para los miembros y enlaces compartidos.

2.1.3. Movilidad de un mecanismo.

Si se cuenta con el esquema de un mecanismo se puede encontrar una relación que permita conocer el número de grados de libertad. Para obtener la movilidad del mecanismo se puede tomar en cuenta que:

- Un eslabón de un mecanismo plano posee tres grados libertad antes de conectarse.
- Siempre hay un eslabón fijo en un mecanismo
- De los puntos anteriores puede verse que un mecanismo tiene $3(n-1)$ grados de libertad antes de conectarse.
- Si se conectan dos eslabones con un par que tenga un grado de libertad, se aplican restricciones a los eslabones conectados.
- Al conectarse dos eslabones con un par que tenga dos grados de libertad se obtiene una restricción.
- Cuando las restricciones de todas las articulaciones se restan del total de grados de libertad de los eslabones no conectados se encuentra la movilidad del mecanismo conectado.

Para obtener la movilidad m de un mecanismo con n número de eslabones se utiliza la siguiente expresión:

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2 \quad (2.1)$$

Donde j_1 es el número de pares con solo un grado de libertad, j_2 es número de los pares con dos grados de libertad. A esta ecuación se le conoce como el criterio de Kutzbach para la movilidad de un mecanismo plano.

Cuando se unan tres eslabones a un mismo perno se deben contar dos articulaciones y no solo una, si se unen cuatro eslabones a un solo perno se deben contar tres articulaciones y no solo dos. Este resultado puede comprobarse obteniendo los grados de libertad que restringen a un perno que conectan tres o cuatro eslabones que se encuentran libres en el plano.

El valor de la movilidad m da información acerca de las características del movimiento del mecanismo:

- Si $m > 0$ el mecanismo tiene m grados de libertad. Por ejemplo, si $m = 1$ el mecanismo necesita un movimiento de entrada, si $m = 2$ el mecanismo necesita dos movimientos de entrada.
- Si $m = 0$ el mecanismo no se puede mover y se forma una estructura.
- Si $m < 0$ el mecanismo forma una estructura con restricciones redundantes.

Se debe tener en cuenta que la simplicidad del criterio de Kutzbach [29,31] puede conducir a resultados incorrectos, en la Figura 2.2 se muestra un ejemplo, en el inciso a) de la figura el criterio de Kutzbach describe que el mecanismo en realidad es una estructura. En b) el mecanismo representado es de tipo doble paralelogramo que si tiene movimiento sin embargo el criterio lo sigue considerando una estructura.

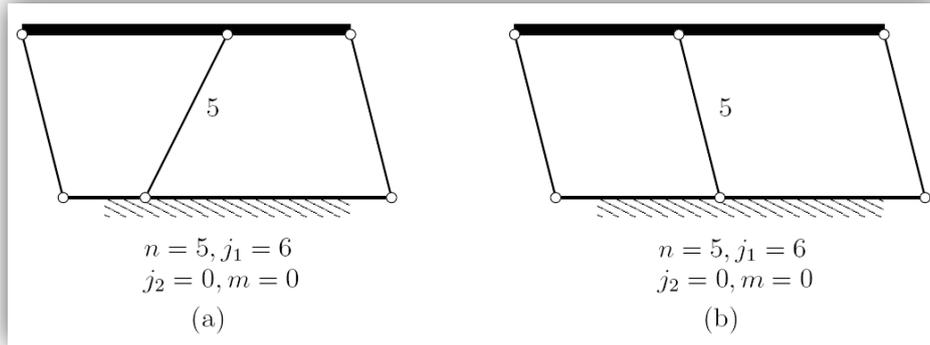


Figura 2.2. Falla del criterio de Kutzbach [31]

La razón por la que el criterio de kutzbach falla es porque no toma en cuenta las longitudes de los eslabones.

Existe un segundo criterio de movilidad con el nombre de criterio de Grübler [29,31] y se aplica únicamente a mecanismos con un solo grado de libertad donde $m = 1$.

Al sustituir $i_2 = 0$ y $m = 1$ en la ecuación de Kutzbach se encuentra el mecanismo de Grübler para mecanismos planos con movimiento restringido.

$$3n - 2j_1 - 4 = 0 \quad (2.2)$$

El criterio de Grübler permite ver que:

- Un mecanismo con $m = 1$ que usa solo articulaciones con un grado de libertad no puede tener un número impar de eslabones.
- El mecanismo más simple posible de este tipo es uno de cuatro barras.

Para los mecanismos de cuatro barras existe una prueba muy sencilla para saber si en el eslabón de entrada puede girar una revolución completa: La ley de Grashof [31]. Esta afirma que para un eslabonamiento plano de cuatro barras la suma de las longitudes más corta y más larga no puede ser mayor que la suma de las longitudes de los dos eslabones restantes, si se desea que exista una rotación continua entre estos dos elementos.

$$s + l \leq p + q \quad (2.3)$$

Donde:

l es la longitud del eslabón más largo.

s es la longitud del eslabón más corto.

p y q son las longitudes de los otros dos eslabones.

La ley de Grashof especifica que uno de los eslabones, en particular “ s ” girará continuamente solo cuando se satisface la igualdad anterior, de lo contrario ningún eslabón efectuara una revolución completa respecto con otro. Conviene mencionar que esta ley no especifica el orden en que se conectan los eslabones y cuál de ellos es el fijo.

2.2.- Mecanismos planos.

Una forma común de clasificar los mecanismos es en base a los movimientos en sus eslabones, de ahí se tiene que pueden ser planos, esféricos y espaciales.

Los mecanismos esféricos son los que tienen en cada eslabón algún punto estacionario y otro que describe un movimiento esférico. El ejemplo más conocido de este tipo de mecanismo es la junta de Hooke. Los eslabonamientos esféricos son los que se componen solo de pares de revoluta. Los mecanismos espaciales no tienen restricción alguna en los movimientos relativos de los eslabones. Un ejemplo es cualquier mecanismo que contenga un par de tornillo ya que el movimiento es helicoidal. Los mecanismos planos tienen gran versatilidad de aplicación, por esta razón en el presente trabajo se emplea un mecanismo de este tipo para llegar a un prototipo.

Los mecanismos planos son aquellos en los que sus eslabones describen curvas en un solo plano o en planos paralelos [31]. Puede pensarse en ellos como mecanismos bidimensionales. Ejemplos de mecanismos planos son la leva y su seguidor, un mecanismo de cuatro barras, uno de biela-manivela, etc. La mayoría de los mecanismos son del tipo plano. Cuando un mecanismo plano utiliza solo pares inferiores se le conoce como eslabonamiento plano y solo puede incluir revolutas y pares prismáticos. Existe una infinidad de mecanismos formados exclusivamente por los pares antes mencionados que no son planos: transmisiones mediante engranes cónicos, la junta de cardan, levas cilíndricas, etc. Por lo tanto, deben existir otras restricciones que conciernen a la disposición u orientación de los ejes de los pares cinemáticos y que en conjunto con las anteriores, aseguran que el mecanismo formado es plano. Estas restricciones se indican a continuación:

1. En un mecanismo plano constituido por pares de revoluta, todos los ejes de rotación deben ser paralelos.
2. Si un par de revoluta se sustituye por un par prismático, el eje de desplazamiento del par prismático debe ser perpendicular a los ejes de rotación de los restantes pares de revoluta.
3. Si en un mecanismo plano se incluye un par de leva, el eje de rotación del par de leva debe ser paralelo a los ejes de los restantes pares de revoluta y el eje de la traslación debe ser perpendicular a los ejes de rotación de los restantes pares de revoluta.

Para el estudio de los mecanismos planos, en la esquematización, es necesario hacer coincidir el plano del dibujo con el del movimiento, y dibujar todos los miembros en un mismo plano, aunque realmente estén en planos paralelos. De otra manera, la representación se complica innecesariamente. Se debe tener presente que esta representación plana de los mecanismos no es adecuada para hacer su estudio dinámico completo [29]. En la figura 2.3 se muestra la esquematización de un mecanismo con planos paralelos.

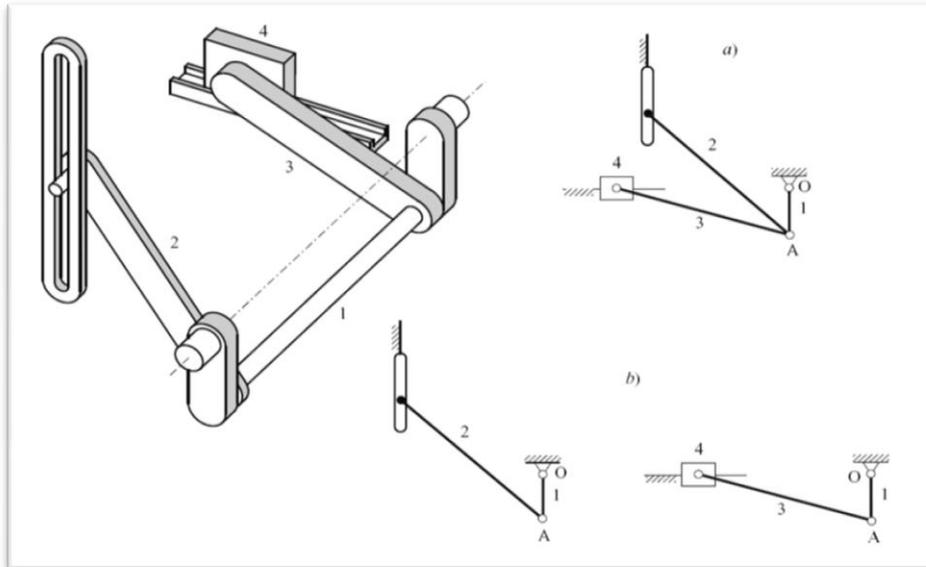


Figura 2.3 Mecanismo de barras y esquema de símbolos, a) completo y b) partido en dos [1].

El primer paso para el análisis o diseño de un mecanismo es encontrar el número de grados de libertad o movilidad de un mecanismo. La movilidad de un mecanismo es el número de parámetros de entrada que se deben controlar independientemente, con el fin de llevar al mecanismo a una posición en particular.

2.3.- Análisis cinemático de mecanismos.

Se le llama cuerpo rígido al que estando en movimiento uniforme o en reposo, puede, bajo la acción de alguna fuerza, cambiar su posición u orientación instantáneamente. El cambio de la posición de un cuerpo rígido es una medida relativa, pues se observa respecto a otro cuerpo. La cinemática de un mecanismo es el estudio de movimiento relativo entre varios eslabones de un mecanismo o máquina, descuidando los efectos de inercia y las fuerzas que causan el movimiento. Cuando se estudia la cinemática del mecanismo, el movimiento de un eslabón a menudo se mide con respecto a otro eslabón fijo o a un marco de referencia, que no necesariamente está en reposo.

Es decir, el análisis cinemático de los mecanismos se refiere al estudio del movimiento de los mismos (desplazamientos, velocidades, aceleraciones y sobreaceleraciones de puntos y miembros constituyentes) sin atender para nada a la causa que produce tales movimientos. Se trata por consiguiente de un análisis totalmente geométrico del movimiento [29, 31, 32].

En general el problema cinemático de mecanismos se plantea del modo siguiente: dado un mecanismo (número de miembros, número de pares y dimensión de los miembros) y conocido el movimiento de uno de los miembros el conductor (en caso que tenga un solo grado de libertad), o de n miembros (para mecanismos con n grados de libertad), determinar el estado de movimiento (velocidades y aceleraciones) del miembro de salida y de todos los demás puntos que sean necesarios, así como los demás puntos de peculiar interés. Aparte de ello, también comprende el problema de análisis posicional (de interés en este trabajo), es decir determinar la posición de cada miembro del mecanismo, conocida la del miembro de entrada.

Este análisis debe ser considerado como un medio para llegar a resolver el problema tanto directo como inverso, así como para comprobar la síntesis del mecanismo.

El análisis cinemático del mecanismo puede realizarse por diversos métodos según la forma de solución: [30]

1. Método gráfico.
2. Método analítico.
3. Métodos numéricos.

Los métodos gráficos han sido los más antiguos en su aparición, y los tradicionalmente empleados. Ello fue debido a que los planteamientos analíticos conducen generalmente a sistemas de ecuaciones no lineales, de gran dificultad de cálculo. A pesar de que actualmente estas dificultades analíticas han sido salvadas por la aparición de computadoras, los métodos gráficos no pueden decirse que hayan quedado obsoletos. En efecto, estos presentan ventajas tales como:

- Son muy intuitivos, por lo que se alcanza una profunda comprensión del movimiento de los mecanismos.
- Son fáciles de aplicar.
- No requieren del empleo de herramientas de cálculo complicadas.
- Tienen alto valor pedagógico.

Por el contrario, representan los siguientes inconvenientes.

- Son métodos posicionales.
- Requieren en un alto tiempo de resolución.
- No siempre se obtienen soluciones deseadas en todo caso se hace preciso acudir a soluciones muy particulares.
- Las soluciones vienen acompañadas de errores de dibujo.

Los métodos analíticos de empleo más moderno, se apoyan de la ciencia matemática y de la computación. Estos métodos han alcanzado gran desarrollo y presentan grandes Ventajas.

- Permitan el análisis en ciclo completo.
- Permiten planteamientos generales.
- Precisión.

Las desventajas son:

- Requieren de un tiempo mayor en comparación con otros métodos para llegar a la solución.
- Tienen poco campo de aplicación debido a la complejidad de las ecuaciones involucradas.

Al realizar un análisis cinemático y dinámico de un mecanismo, se recurre a los principios de la mecánica clásica para llegar a una solución empleando un método numérico.

Las herramientas que se disponen para los cálculos son, fundamentalmente, las relaciones trigonométricas básicas, algunas consideraciones geométricas básicas, las leyes de Newton, la cinemática del sólido rígido y la resolución analítica de ecuaciones diferenciales. Con estos medios se está en condiciones de abordar la mayor parte de los problemas que aparecen en el estudio clásico de la teoría de máquinas. Aunque el planteamiento de los problemas por los métodos analíticos tradicionales es relativamente directo y la resolución puede volverse tremendamente compleja. Por ejemplo la deducción de la ecuación del movimiento de un mecanismo biela-manivela, se lleva a cabo en un tiempo breve, pero la posterior resolución de la ecuación diferencial no lineal de segundo orden a la que se lleva es tremendamente complicada y, comúnmente se resuelve mediante un método numérico.

Ventajas:

- Gran capacidad para aproximar soluciones a ecuaciones de alto grado de dificultad.
- Son generales y no precisan de desarrollo de un conjunto de ecuaciones.
- Dan soluciones rápidas si se emplean ordenadores adecuados.

Desventajas:

- Requieren uso de ordenador.
- Resultados sujetos a cierto grado de error.
- Son métodos demasiado mecánicos y poco pedagógicos.

2.3.1.-Ramas de la cinemática de mecanismos.

Existen dos ramas de la cinemática de mecanismos; el análisis cinemático (cinemática directa) y la síntesis cinemática (cinemática inversa).

El análisis cinemático (cinemática directa) es el estudio de movimientos relativos asociados con los eslabones de un mecanismo o máquina, es un paso crítico para el diseño correcto de un mecanismo. Considerando de un mecanismo el movimiento de su eslabón de entrada, el desplazamiento relativo, la velocidad, la aceleración, etc., se pueden encontrar, de los demás eslabones las mismas variables. Estas características se conocen considerando las restricciones impuestas por las uniones. El problema puede ser formulado por el gráfico, vector, la matriz, u otros métodos matemáticos. Se puede considerar que solo se sustituyen los valores de entrada para conocer el comportamiento de los eslabones que componen el mecanismo.

La síntesis de cinemática (cinemática inversa) es el problema inverso del análisis de cinemático. En este caso, el diseñador es desafiado para crear un nuevo mecanismo que cumpla con ciertas características de movimiento deseadas de un eslabón de salida. En este caso se tienen que resolver a menudo un sistema de ecuaciones no lineales [32].

2.3.2 Análisis de posición de mecanismos con salida rotacional.

Siguiendo el objetivo de este trabajo, es conveniente analizar mecanismos que tengan salida rotacional, poniendo importancia en el análisis de la posición que toma el eslabón de salida al tener un cambio de configuración en el eslabón de entrada. Lo anterior es debido a que para desarrollar los dispositivos que se presentan posteriormente, se emplearon alambres fabricados con un MMF los cuales son sometidos a tensión y a temperatura variable y proporcionan un movimiento longitudinal alternativo como salida.

2.3.3 Síntesis de mecanismos.

En la teoría de máquinas y mecanismos se diferencian el análisis y la síntesis de mecanismos. El análisis consiste en estudiar la cinemática y la dinámica de un mecanismo según las características de los elementos que lo constituyen. La síntesis de un mecanismo consiste en escoger y dimensionar un mecanismo que cumpla o tienda a cumplir, con cierto grado de aproximación, unas exigencias de diseño dadas [32].

La síntesis de mecanismos es, entonces, una tarea perteneciente al diseño de detalle que se trata en el último capítulo. La selección del mecanismo en este capítulo vincula la geometría y el dimensionamiento, de esta forma se encuentra el mecanismo adecuado para un movimiento propuesto. Cuando existen restricciones espaciales severas, se debe hallar una alternativa inicial factible para su posterior análisis y optimización [33]. A continuación se mencionan algunos mecanismos que pueden aprovechar el movimiento longitudinal producido por algún MMF.

Yugo escocés

Con este mecanismo se pueden obtener movimientos lineales a partir de un movimiento rotatorio a la entrada del mecanismo, sin embargo no es posible invertir la relación de estos movimientos ya que la geometría del mecanismo restringe el desplazamiento longitudinal. Si se pretendiera tomar como entrada el desplazamiento longitudinal se presentarían una serie de complicaciones para lograr la salida rotacional del mecanismo, por esta razón el movimiento angular del eslabón de salida no alcanza 360 grados.

El movimiento rotacional que se obtendría con un mecanismo de este tipo puede tener aplicaciones donde no se requiera un giro continuo, por ejemplo, se pueden calcular sus dimensiones para poder abrir o cerrar válvulas o para accionar cerraduras. En la Figura 2.4 se muestra este mecanismo.

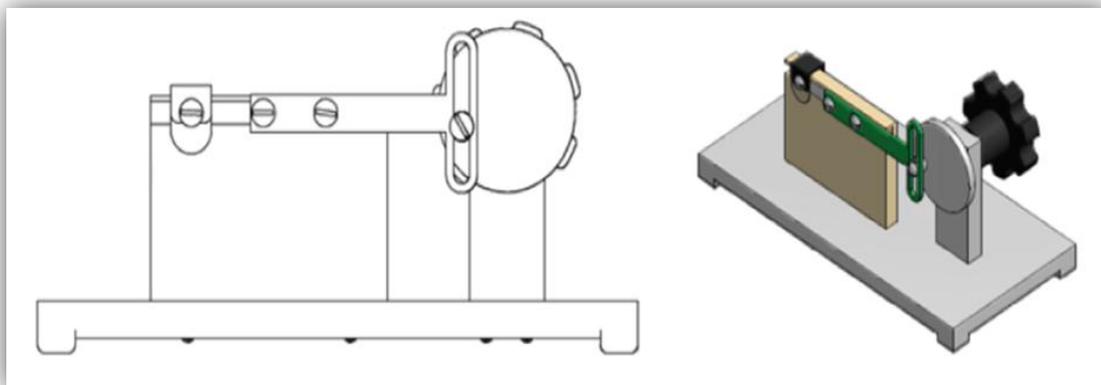


Figura 2.4. Mecanismo yugo escoses.

Es posible simplificar o incluso reducir costos, al intercambiar algunos de estos elementos por el mecanismo accionado por el alambre con MF.

Mecanismo de retorno rápido.

Como se discutió en el capítulo 1, la transformación del material depende de la temperatura y el esfuerzo al que esté sometido el alambre. Un criterio de diseño importante en un mecanismo donde se utilizan el alambre con MF, es la rapidez con la que el alambre se calienta y se enfría el material. Si el calentamiento se realiza mediante una corriente eléctrica, es posible controlarlo de manera que esto ocurra en un tiempo breve sin embargo el enfriamiento se realiza por convección por lo que toma más tiempo. Para simplificar un poco este efecto puede resultar conveniente emplear un mecanismo de retorno rápido donde durante el enfriamiento el mecanismo debe recorrer un ángulo menor que en el calentamiento. Un arreglo de este tipo se podría utilizar en un dispositivo contador o despachador en el que se requiera de movimientos continuos y controlados. En la Figura 2.5 se muestra un mecanismo de retorno rápido acoplado con un biela-manivela-corredera.

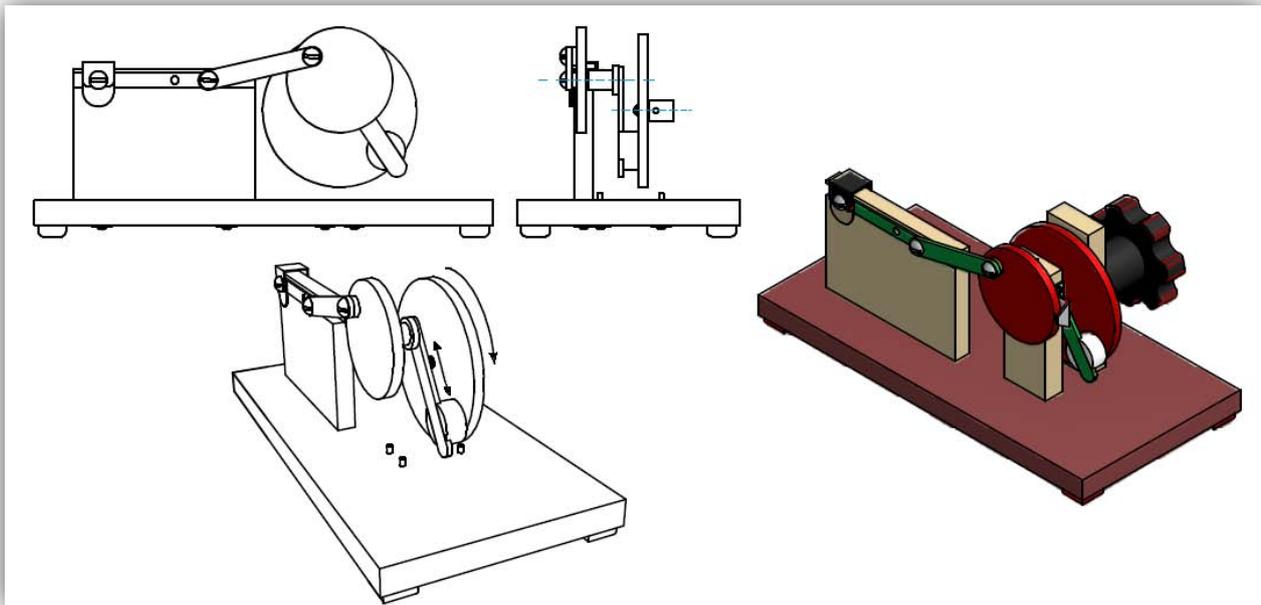


Figura 2.5. Mecanismo de retorno rápido.

Biela-manivela-corredera.

En el caso del mecanismo biela-manivela-corredera, que es el mecanismo utilizado en el prototipo que se obtuvo en el presente trabajo, el desplazamiento longitudinal que recibe la corredera, proveniente del alambre, será aprovechado por la manivela para realizar el giro. En la figura 2.6 se muestra el mecanismo.

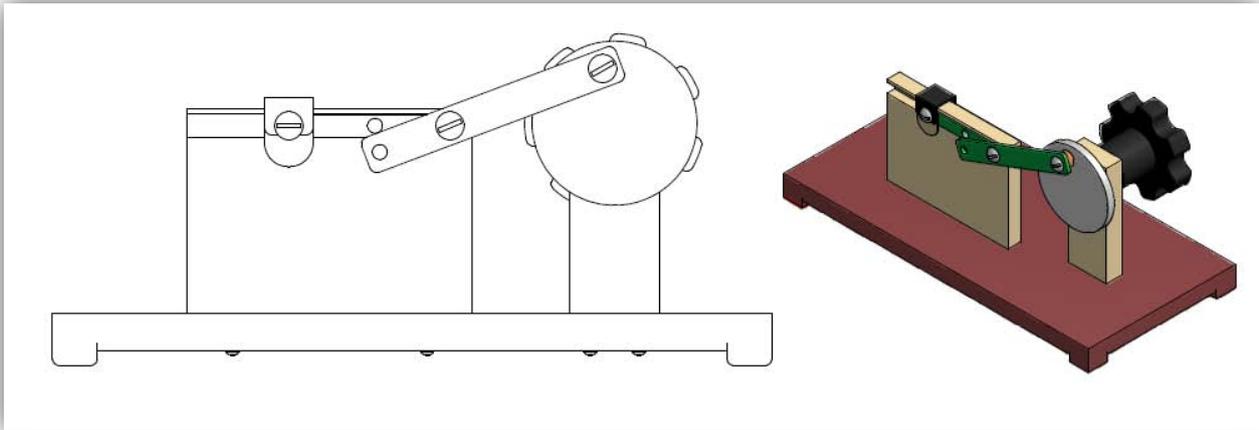


Figura 2.6. Mecanismo biela-manivela-corredera

La configuración de este mecanismo permite obtener una revolución completa en el eslabón de salida si se diseñan apropiadamente las dimensiones de los eslabones. Dicha característica permitió el desarrollo del prototipo de un motor usando el desplazamiento que se obtiene con los alambres de Ni-Ti. En el capítulo 4 se explican con detalle cada uno de los criterios de diseño que se utilizaron.

Conjunto de biela-manivela-corredera y cuadrilátero articulado.

En caso de que el mecanismo biela-manivela-corredera proporcionara a la salida, una oscilación angular en lugar de una revolución completa sería necesario acoplar otro mecanismo que la convirtiera en un revolución completa. Para realizar dicha conversión, el mecanismo más apropiado sería un cuadrilátero articulado. El arreglo de ambos mecanismos acoplados se muestra en la Figura 2.7.

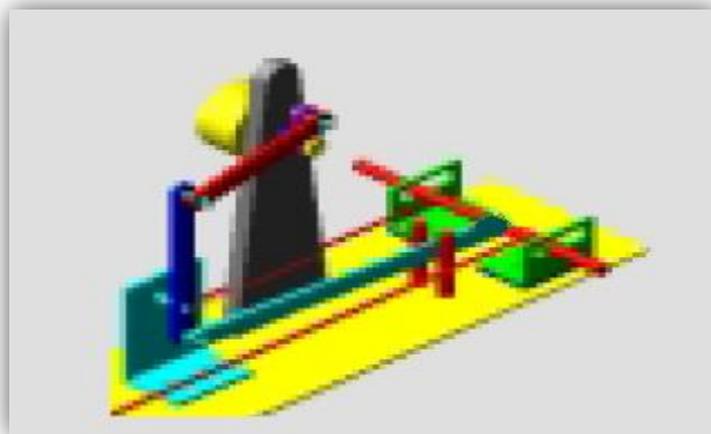


Figura 2.7 Conjunto de biela-manivela-corredera y cuadrilátero articulado

Es importante mencionar, que en un trabajo reportado en la literatura [34], se diseño de un termo-actuador similar al que se propone en el presente trabajo. Dicho dispositivo, que se muestra en la Figura 2.8, está constituido por los siguientes elementos: a) dos alambres fabricados con una aleación con memoria de forma, b) un resorte helicoidal,

c) un mecanismo biela-manivela corredera acoplado a un cuadrilátero articulado. Como se puede ver en la Figura 2.8, en dicho dispositivo, los alambres se encuentran extendidos y se aprovecha la contracción longitudinal de los mismos acoplándolos directamente a la corredera. Como se discute posteriormente, en el dispositivo que se propone en el presente trabajo se emplea sólo un alambre y un mecanismo lo cual constituye una mejora respecto al termo-actuador ya descrito.

El funcionamiento del termo-actuador [34] es idéntico al del motor que se presenta más adelante; cuando los alambres con memoria de forma son calentados, por encima de su temperatura crítica A_s^σ , se contraen debido a que sufren una transformación martensita-austenita. Dicha contracción comprime el resorte helicoidal y a través del mecanismo dicho desplazamiento es convertido en un giro de 180° en el eslabón de salida. De manera análoga, cuando los alambres son enfriados el eslabón de salida del cuadrilátero completa un giro de 360° .

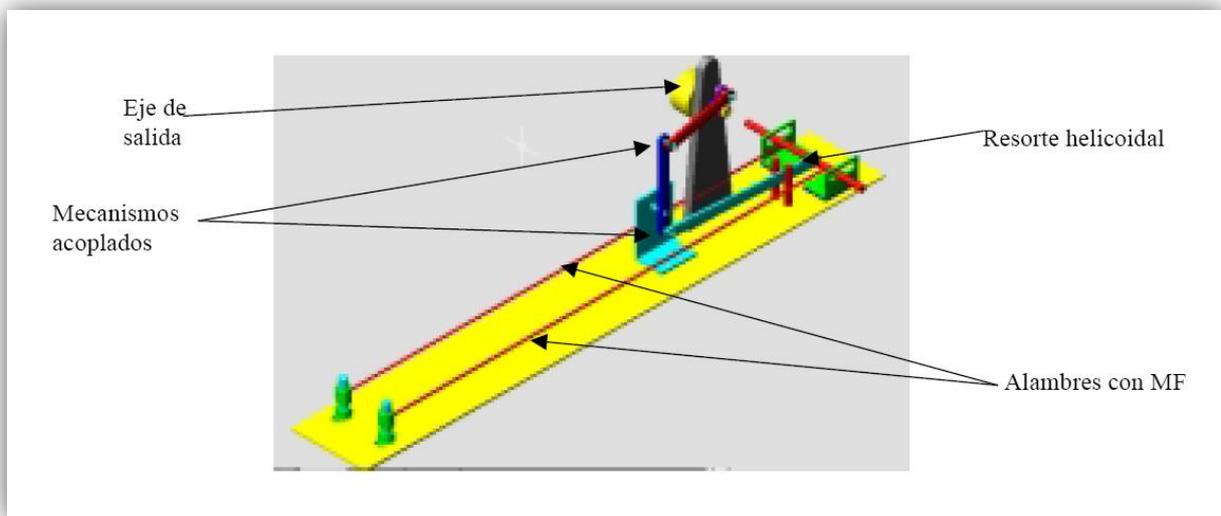


Figura 2.8. Temo-actuador

Por otro lado, es posible que además de los mecanismos ya mencionados se puedan emplear sistemas de conversión de movimiento, por ejemplo, que aprovechen el desplazamiento longitudinal del alambre para desbalancear una masa de tal manera que se obtenga movimiento circular.

El sistema, que se muestra en la Figura 2.9, presenta un arreglo en el cual se induce dicho efecto, es decir, debido a la contracción de un alambre con memoria de forma, se induce el desbalance de uno de los brazos con lo que se rompe el equilibrio del volante y se produce un desplazamiento rotacional. Como se discute más adelante éste arreglo es propuesto para aprovechar la energía térmica contenida en los gases de escape de un motor de combustión interna.

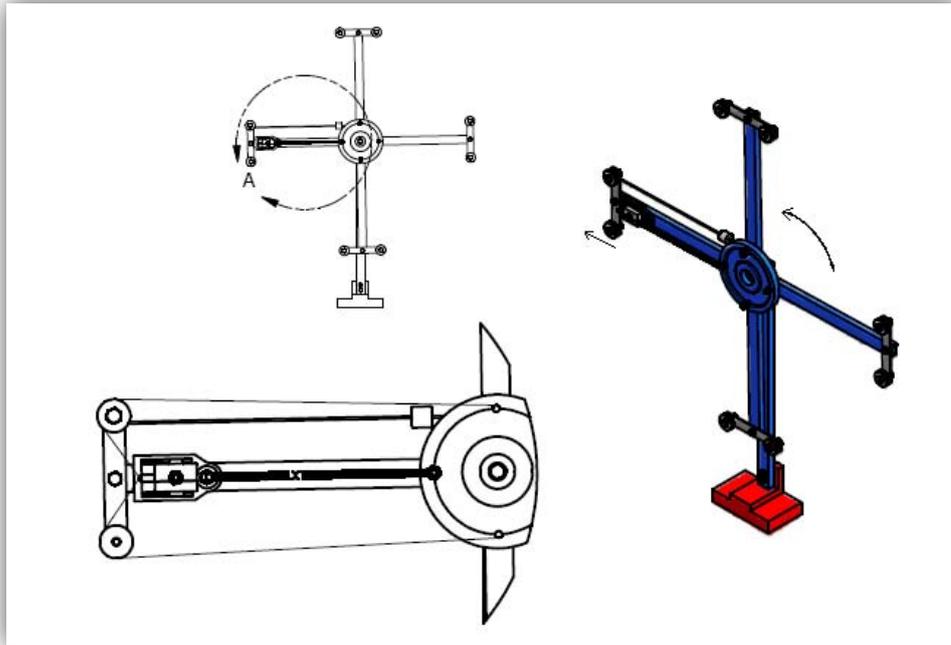


Figura 2.9. Sistema de desbalance de masas.

En la siguiente sección se presenta el diseño conceptual de un dispositivo y la realización de un arreglo para pruebas en el laboratorio. Así mismo, en capítulo 4 se exponen los criterios de diseño empleados para obtener el prototipo y los resultados del arreglo.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE MECANISMOS PARA EL APROVECHAMIENTO DE LA DEFORMACIÓN GENERADO POR UN ALAMBRE CON MF.

Como ya se menciona en la primera parte del presente trabajo, los materiales con memoria de forma (MMF) también llamados materiales inteligentes, poseen propiedades que los diferencian de los materiales convencionales. Estas propiedades hacen que el proceso de diseño con materiales deba ser modificado. [35] En este tipo de aleaciones es necesario dejar de considerar al material solo como un elemento pasivo ya que se puede emplear como sensor y actuador. Para llegar a un nuevo proceso de diseño con los MMF es necesario estandarizar los parámetros que los caracterizan. Dicha estandarización se logra comprendiendo su comportamiento. Una vez concebido el proceso de diseño para estos materiales, la importancia industrial de los MMF aumentaría considerablemente.

En la comunidad científica se conocen estos materiales, pero no es así con los diseñadores e ingenieros de diseño. Pues se sabe de la existencia de estas aleaciones desde hace 60 años, sin embargo, desde hace 30 aparecen las primeras aplicaciones, que en gran parte son en el campo de la medicina. Como se puede ver el progreso en el desarrollo de aplicaciones ha sido lento, debido a que se conoce el origen y los mecanismos que dan lugar a las propiedades de memoria de forma, no pudiendo decir lo mismo de los aspectos ingenieriles, ya que, a pesar de que se cuentan con algunos modelos que describen su comportamiento no son suficientes para estandarizar un proceso para el desarrollo de aplicaciones industriales.

Los parámetros de diseño utilizados para este tipo de materiales, son diferentes a los utilizados para la mayoría de los materiales funcionales, es decir, parámetros de diseño como son el límite elástico, la resistencia máxima, el módulo elástico, la ductilidad, entre otros, son reemplazados por propiedades o parámetros tales como: tensión de recuperación, velocidad de recuperación, temperatura de transformación, histéresis térmica, etc. [35] Por lo que el diseñador necesita recurrir a la investigación, esto se refleja en un tiempo y coste elevados. Razón por la cual se recurre a tecnologías convencionales y no se proponen soluciones con los MMF.

En el presente trabajo se considera el comportamiento en tensión de alambres con MF para llegar al diseño de un dispositivo y al planteamiento de un prototipo capaz de recuperar energía de desecho provenientes de maquinas térmicas, este último, tiene el fin de obtener parámetros de diseño para el dispositivo. Ya que los modelos descriptivos del proceso de diseño generalmente hacen énfasis en la importancia que tiene el generar un concepto de solución en una etapa inicial del proceso. Esta solución inicial se somete a un análisis, evaluación y mejora en base a diferentes criterios ya planteados. Es común que en la etapa de evaluación se encuentren diferentes fallos, lo que en ocasiones lleva a considerar la factibilidad de la solución, sin embargo, algunos de estos fallos pueden ser rectificadas y de esta forma mejorar la solución propuesta. Al comenzar el ciclo del proceso de diseño nuevamente, se cuenta con mayor experiencia con lo que se espera seguir la dirección correcta en el diseño.

3.1.-Motor con alambres de Ni-Ti.

Como se mencionó anteriormente, empleando un alambre de Ni-Ti con memoria de forma y un mecanismo biela-manivela se construyó el prototipo de uno de los dispositivos desarrollados. Dicho dispositivo puede ser considerado como un motor, debido a que convierte energía térmica, que es la que produce la contracción de los alambres, en energía mecánica útil ya que a la salida entrega un movimiento circular continuo.

El objetivo de este motor es obtener giros continuos utilizando el comportamiento de los materiales con memoria de forma al someterse a una carga y variación de la temperatura. Se busca crear un prototipo, donde mediante el análisis y síntesis de un mecanismo se aproveche el comportamiento de los MMF.

Este motor tiene aplicaciones en sistemas donde se requiera sustituir motores eléctricos por actuadores termo-mecánicos para realizar alguna acción determinada. Los alambres con memoria de forma se activan con fluctuaciones térmicas que pueden ser inducidas por distintos medios, ya sea pulsos eléctricos o bien por alternancia de fuentes de enfriamiento y calentamiento. La Figura 3.1 es una curva deformación-temperatura a esfuerzo constante que presentan los MMF. El efecto que muestra esta curva sugiere que es posible realizar trabajo mecánico aprovechando fluctuaciones térmicas. Como se puede ver en la gráfica, el material toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura, arrastrando una carga, es decir realizando trabajo mecánico, durante el calentamiento.

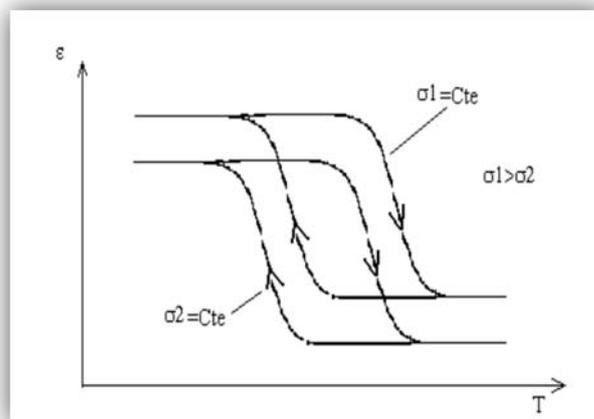


Figura 3.1. Comportamiento Deformación-Temperatura a carga constante, observado en los MMF

Como se mencionó en la sección 1.1, durante el calentamiento el MMF, en este caso el alambre de Ni-Ti, debe alcanzar una temperatura mayor a la temperatura de transformación austenítica (A_s), y deberá ser enfriado hasta una temperatura menor a la temperatura de transformación martensítica (M_f) para completar el ciclo. Las fuentes de calentamiento o enfriamiento pueden ser medios líquidos o gaseosos. En el prototipo que se plantea se hace pasar corriente eléctrica a través de los alambres, de esta forma se asegura que el calentamiento del material es uniforme. No obstante, el enfriamiento se da por convección libre del aire, provocando que los intervalos de tiempo entre el calentamiento y el enfriamiento sean diferentes.

En la siguiente sección se expone el diseño conceptual del motor desarrollado en el presente trabajo. En dicha sección se describe el funcionamiento del mismo, así como la funcionalidad de las piezas que componen al mecanismo del prototipo. Posteriormente, se discutirá el diseño de detalle del dispositivo para lo cual es importante contar con modelos matemáticos que permitan conocer el comportamiento del MMF empleado para luego llegar a la síntesis del mecanismo. En el capítulo 1 se presentó una recopilación de modelos matemáticos, de los cuales se elegirá uno. Mientras que en el capítulo 2 se realiza una investigación bibliográfica para llegar a la síntesis del mecanismo a utilizar.

3.1.1-Diseño conceptual.

En la configuración propuesta para el motor con alambres de memoria de forma el alambre está dispuesto a lo largo de un arreglo con el que se obtiene un desplazamiento longitudinal, un mecanismo biela-manivela, es el que convierte dicho desplazamiento en un giro. El alambre con memoria de forma va sujeto a un resorte helicoidal fijo en uno de sus extremos y por el otro montado a la corredera, con su respectiva guía. Al ser calentado el alambre genera una elongación en el resorte y por consiguiente un desplazamiento de la corredera. En la figura 3.2 se muestra una vista superior del motor, en la que se distingue la posición de cada uno de los elementos mientras que en la explosión que se muestra en las Figuras 3.3 y 3.4 se observan las piezas del mecanismo. Cabe mencionar que el alambre se considera como un aditamento intercambiable, en caso de falla, por lo que no aparece en el despiece. Sin embargo, una vez ensamblado el dispositivo y puesto en marcha el alambre se coloca como se muestra en la Figura 3.5.

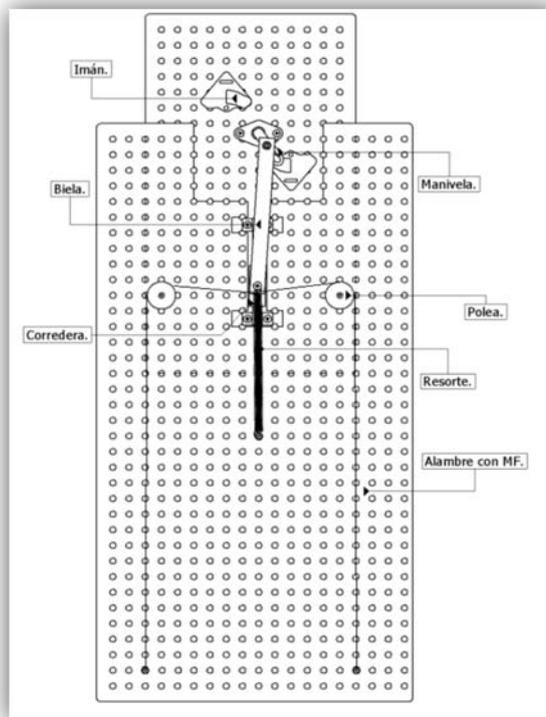
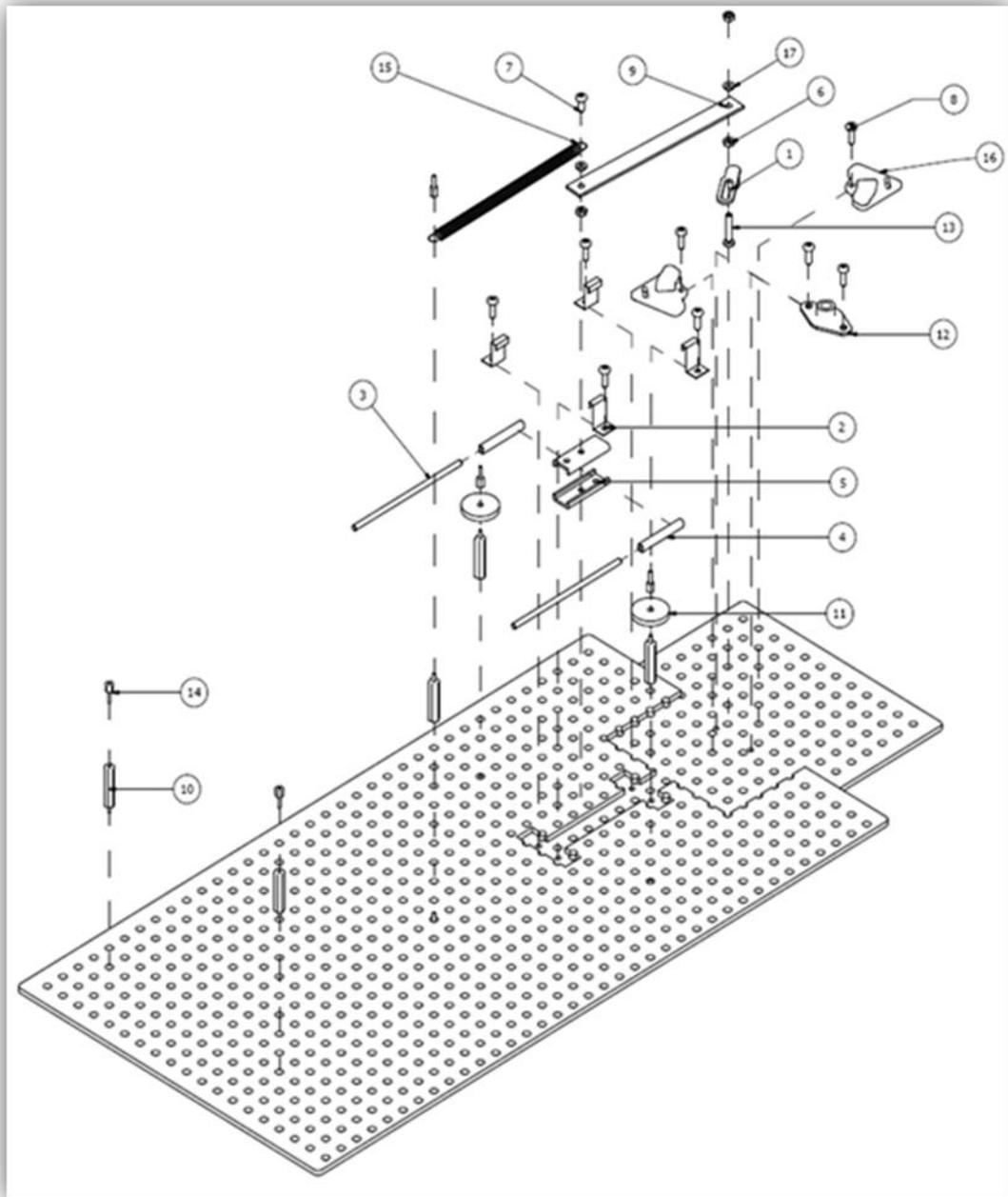


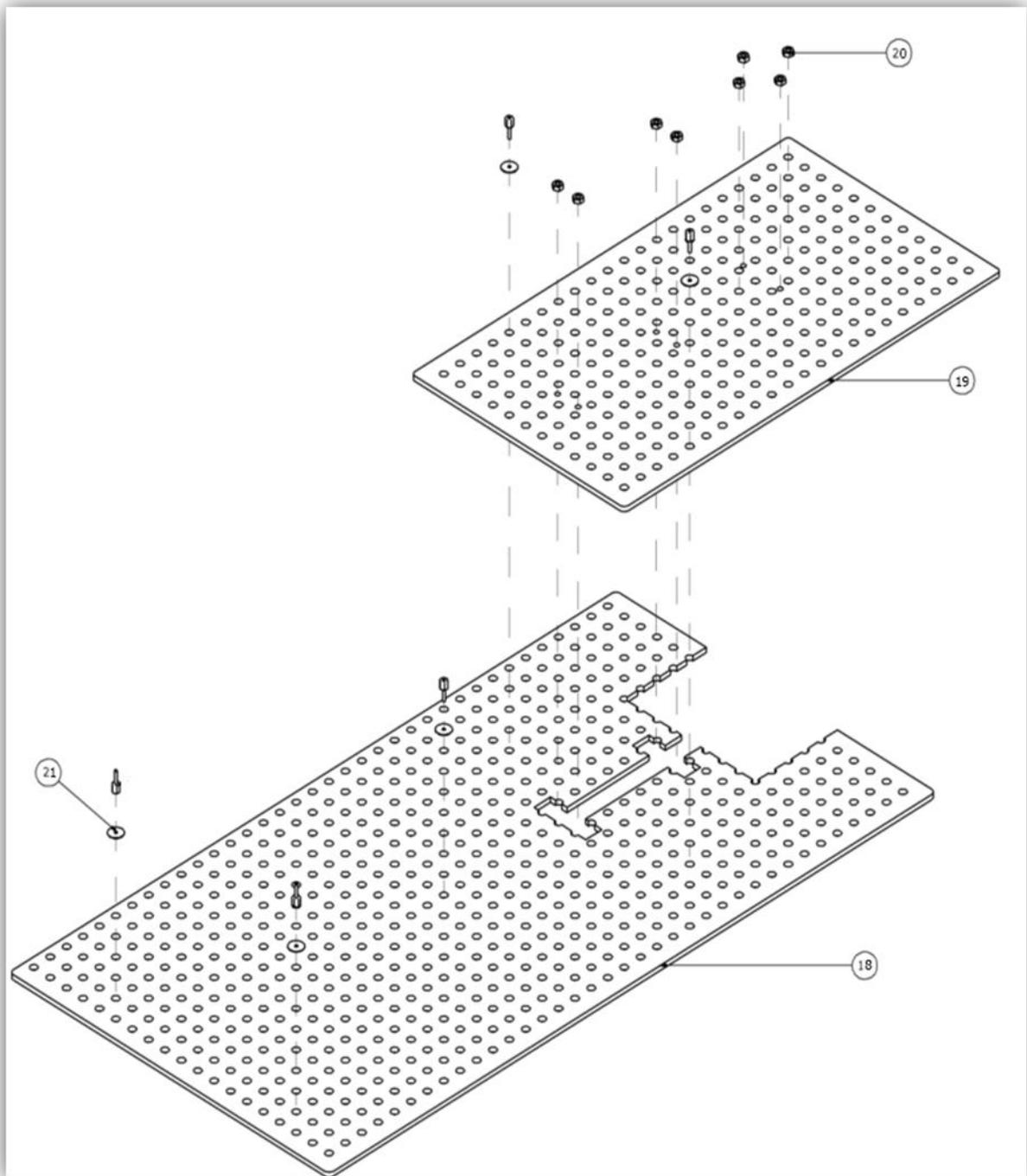
Figura 3.2. Disposición del alambre con memoria de forma y punto de partida de la corredera en el motor con alambres de Ni-Ti.



Lista de partes			
Pieza	Cantidad	Nombre	Descripción
1	1	Manivela	
2	4	Soportes	
3	2	Barra	
4	2	Buje	
5	2	Cubierta	
6	11	JIS B 1181-CLASE 1acabadoM3	Tuerca hexagonal
7	1	SFS 2976-M3 x 10	Tornillo para maquinaria de cabeza cilíndrica con ranura en cruz
8	8	SFS 2976-M3 x 8	Tornillo para maquinaria de cabeza cilíndrica con ranura en cruz

Lista de partes			
Pieza	Cantidad	Nombre	Descripción
9	1	Biela	
10	5	Poste	
11	2	Polea	
12	1	Soporte de manivela	
14	10	Sujetador	
15	1	Resorte	
16	2	Imán	
17	2	Buje plástico	

Figura 3.3 Despiece del motor con alambres de Ni-Ti (vista superior).



Lista de partes			
Pieza	Cantidad	Nombre	Descripción
18	1	Base superior	
19	1	Base inferior	
20	8	JIs b 1181 – Clase 1- acabadoM3	Tuerca hexagonal
21	5	Arandela	

Figura 3.4. Despiece del motor con alambres de Ni-Ti (vista inferior).

Como se aprecia en la Figura 3.5, el alambre con memoria de forma está dispuesto sobre el mecanismo de tal manera que esta atornillado en los postes (10) y pasa por las poleas (11) para hacer que la corredera tenga el desplazamiento lineal que se requiere.

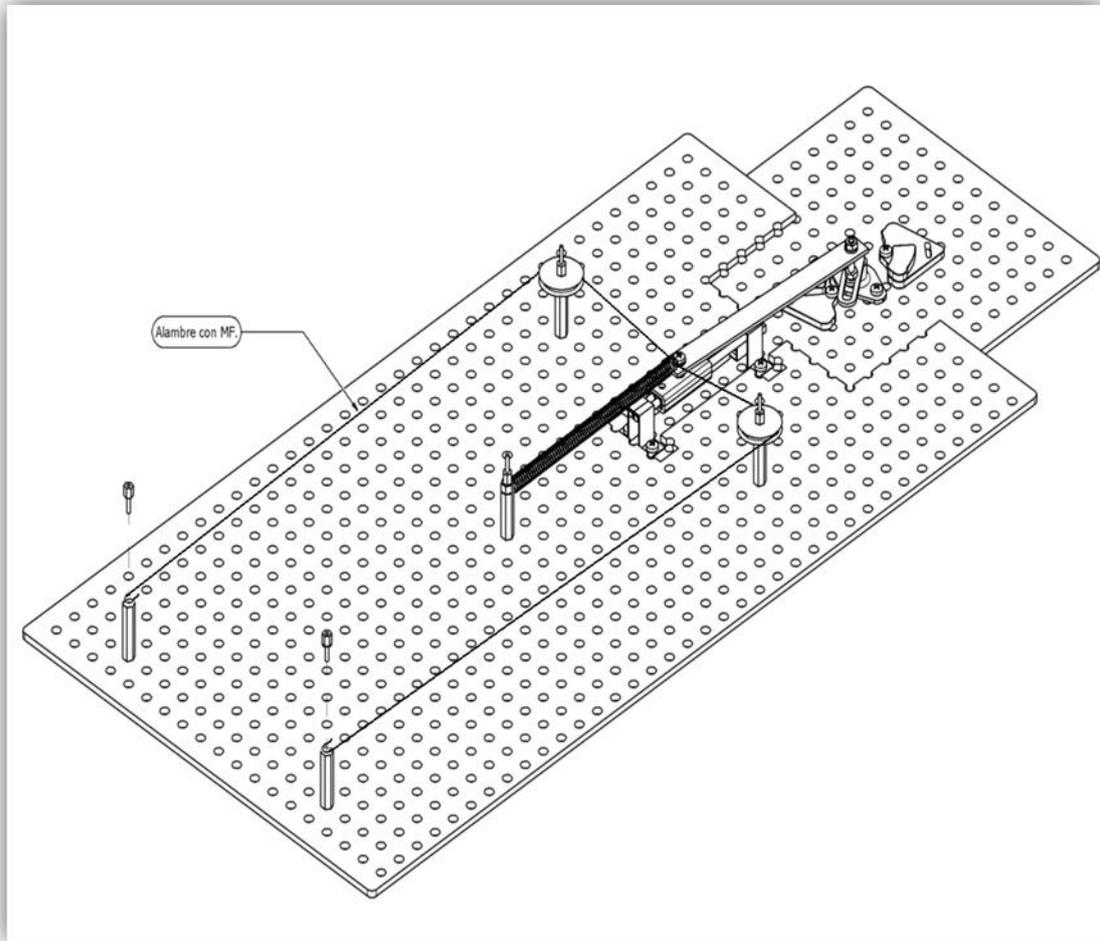


Figura 3.5. Ensamblaje del motor con alambres de Ni-Ti y posición del alambre (vista superior).

Como se sabe para que el alambre tenga el efecto deseado, este se debe calentar y enfriar. Para ello se cuenta con un circuito electrónico que hace circular una corriente eléctrica de manera intermitente cuyo funcionamiento será explicada más adelante. En la Figura 3.6, que es una vista inferior del dispositivo, se aprecia la conexión de los cables de suministro de corriente. En dicha Figura se puede apreciar que los mismos postes (10) que se encargan de sujetar el alambre sirven como conductor ya que por medio de los sujetadores (14) se atornillan los cables eléctricos. Aunque los cables del suministro eléctrico son de corriente directa, no es relevante el orden en la conexión ya que el alambre es considerado como una resistencia.

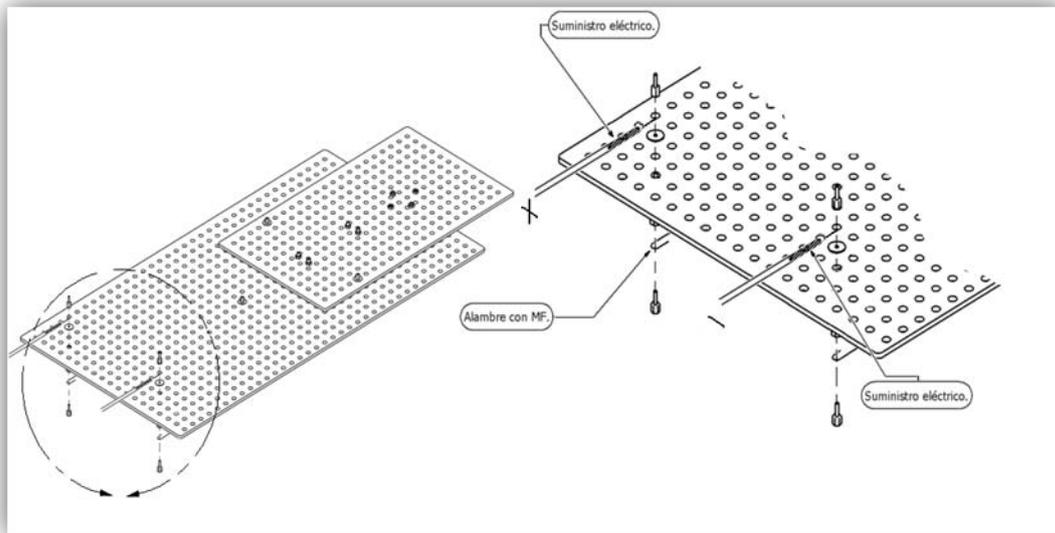


Figura 3.6 Ensamble y detalle de la conexión de los cables del suministro eléctrico (vista inferior).

En resumen los principales elementos del dispositivo, son básicamente tres; a) el circuito eléctrico generador de pulsos, b) el alambre con memoria de forma y c) el mecanismo biela-manivela-corredera. Dichos elementos se muestran en la Figura 3.7.

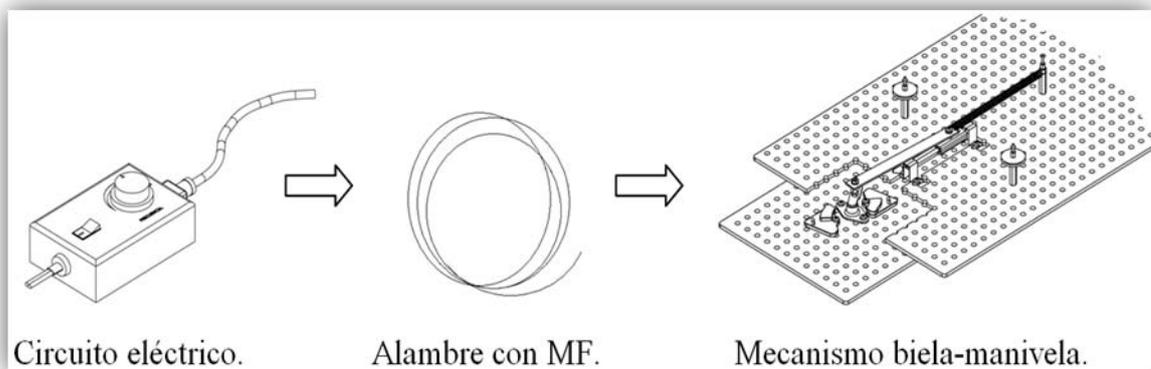


Figura 3.7. Principales elementos del motor con alambres de Ni-Ti.

En la Figura 3.7 se puede ver que el mecanismo biela-manivela-corredera está acompañado de un resorte helicoidal de extensión, cuya función es la de realizar el retorno en la corredera durante el enfriamiento del alambre. Como se mencionó anteriormente, el objetivo de este prototipo es realizar un giro completo en la salida del mecanismo aprovechando el efecto termo-mecánico del alambre lo cual no sería posible realizar sin la acción del resorte.

En la Figura 3.8 se muestra un ensamble completo del prototipo donde se aprecian las partes que lo componen. En la siguiente sección se da una descripción detallada del funcionamiento del dispositivo y la función que tiene cada elemento del mismo.

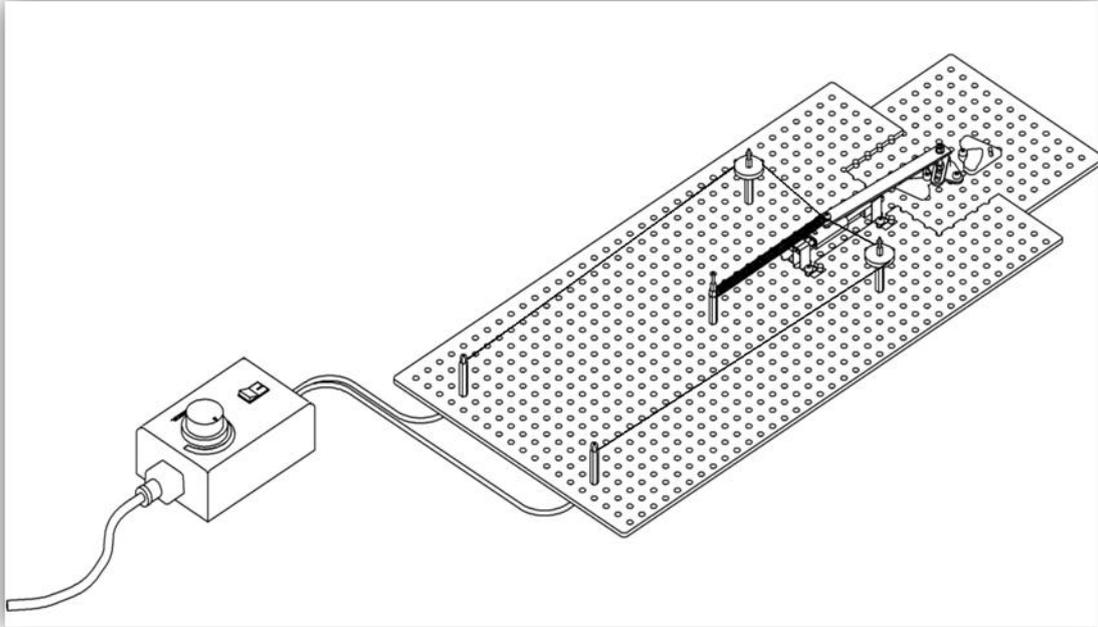


Figura 3.8. Motor con alambres de Ni-Ti.

3.1.2- Descripción del funcionamiento.

Las piezas que se describirán a detalle en esta sección son:

- 1) El tablero.
- 2) El alambre con memoria de forma.
- 3) EL mecanismo biela-manivela-corredera.
- 4) Los resortes helicoidales de tracción.
- 5) Los imanes.
- 6) Las poleas.
- 7) El circuito generador de pulsos de corriente.
- 8) Los Elementos accesorios.

Cada uno de estos elementos tiene una función particular que contribuye a aprovechar el comportamiento de alambre con memoria de forma. El objetivo final es generar un movimiento rotacional continuo a partir de las elongaciones y contracciones que experimenta el alambre al ser calentado y enfriado respecto a sus temperaturas críticas. Para lograrlo fue necesario acoplar los elementos mencionados de manera apropiada como se describe a continuación.

Tablero

La función del tablero es sujetar rígidamente todos los elementos del sistema a través de tornillos que los mantienen en una posición fija durante la operación del dispositivo. Este elemento debe ser lo suficientemente rígido para que no sufra deformaciones considerables debidas a las fuerzas que se general en el dispositivo durante su operación. Así mismo, el tablero debe permitir la colocación de tornillos para sujetar los elementos restantes del sistema. En la Figura 3.9 se muestra el esquema del tablero con algunas sus dimensiones.

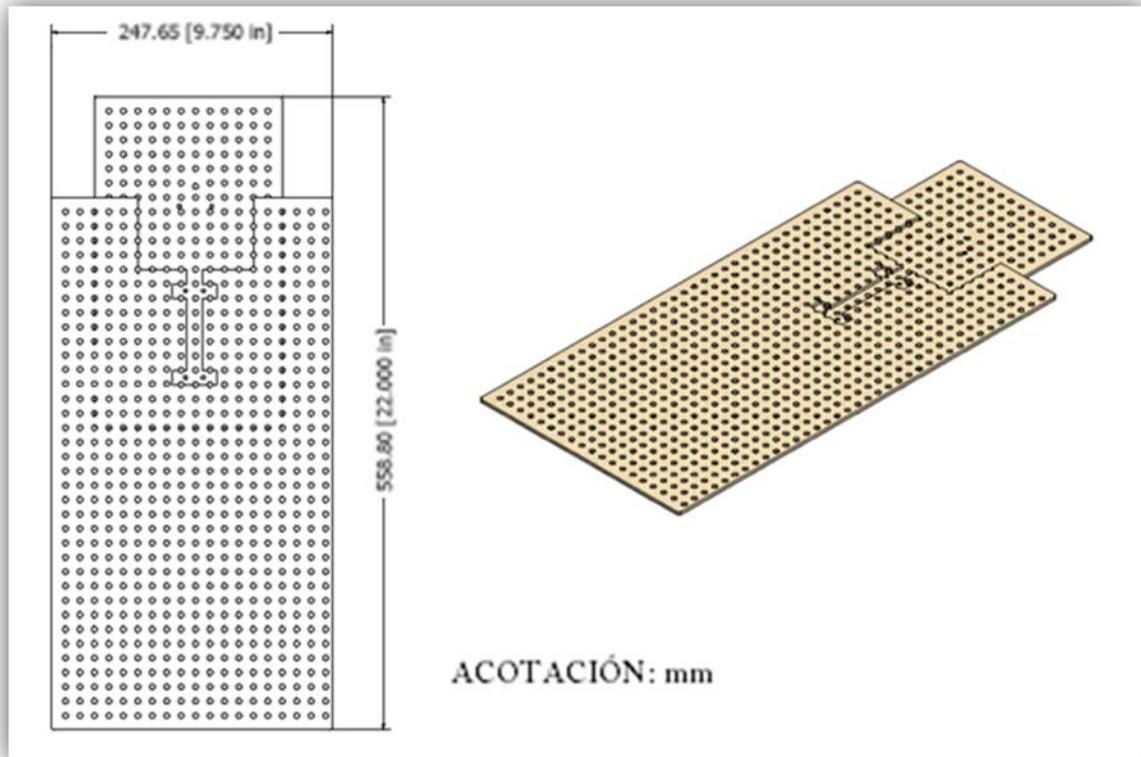


Figura 3.9 tablero del motor con alambres de Ni-Ti

Alambre con memoria de forma.

Este elemento del sistema constituye la parte medular del dispositivo ya que de su comportamiento se derivan los criterios de diseño. La función del alambre es brindar el desplazamiento longitudinal a la entrada del mecanismo biela–manivela–corredera. Este desplazamiento es debido a las fluctuaciones térmicas inducidas por una corriente eléctrica y a que en todo momento se encuentra sujeto a una fuerza proveniente de un resorte helicoidal que trabaja en tracción como se muestra en la Figura 3.10. Como se puede ver en dicha Figura, el alambre se encuentra fijo en sus dos extremos y pasa a través de dos poleas formando una configuración rectangular, de tal manera que el alambre no se extiende en toda su longitud en el tablero con lo que se ahorra espacio. Como se ve en la Figura 3.10, el tramo del alambre que se encuentra entre las dos poleas es el que se sujeta al resorte helicoidal con una tensión inicial. Al ser calentado el alambre, se contrae y genera una carga sobre el resorte que provoca una elongación adicional a la que presentaba inicialmente. Considerando lo anterior, es claro que el alambre no se encuentra sujeto a una carga constante sino que esta incrementa con la temperatura. Esta característica de la carga debe ser considerada en el diseño del dispositivo pues provoca que el intervalo de temperatura, en el cual el material sufre la transformación, sea mayor y la deformación total sea menor, que si estuviera sometido a una carga constante como se puede ver en los diagramas de la Figura 3.11.

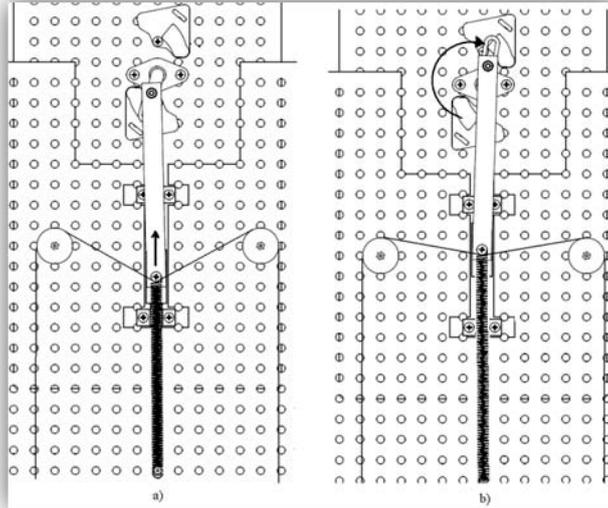


Figura 3.10 Carga sobre el alambre con memoria de forma.

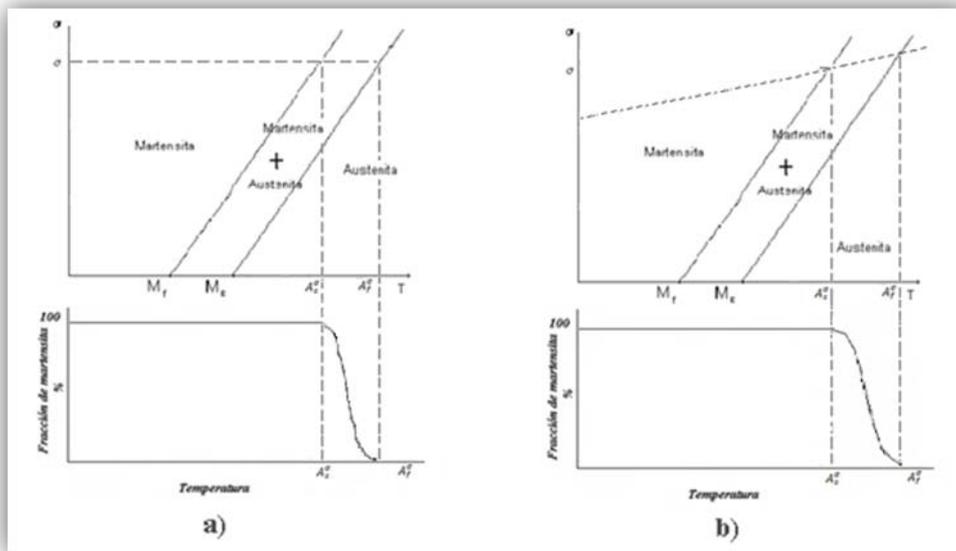


Figura 3.11 Diagramas de carga y transformación martensítica a) carga constante y b) carga variable.

Resorte.

Como se mencionó anteriormente, el resorte helicoidal se encuentra acoplado al alambre con memoria de forma en un extremo y en otro fijo al tablero como se muestra en la Figura 3.12. La función del resorte en el dispositivo, es mantener una carga sobre el alambre lo cual es indispensable para que se dé el efecto de contracción y elongación del mismo ya que el material empleado no fue sometido previamente a ningún proceso de educación [1]. Así mismo, el resorte tiene como fin hacer que regrese el alambre a la posición original al ser enfriado y complete la primera mitad del ciclo. La fuerza que produce el resorte es contraria a la reacción del alambre porque para completar la segunda mitad del ciclo el alambre deberá vencer esta fuerza. Cabe mencionar que las variaciones en la elongación del resorte dificultan la obtención de una velocidad constante en el giro lo cual es uno de los problemas que presenta el prototipo.

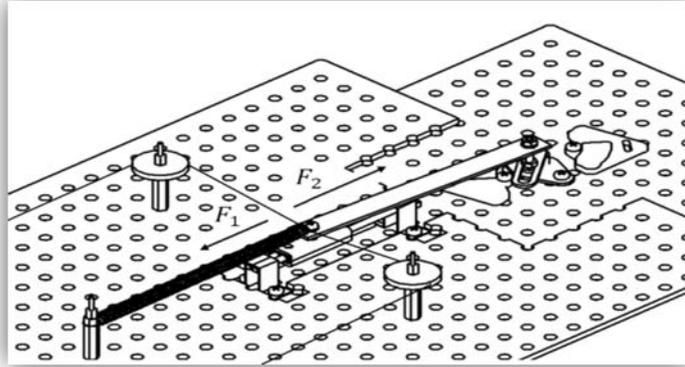


Figura 3.12. Acción del resorte y el alambre de Ni-Ti en la corredera del mecanismo.

En la figura anterior se muestra la fuerza que ejerce el resorte y la que ejerce el alambre F_1 y F_2 respectivamente. Durante el inicio del ciclo la temperatura se incrementa de manera que el valor de F_2 aumenta debido a la transformación de fase que sufre el material. El alambre se contrae y estira al resorte haciendo que el valor F_1 también se incremente. Durante el enfriamiento la contracción del alambre desaparece, disminuyendo F_2 y permitiendo que el resorte regrese a su posición original.

Así mismo en la Figura 3.12 se puede apreciar que el extremo del resorte que se acopla al alambre también es acoplado a la corredera del mecanismo que se describe a continuación.

Mecanismo biela-manivela-corredera.

El mecanismo biela-manivela-corredera que se emplea en el motor, tiene como función generar el movimiento rotacional a partir del movimiento longitudinal que genera el resorte y que es transmitido a este mecanismo a través de la corredera. En la Figura 3.13 se puede ver un dibujo de dicho mecanismo además de sus dimensiones gruesas. El movimiento rotacional del motor corresponde al eslabón de salida del mecanismo biela-manivela-corredera.

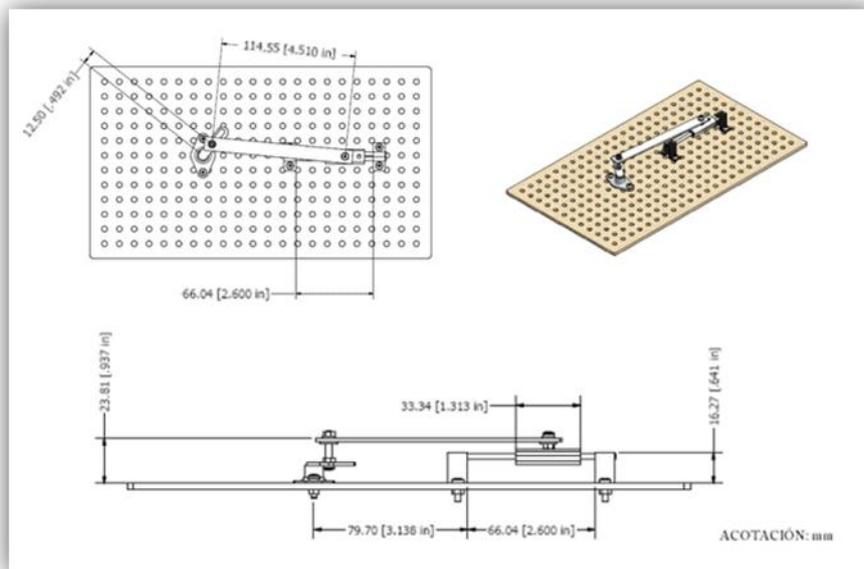


Figura 3.13 mecanismo usado en el motor con alambres de Ni-Ti.

Como se mencionó anteriormente, la primera mitad de una revolución a la salida del mecanismo se logra al calentar el alambre por encima de su temperatura crítica A_f^σ mientras que la segunda mitad del ciclo se completa cuando la temperatura del alambre es menor a M_s^σ . Como se discutió en el Capítulo 1, el comportamiento del alambre, y por ello el del dispositivo, está asociado a la transformación martensítica, inducida por la carga y la temperatura, que ocurre en el material. Cuando la temperatura es mayor que A_f^σ , el material se encuentra en fase austenítica mientras que cuando disminuye por debajo de M_s^σ , el material transforma a fase martensítica. En la Figura 3.14, se muestra un diagrama fracción volumétrica transformada-temperatura el cual se asocia a las posiciones extremas del dispositivo durante su operación.

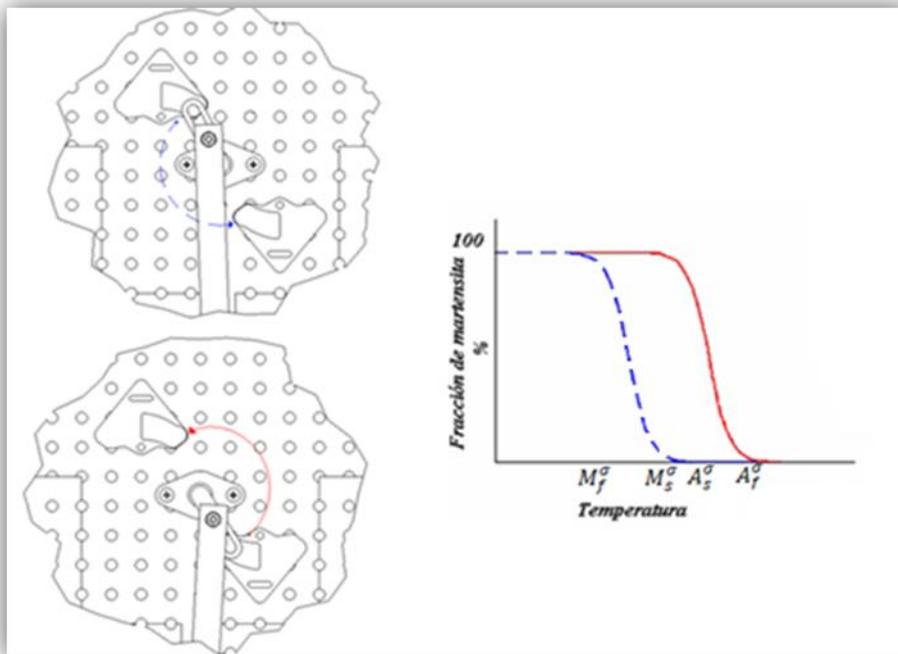


Figura 3.14 Relación entre el movimiento en la manivela y la transformación martensítica del alambre

Imanes.

Con el resorte y la acción del alambre se obtiene un desplazamiento completamente longitudinal. Este movimiento llega a la corredera haciendo que la manivela gire. En la manivela existen puntos críticos, estos se generan al quedar la fuerza del alambre o del resorte con una sola componente en el eje de giro. Para evitar el atascamiento del dispositivo, en este punto se usan imanes que ayudan a cambiar la posición. En la Figura 3.15a) se ve cómo actúa la fuerza del resorte. En este caso no se cuenta con imanes que posicionen la manivela. En la Figura 3.15b) los imanes se encargan de darle una nueva componente a la fuerza, esto cambia la posición de la manivela cada medio ciclo, es decir, en la primera mitad, cuando el resorte se encarga de regresar la corredera al punto de partida del mecanismo. Y en la segunda parte del ciclo cuando el alambre se calienta y desplaza linealmente la corredera. De esta forma se evita el atascamiento en el punto crítico.

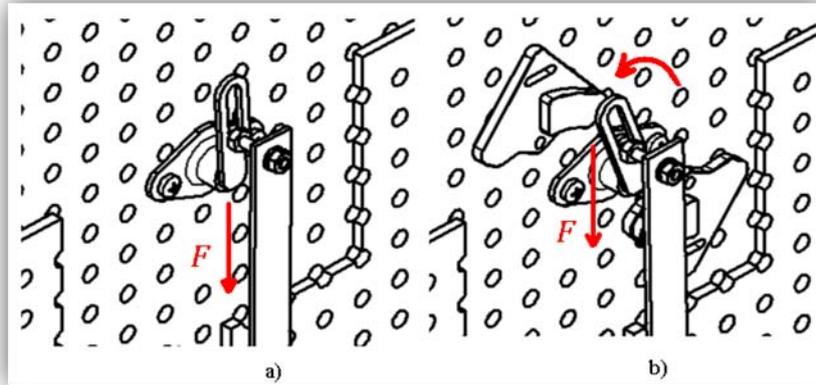


Figura 3.15. Acción de la fuerza en la manivela: a) sin imán y b) con imán que le da una nueva componente a la fuerza

Cabe mencionar que el sentido del giro se puede invertir cambiando la posición de los imanes como se muestra en la figura 3.16 y de esta forma se evita el atascamiento en el punto crítico.

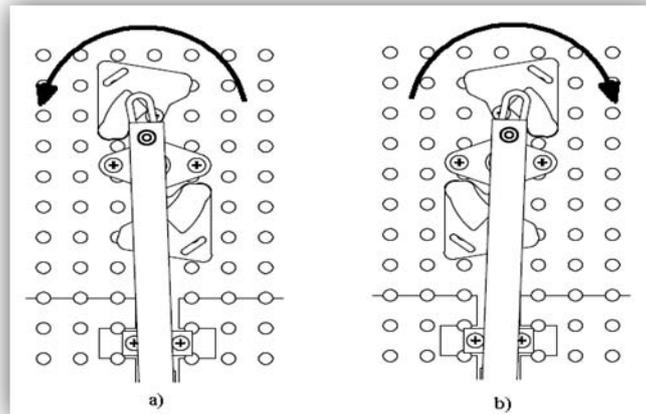


Figura 3.16. Sentido de giro de la manivela según la posición de los imanes, a) sentido anti horario y en b) sentido horario.

Poleas.

La acción de estas poleas es cambiar la dirección del alambre hacia la corredera. En la configuración que muestra en la figura 3.17 las poleas se mueven cuando el alambre se

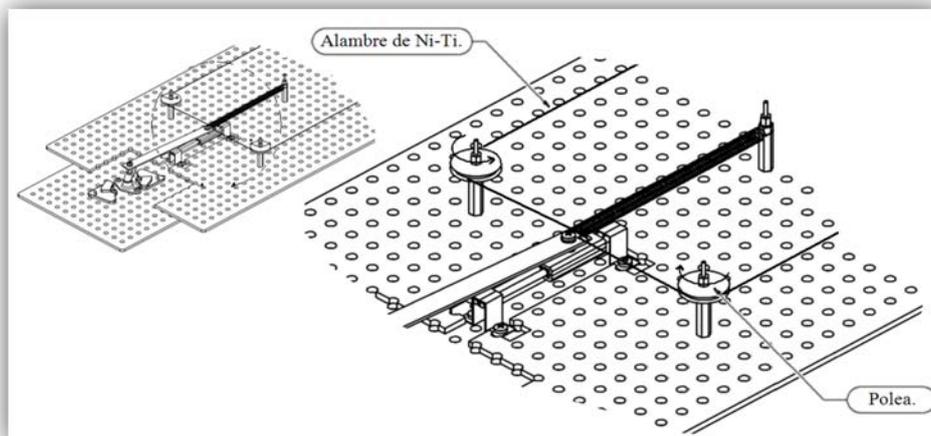


Figura 3.17. Función de las poleas en el motor con alambres de Ni-Ti.

contrae, esto permite que el material no tenga que deslizarse sobre una superficie al cambiar de dirección. De esta forma se reduce la fricción y el trabajo que realiza el alambre se aprovecha sobre la corredera. Aumentando de esta forma la eficiencia del motor.

Circuito eléctrico.

La parte encargada de suministrar la energía necesaria para el calentamiento es una fuente eléctrica, controlada por un circuito electrónico. Este circuito hace que el paso de la corriente sea intermitente, es decir, deja que la corriente eléctrica circule por el alambre en la primera mitad del ciclo y corta el suministro durante la segunda mitad dejando que el MMF se enfríe por convección natural. La fuente de energía es de 16V 400mA CD. En la Figura 3.18 se muestra la apariencia física del circuito electrónico y los controles para su uso.

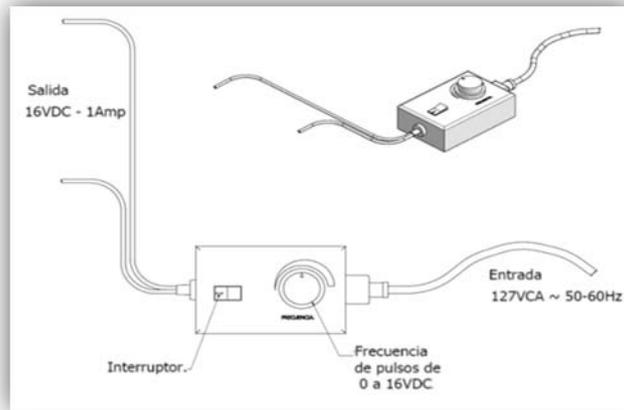


Figura 3.18 Controles del circuito electrónico.

Elementos accesorios.

Los elementos necesarios para sujetar al alambre, a los cables de alimentación y las poleas, son los postes y los sujetadores. En la Figura 3.19 se pueden ver algunas dimensiones, la ventaja que presentan dichos elementos es que permiten obtener la configuración del motor, ajustándose a partir de las dimensiones del mecanismo biela-manivela-corredera.

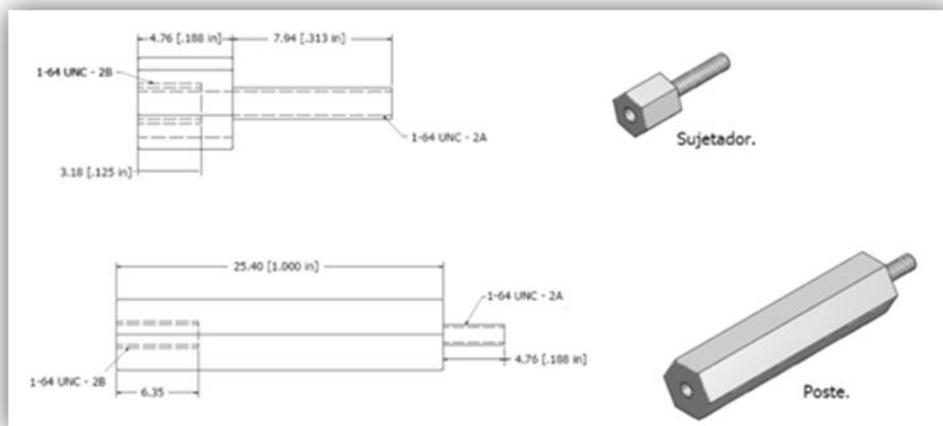


Figura 3.19 Elementos de sujeción.

A continuación se describe un arreglo para pruebas en el laboratorio. La finalidad de dicho arreglo es recabar parámetros para la realización de un futuro diseño: “Dispositivo recuperador de energía de desecho de máquinas térmicas convencionales”.

3.2.- Dispositivo recuperador de energía de desecho de máquinas térmicas.

El objetivo de este sistema es utilizar el comportamiento de los MMF para generar un movimiento con el que se pueda recuperar energía de los gases de desecho de un motor de combustión interna o aprovechar gradientes de temperatura. Como se verá más adelante, el alambre con MF se usa de manera similar que en el motor con alambres de Ni-Ti, sin embargo, el movimiento que se obtiene a la salida no posee los mismos parámetros. Para llegar al prototipo de un dispositivo de este tipo es necesario, además de conocer el comportamiento de los MMF, realizar pruebas experimentales con el fin de obtener criterios de diseño. Esto se debe a que no se ha intentado recuperar energía utilizando los MMF. Los resultados de estas pruebas son importantes para continuar con el desarrollo de un prototipo.

Debido a que los criterios de diseño que surgieron requieren de un largo tiempo de desarrollo, en el presente trabajo solo se dan a conocer estos criterios, además del arreglo que se uso para las pruebas experimentales. Todo esto, con el fin de continuar el proyecto con estudios especializados sobre la ciencia e ingeniería de materiales.

3.2.1.-Diseño conceptual.

En el arreglo, el alambre con memoria de forma está dispuesto de manera que se obtiene un desplazamiento longitudinal, este movimiento desplaza a la corredera que hay al final de la configuración. El alambre con memoria de forma va sujeto a un resorte helicoidal de tracción fijo en uno de sus extremos y por el otro sujeto a la corredera. Al ser calentado el alambre genera una elongación en el resorte por lo tanto surge un desplazamiento en la corredera en la Figura 3.20 se muestra dicho arreglo. En la Figura 3.21 se muestra el despiece del arreglo.

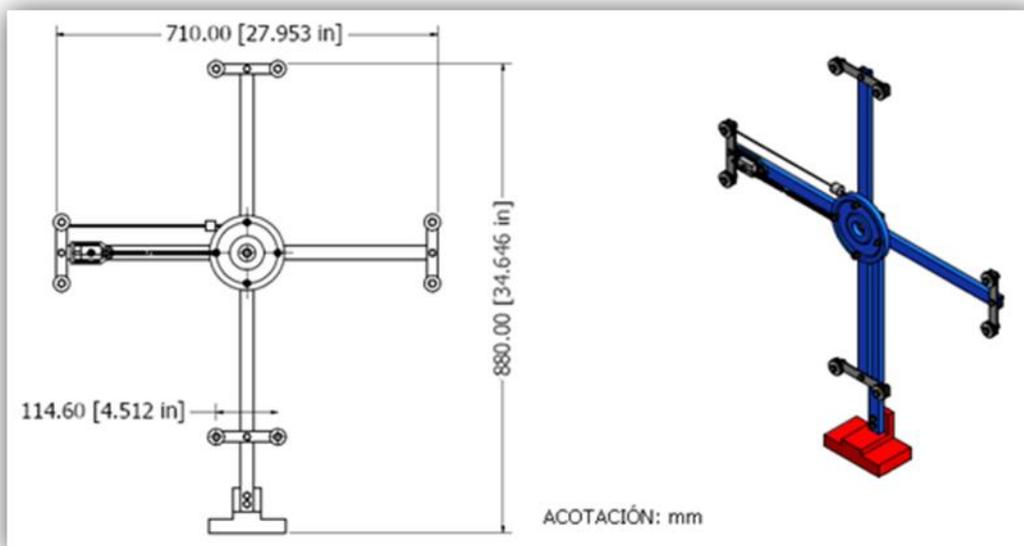
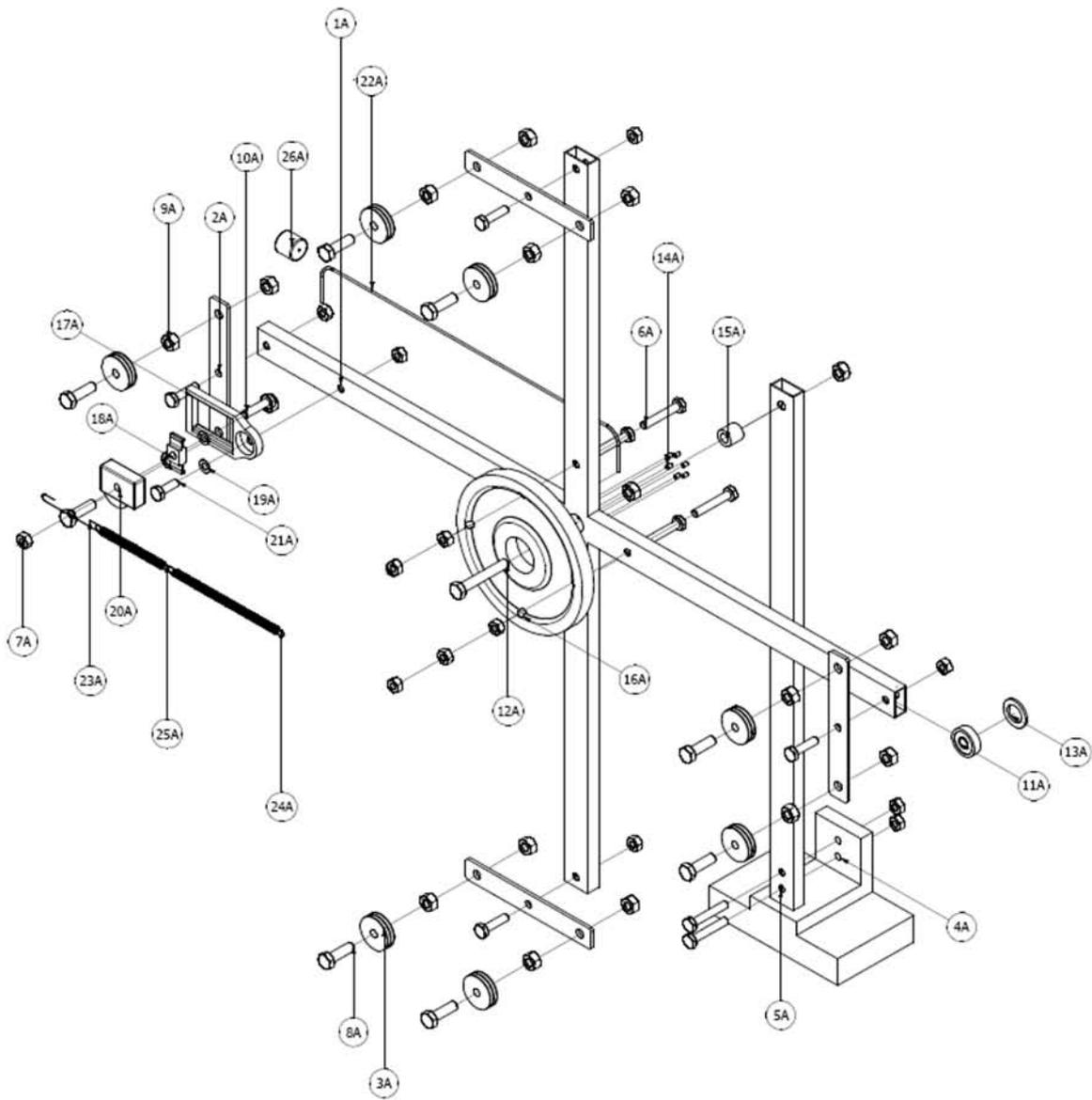


Figura 3.20 Arreglo del sistema basado en el desbalance de masas.



Parts List			
PIEZA	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCION
1A	1	Cruz	
2A	4	Porta poleas	
3A	8	Poleas	
4A	1	Bese	
5A	1	Poste	
6A	6	AS 2465 - 1/4 x 1 1/2 UNC	Tornillo para maquinaria de cabeza hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)
7A	14	AS 2465 - 1/4 UNC	Tuerca hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)
8A	8	AS 2465 - 5/16 x 1 UNC	Tornillo para maquinaria de cabeza hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)
9A	18	AS 2465 - 5/16 UNC	Tuerca hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)
10A	5	AS 2465 - 1/4 x 1 UNC	Tornillo para maquinaria de cabeza hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)
11A	1	Rodamiento	Rodamiento de bolas.
12A	1	AS 2465 - 5/16 x 2 UNC	Tornillo para maquinaria de cabeza hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)

Parts List			
PIEZA	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCION
13A	1	Arandela	Arandela
14A	6	ANSI B18.3 - 5-40 UNC x 0,19	Prisionero (hilos de rosca en UNC y UNF)
15A	1	Buje	
16A	1	Volante de inercia	
17A	1	Guia corredera	
18A	1	Corredera	
19A	2	Arandela	
20A	1	Pesa	
21A	1	AS 2465 - 1/4 x 3/4 UNC	Tornillo para maquinaria de cabeza hexagonal (hilos de rosca en UNC y UNF)
22A	1	Guia de contrapeso	
23A	2	Arnes	
24A	1	Resorte	Extension Spring 0.25
25A	1	Resorte 2	Extension Spring 0.25
26A	1	Contrapeso	

Figura 3.21. Despiece del arreglo.

Como se puede apreciar en la Figura 3.22, el alambre con memoria de forma está sujeto en los tornillos (9A) de tal forma que en el extremo opuesto pasa por las poleas (3A) para que al final se fije en el arnés (23A) y de esta manera se obtiene el desplazamiento longitudinal que se requiere, de la misma forma que en el motor con alambres de NiTi. Con este desplazamiento longitudinal de la corredera se ocasiona el desbalance del arreglo, y de esta forma comienza un desplazamiento angular. Los elementos y su función en el arreglo serán detallados en la siguiente sección donde además se profundiza en la descripción del movimiento.

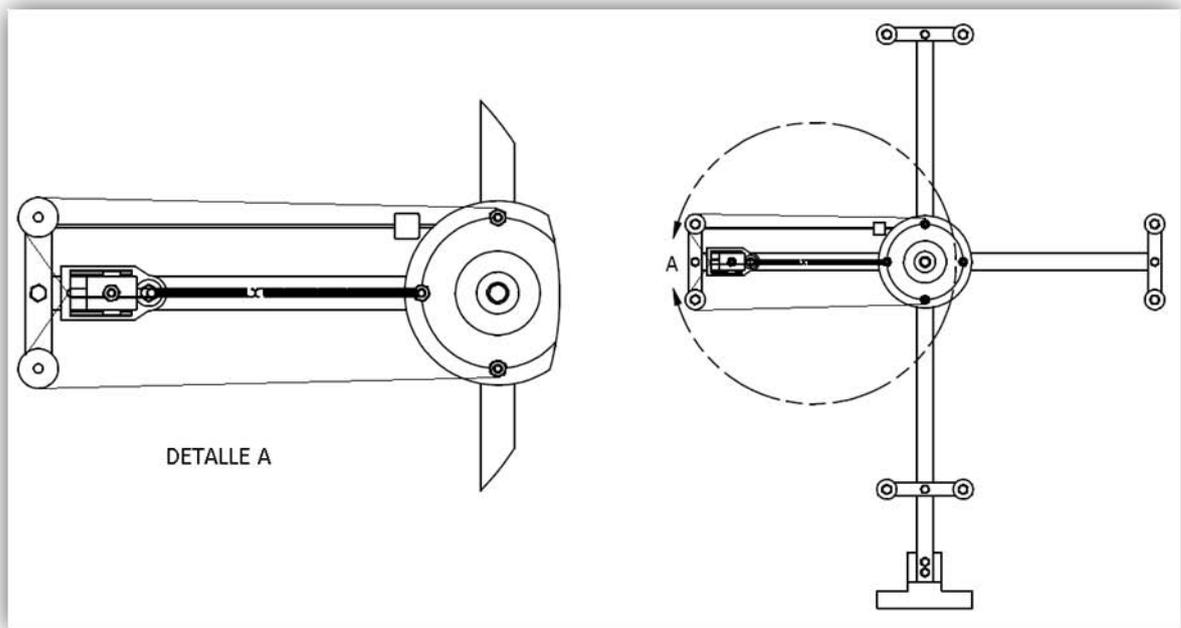


Figura 3.22 Configuración del alambre en el arreglo.

El objetivo del prototipo es la recuperación de energía, por esta razón el alambre se debe calentar con energía calorífica de desecho, sin embargo, por simplicidad en las pruebas el calentamiento del alambre se lleva a cabo por flujo de corriente eléctrica. Cabe mencionar que se debe estudiar la transferencia de calor que hay entre la fuente calorífica y el material, cuando el dispositivo opera con la energía de desecho de una maquina térmica, de modo que se conozca la factibilidad del dispositivo según el medio en el que actúa.

3.2.2.-Descripción del funcionamiento y de los elementos.

En esta sección se describirán los elementos esenciales, para luego pasar a los resultados del presente trabajo en el Capítulo 4:

Base.

Esta base consta de una pieza de metal a la que se le atornilla un perfil tubular rectangular (PTR) de 1 x ½ pulgadas y de 19 pulgadas de longitud, en el extremo libre de este PTR se ensambla la cruz formada por el mismo perfil. La base debe poseer la

suficiente masa para mantener en equilibrio a todo el arreglo, de tal forma que mantiene en posición vertical dicha cruz. En la figura 3.20 se muestra el esquema de la base con algunas de sus dimensiones.

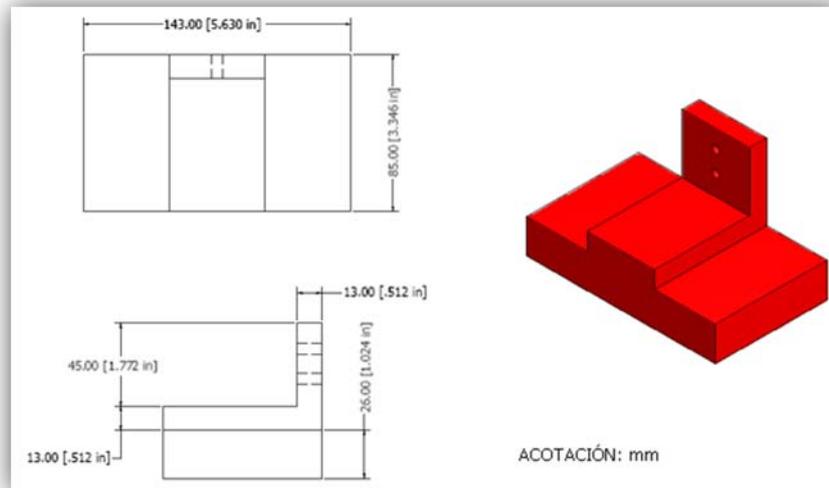


Figura 3.23 Base del arreglo.

Cruz de PTR.

Como se sabe una cruz es una figura formada por dos líneas que se atraviesan o cortan perpendicularmente [36]. Esta figura se forma con el PTR antes descrito, en el centro de dicha cruz se encuentra un rodamiento de bolas el cual está fijo a la base. De esta forma la cruz puede girar y el eje de giro también es el centro de masa del sistema. En esta parte del arreglo se fijan los componentes restantes.

Como se verá más adelante los parámetros que se obtuvieron se realizaron con el movimiento que se producía en uno de los PTR, pues el alambre, los resortes helicoidales y la corredera solo se encuentran situados en esta barra, de tal forma que el sistema se balancea con contrapesos. En la figura 3.20 se muestra la cruz y en la figura 3.21 el despiece.

Alambre con memoria de forma.

A partir del comportamiento de este elemento se hace girar el arreglo. La configuración del alambre sobre la cruz es la misma que se sigue en el motor con alambres de Ni-Ti. Como en el caso anterior el alambre está sujeto a una corredera, que durante el calentamiento del alambre esta se desplaza, y en el enfriamiento, el resorte helicoidal la hace retornar por lo que el alambre no se encuentra bajo carga constante, esto ocasiona que se tenga un desplazamiento menor del que se genera con una carga constante, como ya se ha expuesto anteriormente.

El calentamiento del alambre se logra con una corriente eléctrica que se hace circular a través de este, sin embargo, como ya se ha mencionado antes, para que un prototipo de este sistema pueda recuperar energía es necesario considerar la transferencia de calor que exista en el lugar donde este opere. Como se sabe la temperatura de transformación del alambre es cerca de 70°C por lo que es posible calentarlo con gases de desecho a alta temperatura.

Debido a que la configuración del alambre es la misma que en el prototipo del motor con alambres de Ni-Ti no se discutirá a detalle la funcionalidad de las poleas y los resortes, sin embargo la corredera presenta algunas diferencias.

Corredera.

El arreglo se desplaza angularmente cuando el peso de la corredera cambia de posición debido al movimiento longitudinal resultante de la deformación del alambre. En la figura 3.22 se puede observar un esquema de la corredera.

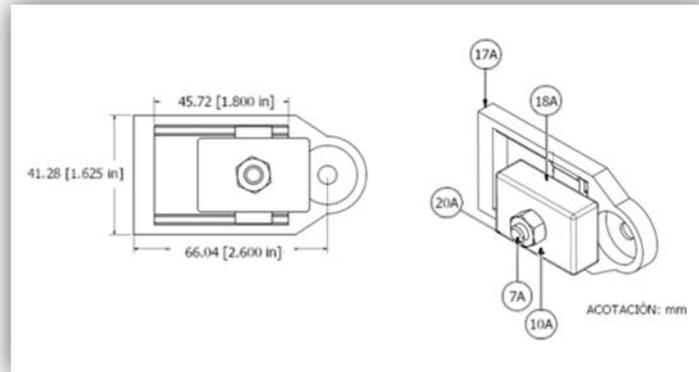


Figura 3.22 Guía (17A), corredera (18A), pesa (20A) y elementos de sujeción (7A, 10A).

La corredera tiene una posición inicial, en este punto, el alambre se encuentra a baja temperatura y el resorte confiere una tensión inicial al sistema. El arreglo que se describe se ha balanceado agregando contrapesos a cada uno de los perfiles que forman la cruz; estos contrapesos mantienen en reposo al perfil que sostiene a la corredera. Al calentarse el alambre, la corredera se desplaza longitudinalmente arrastrando consigo la masa y aumentando la tensión del resorte. Al cambiar la masa de posición se produce un desbalance en el arreglo provocando el movimiento rotacional de la cruz de PTR. En la Figura 3.23 se observa la posición inicial y final de la corredera y el movimiento rotacional.

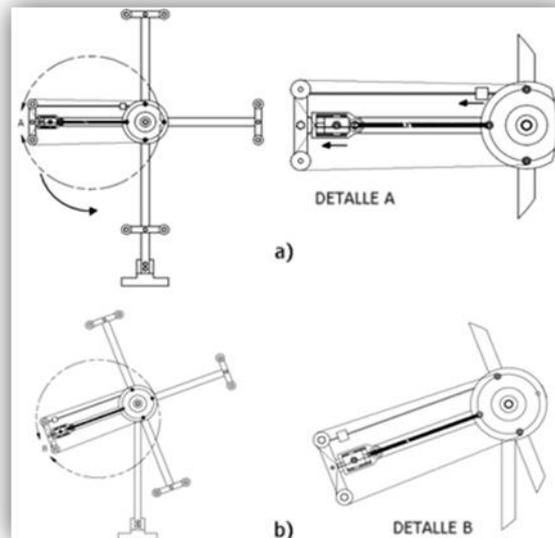


Figura 3.23 Movimiento provocado por el desbalance de masas a) en la posición inicial de la corredera b) en la posición final de la corredera.

Guía de contrapeso.

En la posición final de la corredera que se muestra en la Figura 3.23 el arreglo se traslada angularmente provocando que se deslice el contrapeso (26A) sobre su guía (22A). La guía de contrapeso se muestra en la Figura 3.24. Dado que el contrapeso recorre una distancia considerable, el desbalance que se provoca es mayor y el desplazamiento angular resultante es más grande.

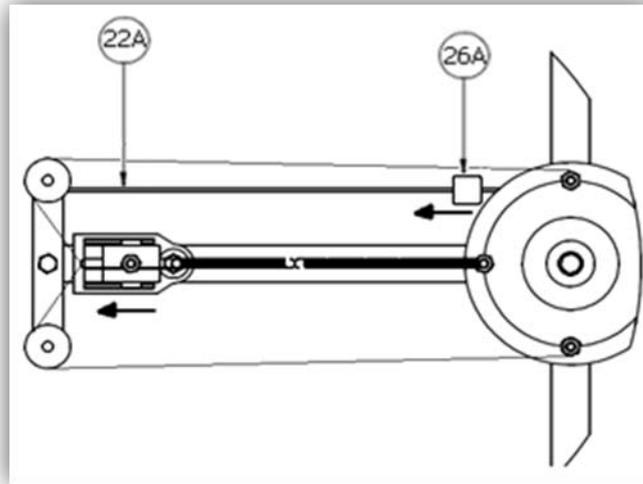


Figura 3.24. Guía y el contrapeso.

Volante de inercia.

Este elemento es totalmente pasivo, ya que únicamente aporta inercia adicional al sistema, permitiendo así almacenar energía cinética. El volante de inercia continúa su movimiento cuando cesa el par motor que lo propulsa, en este caso el movimiento que conserva es el movimiento rotacional provocado del desbalance de masas. El centro masa del volante coincide con el eje de giro de la cruz de PTR; en la figura 3.25 se aprecia el volante de inercia y su posición en el arreglo.

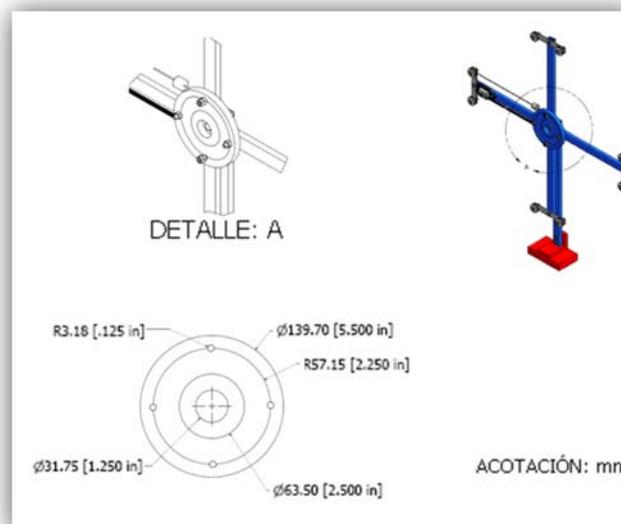


Figura 3.25 Volante de inercia y su posición en el arreglo.

CAPITULO 4 RESULTADOS.

4.1-Diseño de detalle del motor con alambres de Ni-Ti.

Una vez conocidos los componentes y el funcionamiento del motor con alambres con memoria de forma, descritos en el capítulo anterior, se procederá a definir con toda precisión las características técnicas de los elementos que conforma al dispositivo, además de describir los criterios de diseños.

4.1.2-Criterios de diseño.

El factor determinante del diseño del motor es la determinación del desplazamiento que tiene la corredera, el cual proviene de los alambres con MF. Como se sabe, el alambre hace mover la corredera al variar la temperatura del mismo, arrastrando la carga que genera el resorte. Es claro que la parte medular del diseño consiste en encontrar un modelo matemático que permita conocer el comportamiento carga-desplazamiento-temperatura de los alambres con MF. Entre los modelos disponibles en la literatura se encontró un modelo ingenieril capaz de proporcionar la información requerida para el motor, conociendo las características generales de material [34]. Dicho modelo se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \left[\frac{\sigma_A}{f(k_1 - k_2) + k_2} \right]^{\frac{1}{n}}$$

$$f = \frac{e^{\left(\frac{T - M_s - T_c}{T_\alpha}\right)}}{1 + e^{\left(\frac{T - M_f - T_c}{T_\alpha}\right)}} \quad (4.1)$$

Con:

$$k_2 = \frac{0.99k_f - 0.01k_1}{0.99^2 - 0.01^2} \quad k_i = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^n \sigma_A^{1-n}$$

$$k_1 = \frac{0.01k_f - 0.99k_1}{0.01^2 - 0.99^2} \quad k_f = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^n \frac{\sigma_A^{1-n}}{2}$$

$$T_c = \frac{\sigma_A}{\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}} \quad T_\alpha = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}} \ln(99) \quad (4.2)$$

Donde σ_A es el esfuerzo aplicado, $\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^\sigma}$ es la razón Clausius Clapeyron, E, n y α son parámetros que se toman de la curva esfuerzo-deformación a $T > A_f$ para el material empleado.

Este modelo, como lo explica el autor, aproxima el comportamiento de los MMF mediante parábolas ajustadas con valores experimentales y permite simular el comportamiento en estudio ya sea para carga, deformación o temperatura constante o variable. En esta ecuación es preciso determinar σ_A en función del desplazamiento o bien de la deformación, ya que la carga aplicada proviene de la tracción del resorte.

En el motor cuyo diseño se presenta, el alambre estará sujeto a una carga inicial proveniente de una cierta elongación del resorte que genera la máxima deformación del alambre, durante la operación del sistema esta condición se presenta a temperatura ambiente (en la fase martensítica del material). Al incrementar la temperatura del alambre el material sufrirá una transformación martensita-austenita que genera una disminución en la deformación del alambre y en consecuencia el resorte sufrirá una elongación que incrementará la magnitud de la carga aplicada.

En la Figura 4.1a) se observa la posición inicial del alambre donde se aprecia que la carga aplicada por el resorte es menor que en la posición final que se muestra en la Figura 4.1b). En dicha Figura se aprecia como el desplazamiento longitudinal de la corredera, debido al calentamiento del alambre, induce un giro en la manivela del mecanismo acoplado.

Considerando lo anterior, es claro que el alambre con MF estará sujeto a una carga variable proveniente del resorte. En la Figura 4.2 se muestra de manera esquemática el comportamiento descrito anteriormente auxiliándonos de una curva esfuerzo-temperatura-transformación y de una serie de curvas: esfuerzo-deformación correspondientes a distintas temperaturas. Cabe destacar que el esfuerzo generado sobre el alambre con MF no debe exceder de 200MPa.

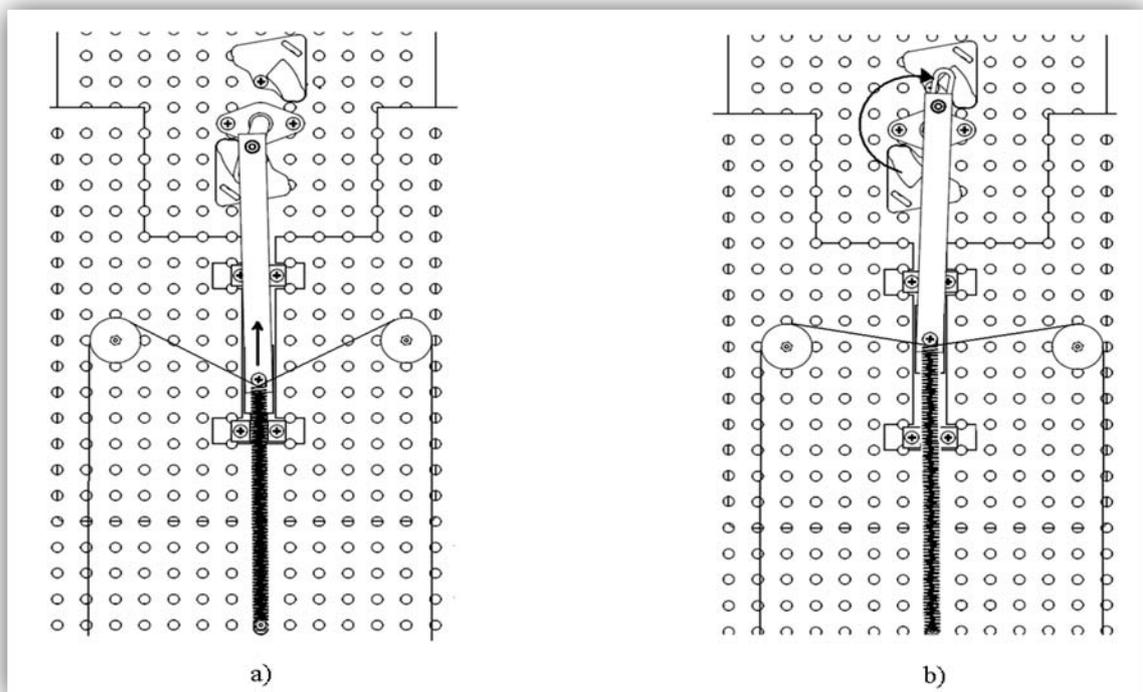


Figura 4.1 Esfuerzo variable al que está sometido el MMF. a) El resorte ofrece una carga inicial y en b) la carga es mayor ya que es proporcional a la elongación que sufre el resorte.

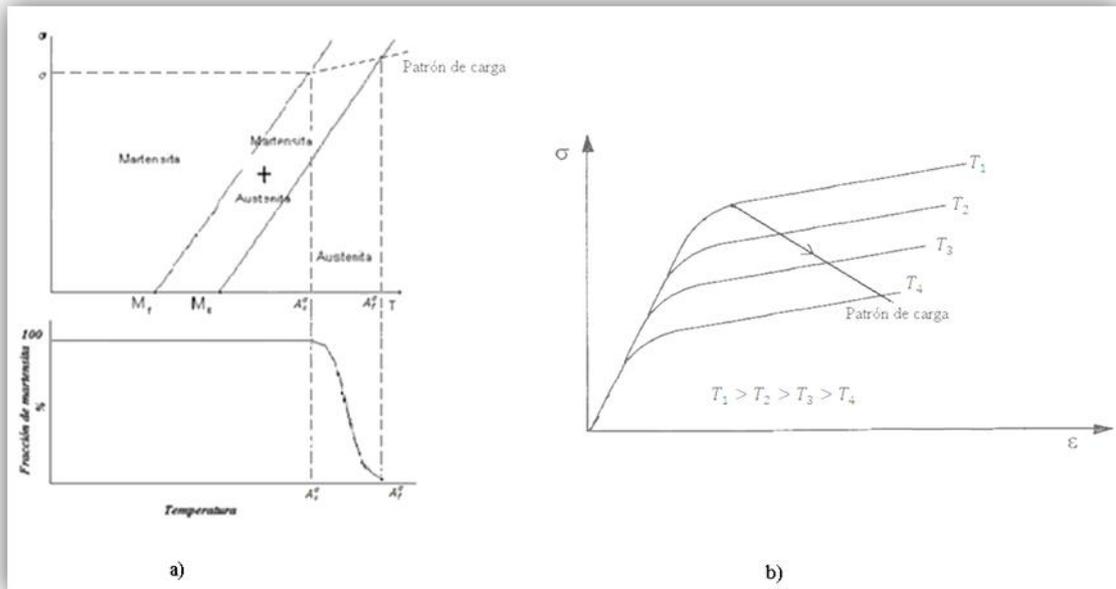


Figura 4.2 a) Curva esfuerzo-temperatura-transformación, b) curvas esfuerzo-deformación a distintas temperaturas.

En la figura anterior se puede observar el patrón de carga que se tiene con el dispositivo. En el esquema 4.2a) se nota que el esfuerzo es constante hasta que el material se empieza a transformar, en cuanto al esquema 4.2b) se observa que al disminuir la temperatura el esfuerzo también disminuye, pues ya no hay elongación del alambre, lo que ocasiona que la carga del resorte se reduzca.

La siguiente etapa en la modelación del funcionamiento del motor con alambre de MF es la determinación de los parámetros cinemáticos del arreglo propuesto. Para ello, se hará referencia a la Figura 4.3 donde se indican las dimensiones del alambre colocado en el dispositivo, así como de los diversos elementos que lo conforman. El primer parámetro a considerar en la definición de las variables cinemáticas es la magnitud de la carga que aplica el resorte sobre el alambre. La carga generada por el resorte, es proporcional a la elongación que sufre el mismo, es decir:

$$F = k\Delta y \tag{4.3}$$

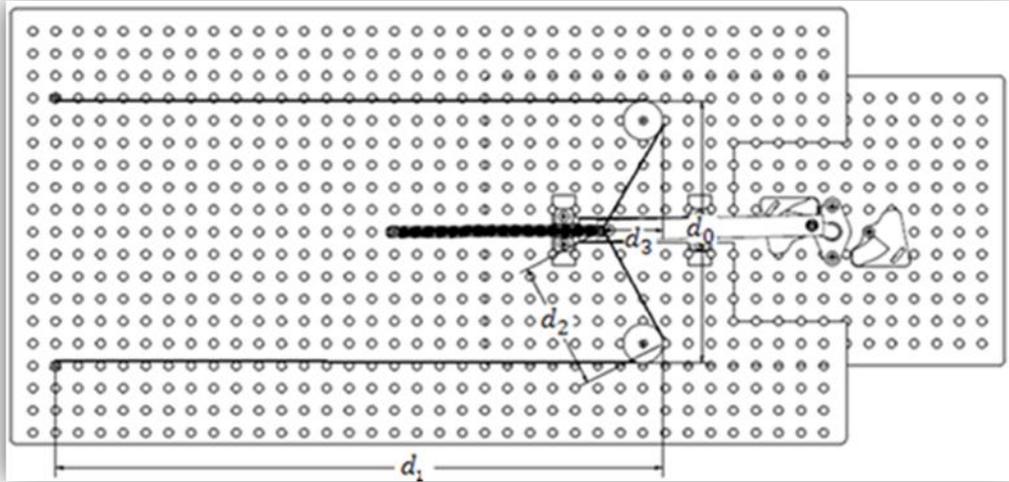
Donde F es la fuerza generada por el resorte elongado Δy unidades respecto a su posición de reposo y k es la constante elástica del resorte.

Considerando que dicha fuerza induce un esfuerzo σ en el alambre con MF, la ecuación 4.3 se convierte en:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{K\Delta y}{A} \tag{4.4}$$

Donde A es el área de la sección transversal del alambre.

De la Figura 4.3, se ve claramente que existe una relación entre Δy y el desplazamiento de la corredera d_3 . Como se aprecia en dicha Figura conforme d_3 disminuye Δy incrementa y viceversa. Así mismo, se aprecia claramente que existe un valor mínimo



Figur

a 4.3 Dimensiones del motor con alambres de Ni-Ti, necesarias para el modelo.

de $\Delta y_{\min} > 0$ y otra máxima Δy_{\max} que corresponden con la posición de la Figura 4.1 a) y 4.1 b) respectivamente. Considerando lo anterior, Δy se puede expresar en términos de d_3 como sigue:

$$d_3 + \Delta y = D_3 \quad (4.5)$$

Donde D_3 es la distancia entre $d_3 = 0$ y la posición de reposo del resorte.

De la ecuación anterior, y de las consideraciones extremas del resorte se tiene que:

$$D_3 - d_{3\max} > 0 \quad (4.6a)$$

Así mismo, dado que $d_{3\min} > 0$

$$D_3 - \Delta y_{\max} > 0 \quad (4.6b)$$

Por otro lado, considerando que en su posición de reposo, sin carga aplicada, del alambre con MF es:

$$2d_1 + d_0 = l_0 \quad (4.7)$$

Donde: l_0 es la longitud del alambre con MF sin carga aplicada, d_1 y d_0 son las dimensiones que se muestran en la Figura 4.3. Luego, es claro que cuando el alambre se somete a una carga cualquiera F, se deformara según la siguiente relación:

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \varepsilon = \frac{1}{l_0} \left[2\sqrt{d_3^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} - d_0 \right] \quad (4.8)$$

Donde:

$$d_2^2 = d_3^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 \quad d_2 = \sqrt{d_3^2 + \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} \quad (4.9)$$

$$l_f = 2d_1 + 2d_2 \quad (4.10)$$

Luego de la ecuación 4.8 se obtiene:

$$d_3 = \sqrt{\left(\frac{l_0 \varepsilon + d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^2}$$

Empleando las ecuaciones 4.10 y 4.6 y sustituyéndolas en 4.4 se obtiene:

$$\sigma = \frac{k}{A} \left[D_3 - \sqrt{\left(\frac{l_0 \varepsilon + d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} \right] \quad (4.11)$$

Finalmente, tomando el esfuerzo de la ecuación 4.11 como el esfuerzo aplicado (σ_A) y sustituyéndolo en la 4.1 se obtiene lo siguiente:

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\frac{k}{A} \left[D_3 - \sqrt{\left(\frac{l_0 \varepsilon + d_0}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2}\right)^2} \right]}{f(k_1 - k_2) + k_2} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (4.12)$$

La cual, tomando las identidades 4.2 y las restricciones descritas por 4.6a y 4.6b constituye el modelo matemático del motor con MF que se desarrolla en el presente trabajo. Como se aprecia claramente en la ecuación 4.12, el modelo obtenido es una ecuación algebraica no lineal cuya incógnita es la deformación ε y cuyos datos de entrada son:

- a) La constante del resorte k ,
- b) El área de la sección transversal de alambre con MF,
- c) La longitud del alambre con MF en reposo,
- d) Las distancias d_0 y D_3 ,
- e) La razón de esfuerzo del material R ,
- f) La temperatura de transformación del material A_f
- g) Los parámetros α , n y E .

Conociendo los datos de entrada, dicha ecuación puede ser resuelta empleando algún método numérico conocido, por ejemplo el de Newton-Raphston. De estos datos, la constante del resorte k y los parámetros del comportamiento del alambre con MF; α , n y E , requieren la realización de pruebas adicionales mientras que el resto de los parámetros es proporcionado por el fabricante del material así como por las restricciones de espacio.

Los parámetros de alambre con MF: α , n y E requieren la realización de pruebas de tensión en las dos temperaturas extremas del material, mientras que la determinación de la constante k puede obtenerse experimentalmente o bien a partir de las características.

En realidad, el resorte empleado consiste en dos resortes colocados en serie cuyas características se muestran en la Tabla 4.1. Considerando dicha condición es posible calcular la constante de cada resorte empleando la siguiente ecuación [39]:

$$k = \frac{GD_w}{8N_\alpha C^3} \quad (4.13)$$

Donde:

N_α es el número de vueltas que da el alambre para formar el resorte.

k es la constante elástica del resorte.

G es el módulo de elasticidad transversal del material que se obtiene de la Tabla 4.2

D_w es el diámetro del alambre que se muestra en la Figura 4.4

D_m es el diámetro medio del resorte que también se muestra en la Figura 4.4.

C Índice del resorte y es la relación del diámetro medio con el diámetro del alambre $\left(\frac{D_m}{D_w}\right)$.

Tabla 4.1. Características de los resortes empleados en el motor con memoria de forma.

	N_α	D_w (pulg.)	D_m (pulg.)	C	$\frac{G}{\text{lb f}} / \text{pul g}^2$
Resorte 1	65	0.016	0.155	9.69	11498500
Resorte 2	28	0.023	0.195	8.48	9990500

Tabla 4.2 Principales propiedades de los materiales metálicos para los resortes.

Nombre y Nomenclatura	Módulo de elasticidad lineal en [GPa]	Módulo de elasticidad transversal en [GPa]	Resistencia mínima a tracción [MPa]	Temperatura de servicio máxima [°C]	Densidad [kg/m³]	Método de fabricación. Usos principales	
ASTM A227 (C>0.45%)	206,8	79,3	1951	121	7833	Estirado en frío. Resortes de bajo costo	1
ASTM A679 (C>0.65%)	206,8	79,3	1951	121	7750	Estirado en frío. Resorte de calidad superior	
ASTM A229 (C>0.55%) Revenido en aceite	206,8	79,3	2020	121	7833	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Resorte de usos generales	
ASTM A230 (C>0.60%) Revenido en aceite	206,8	79,3	1482	121	7833	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Resorte de tensión uniforme	
Aleación ASTM A231	206,8	79,3	1310	219	7750	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Usado para cargas de impacto	
Aleación ASTM A401	206,8	79,3	1620	246	7750	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Usado para cargas de impacto	
Acero Inox ASTM A313	193,1	68,9	862	288	7889	Estirado en frío. Resistente a corrosión y al calor para usos generales	2
bronce ASTM B159	103,4	43,1	724	93.3	8858	Estirado en frío. Resistente a corrosión	

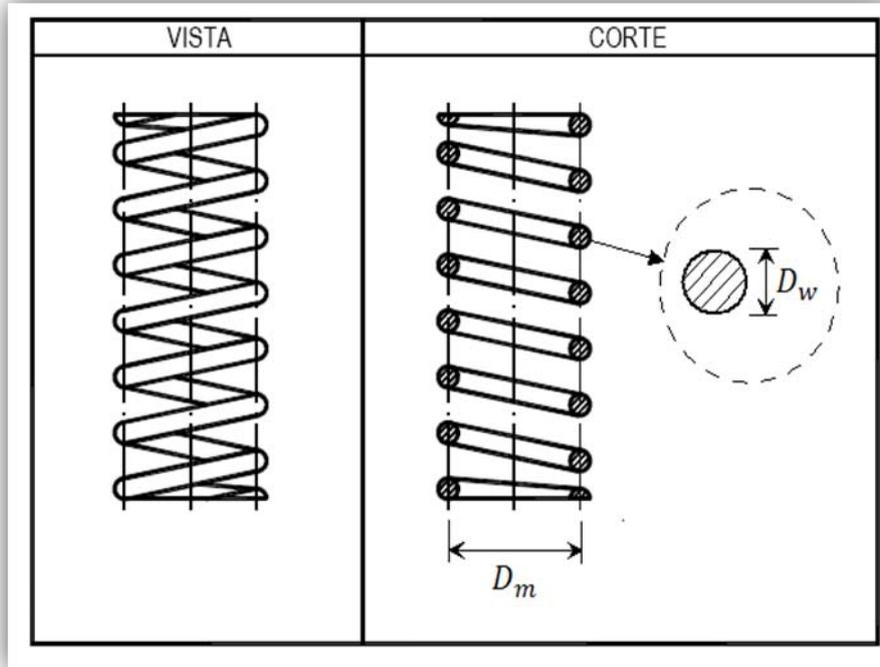


Figura 4.4 Esquema del diámetro medio D_m y del diámetro del alambre D_w .

De donde, para el resorte 1 la constante k_1 es:

$$k = \frac{\left(11498500 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{pu} \cdot \text{lg}^2}\right) (0.016 \text{ pu} \cdot \text{lg})}{(8)(65) \left(\frac{0.155 \text{ pu} \cdot \text{lg}}{0.016 \text{ pu} \cdot \text{lg}}\right)^3} = 0.389 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{pu} \cdot \text{lg}}$$

$$\left(0.389 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{pu} \cdot \text{lg}}\right) \left(\frac{4.45 \text{ N}}{\text{lb} \cdot \text{f}}\right) \left(\frac{\text{pu} \cdot \text{lg}}{0.0254 \text{ m}}\right) = 68.17 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

y para el resorte 2 la constante k_2 es:

$$k = \frac{\left(9990500 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{pu} \cdot \text{lg}^2}\right) (0.023 \text{ pu} \cdot \text{lg})}{(8)(28) \left(\frac{0.195 \text{ pu} \cdot \text{lg}}{0.023 \text{ pu} \cdot \text{lg}}\right)^3} = 1.68 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{pu} \cdot \text{lg}}$$

$$\left(1.683 \frac{\text{lb} \cdot \text{f}}{\text{pu} \cdot \text{lg}}\right) \left(\frac{4.45 \text{ N}}{\text{lb} \cdot \text{f}}\right) \left(\frac{\text{pu} \cdot \text{lg}}{0.0254 \text{ m}}\right) = 294.89 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Luego, Conociendo las constantes de cada uno de los resortes, es posible calcular la constante equivalente k_{eq} del arreglo de resortes en serie mediante la ecuación:

$$k_{eq} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \tag{4.14}$$

De donde se obtuvo:

$$k_{eq} = \frac{\left(66.25 \frac{N}{m}\right) \left(297.8 \frac{N}{m}\right)}{66.25 \frac{N}{m} + 297.8 \frac{N}{m}} = 54.19 \frac{N}{m}$$

Para evitar desviaciones que pudieran generar errores en el diseño del Motor con Memoria de Forma se realizó una ronda de pruebas a los resortes empleados por separado y en el arreglo en serie empleado. Dicha prueba fué realizada aplicando cargas diversas sobre el resorte y se midió la elongación generada. La curva obtenida es luego ajustada, empleando el método de los mínimos cuadrados, y obtenida la constante experimental correspondiente. En la Figura 4.5 se muestran las curvas experimentales obtenidas al ensayar los resortes 1 y 2 por separado, mientras que en la Figura 4.6 se presenta la curva correspondiente al arreglo de resortes en serie. Comparando los valores obtenidos experimentalmente, con que fueron calculados se ve claramente que la desviación es muy pequeña.

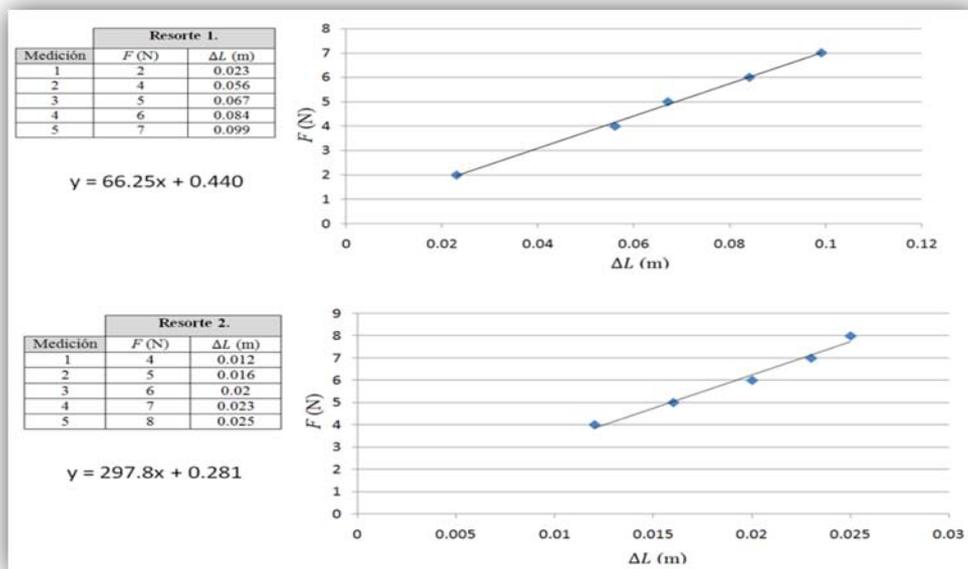


Figura 4.5. Determinación experimental de las constantes k1 y k2 de los resortes.

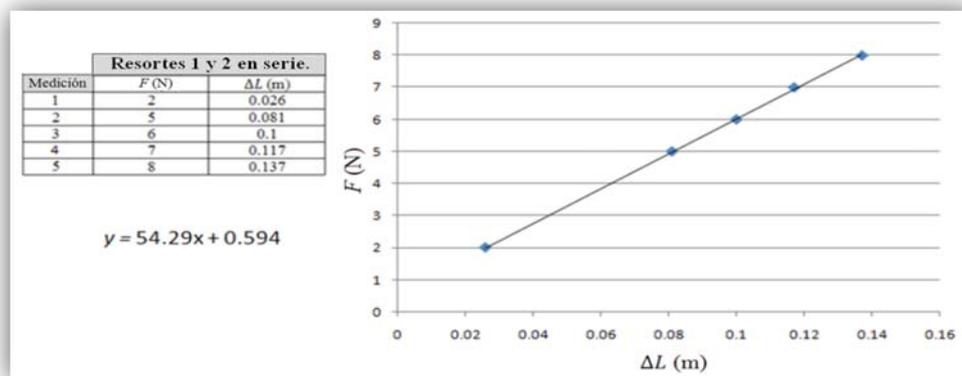


Figura 4.6. Determinación experimental de la constante equivalente de los resortes 1 y 2 en serie.

Finalmente, empleando los parámetros del material que se muestran en la Tabla 4.3 y las dimensiones del arreglo del motor con memoria de forma, se empleó el modelo de la ecuación 4.12 para calcular el comportamiento $Temperatura-d_3$ que se muestra en la Figura 4.7.

Tabla 4.3. Propiedades de los alambres Flexinol® de acuerdo al diámetro de la sección transversal.

Diameter Size (Inches)	Resistance (Ohms/Inch)	Maximum Pull Force (grams)	Approximate* Current at Room Temperature (mA)	Contraction* Time (seconds)	Off Time 70° C LT Wire** (seconds)	Off Time 90° C HT Wire** (seconds)
0.0010	45.0	7	20	1	0.10	0.06
0.0015	21.0	17	30	1	0.25	0.09
0.002	12.0	35	50	1	0.3	0.1
0.003	5.0	80	100	1	0.5	0.2
0.004	3.0	150	180	1	0.8	0.4
0.005	1.8	230	250	1	1.6	0.9
0.006	1.3	330	400	1	2.0	1.2
0.008	0.8	590	610	1	3.5	2.2
0.010	0.5	930	1000	1	5.5	3.5
0.012	0.33	1250	1750	1	8.0	6.0
0.015	0.2	2000	2750	1	13.0	10.0

*Tenga en cuenta que el tiempo de contracción es directamente proporcional con la corriente eléctrica impuesta.

** Aproximado del tiempo de enfriamiento.

Estos valores son solo aproximaciones, ya que otros factores como la temperatura ambiente, corrientes de aire, humedad y el nivel del mar influyen en el comportamiento del material.

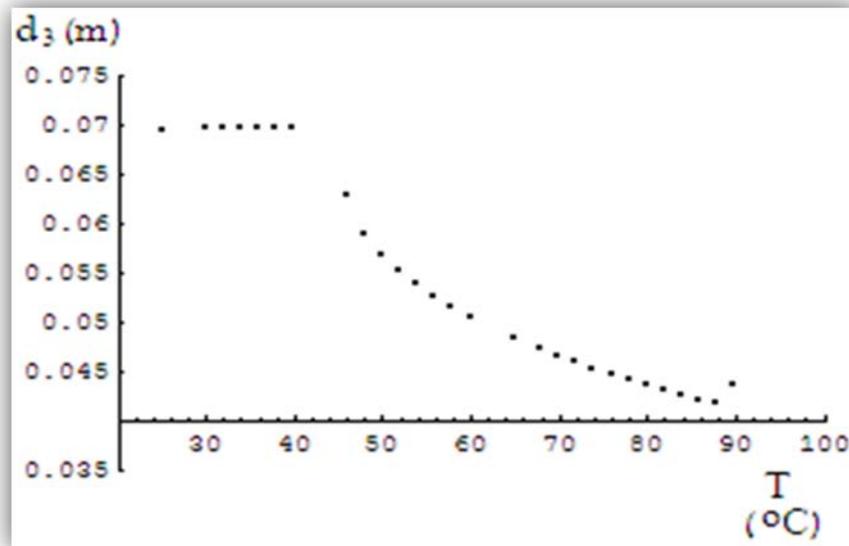


Figura 4.7 Curva Temperatura- d_3 obtenida empleando los parámetros del alambre y las dimensiones del prototipo de motor con memoria de forma propuesto.

Conociendo el comportamiento de la gráfica de la Figura 4.7 el siguiente paso es la síntesis del mecanismo que convertirá el desplazamiento longitudinal en el movimiento circular continuo.

4.1.2.1 Síntesis del mecanismo

Como se mencionó anteriormente, el mecanismo más conveniente para transformar el movimiento longitudinal en un giro de 360° es un biela-manivela-corredera. Para sintetizar dicho mecanismo se empleó un procedimiento basado en la mecánica del medio continuo, el cual es muy útil para simular el comportamiento del sistema al variar la temperatura. En la Figura 4.8 se muestra el esquema del mecanismo biela-manivela-corredera donde se definen dos bases ortonormales: $e_0 = \{e_{10}, e_{20}\}$ y $e_a = \{e_{1a}, e_{2a}\}$ fijas a las dos primeras articulaciones. Luego, considerando que las longitudes de los eslabones son l_1 y l_2 es posible asociar a los eslabones los vectores: $l_1 e_0$ y $l_2 e_a = l_2 e_0$. Es claro que en posición totalmente horizontal, que se muestra en la Figura 4.8, la resultante r_0 es:

$$r_0 = (l_1 + l_2)e_0 \quad (4.15)$$

y su magnitud es simplemente $l_1 + l_2$.

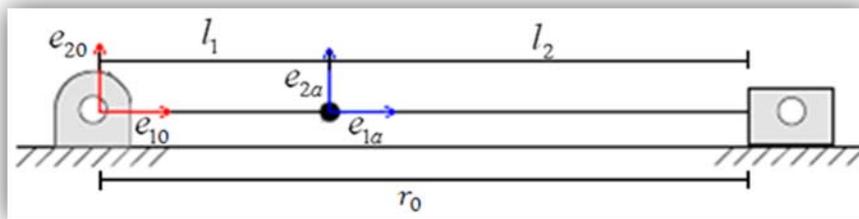


Figura 4.8 Esquema del mecanismo biela manivela.

Si la corredera del mecanismo se desplaza hacia la izquierda, la configuración del mismo cambia como se muestra en la Figura 4.9. Es claro, que en esta nueva configuración, se pueden definir las siguientes bases ortonormales: $e_b = \{e_{1b}, e_{2b}\}$ y $e_c = \{e_{1c}, e_{2c}\}$ las cuales se obtienen haciendo coincidir los vectores e_{1b} y e_{1c} con los eslabones correspondientes.

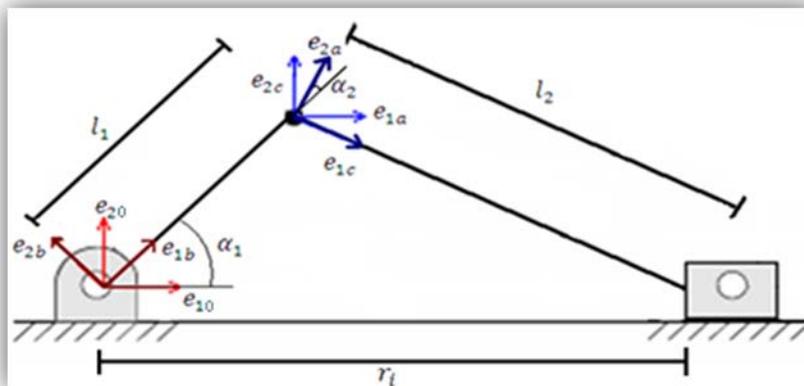


Figura 4.9 Cambio en la configuración del mecanismo biela manivela.

Es claro que para esta configuración los eslabones se pueden asociar a los vectores: $l_1 e_b$ y $l_2 e_c$. Considerando las bases definidas anteriormente, para la configuración de la Figura 4.9, la resultante r_i se puede expresar como:

$$r_i = l_1 e_b + l_2 e_c = l_1 \begin{pmatrix} e_{1b} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + l_2 \begin{pmatrix} e_{1c} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

La suma que se muestra en la ecuación anterior, no es posible realizarla ya que las bases e_b y e_c son diferentes. No obstante, dichas bases pueden ser referidas a la base e_0 mediante rotaciones rígidas R_1 y R_2 dadas por:

$$R_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad R_2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

Considerando lo anterior, la ecuación (4.16) puede ser escrita como:

$$r_i = l_1 \begin{pmatrix} e_{1b} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + l_2 \begin{pmatrix} e_{1b} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = l_1 R_1 \begin{pmatrix} e_{10} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + l_2 \left[R_2 \begin{pmatrix} e_{1b} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right] = l_1 R_1 \begin{pmatrix} e_{10} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + l_2 R_2 \left[R_1 \begin{pmatrix} e_{10} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right]$$

$$r_i = l_1 R_1 \begin{pmatrix} e_{10} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + l_2 R_2 R_1 \begin{pmatrix} e_{10} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.18)$$

Se puede ver que el máximo y el mínimo desplazamiento de la corredera se obtienen cuando $\theta_1 = \theta_2 = 0$ y $\theta_1 = 180^\circ$ y $\theta_2 = -180^\circ$ respectivamente. Considerando dichas condiciones, se obtienen las siguientes expresiones que proporcionan las relaciones que deben cumplir las magnitudes de los eslabones:

$$l_1 + l_2 - (l_2 - l_1) = d_{3\max} \quad (4.19)$$

De donde se deduce que sólo se debe cumplir con la restricción de que:

$$l_1 = \frac{d_{3\max}}{2}$$

En tanto que l_2 puede tomar cualquier valor.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el mecanismo biela-manivela-corredera del que se dispuso permite variar la longitud de l_1 pero l_2 es fija, como se muestra en la Figura 4.10 y 4.11. En la Figura 4.11, la longitud de l_1 fue fija en 30mm, que es la magnitud $d_{3\max}$ que se obtuvo en el análisis del alambre que se presentó en la Figura 4.7.

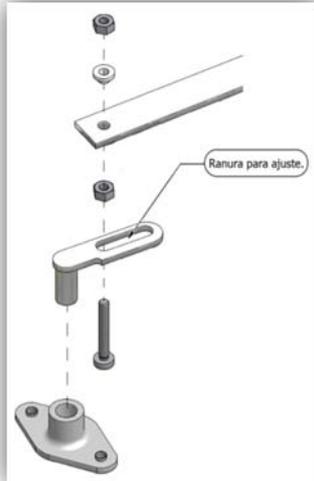


Figura 4.10 Ajuste de la manivela para recibir mayor o menor desplazamiento en la corredera.

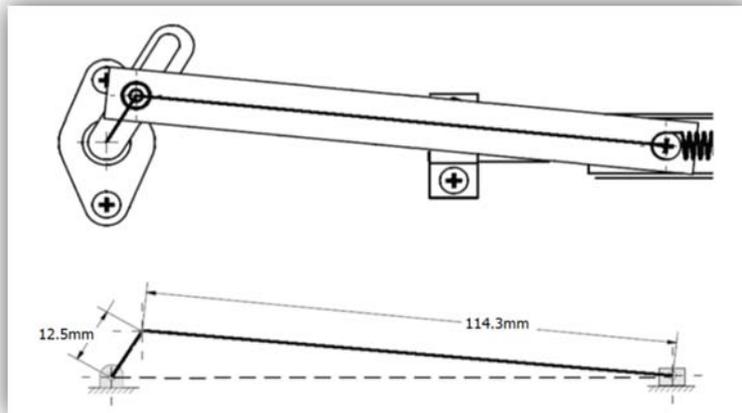


Figura 4.11 Esquema del mecanismo biela manivela del que se dispuso en el presente trabajo.

4.1.2.2 Circuito electrónico.

Como se mencionó en el capítulo anterior, para que el motor funcione es necesario que se apliquen al alambre con MF ciclos de calentamiento y enfriamiento sucesivos. Con el fin de hacer funcionar el motor de manera simple y sencilla, se optó por calentar el alambre mediante pulsos eléctricos para lo cual fue diseñado el circuito electrónico que se muestra en la Figura 4.12. Según las especificaciones del fabricante, la alimentación del alambre es de 12V 400mA CD por lo que fue necesario emplear una fuente de CD a la cual fue conectado el circuito.

El circuito de control de ancho de pulso fue diseñado en base al integrado multivibrador 555 que genera una salida de frecuencia constante y una relación variable de encendido-apagado de la señal. Esta relación de salida se puede cambiar variando la resistencia del potenciómetro. El circuito eléctrico se muestra en la Figura 4.12.

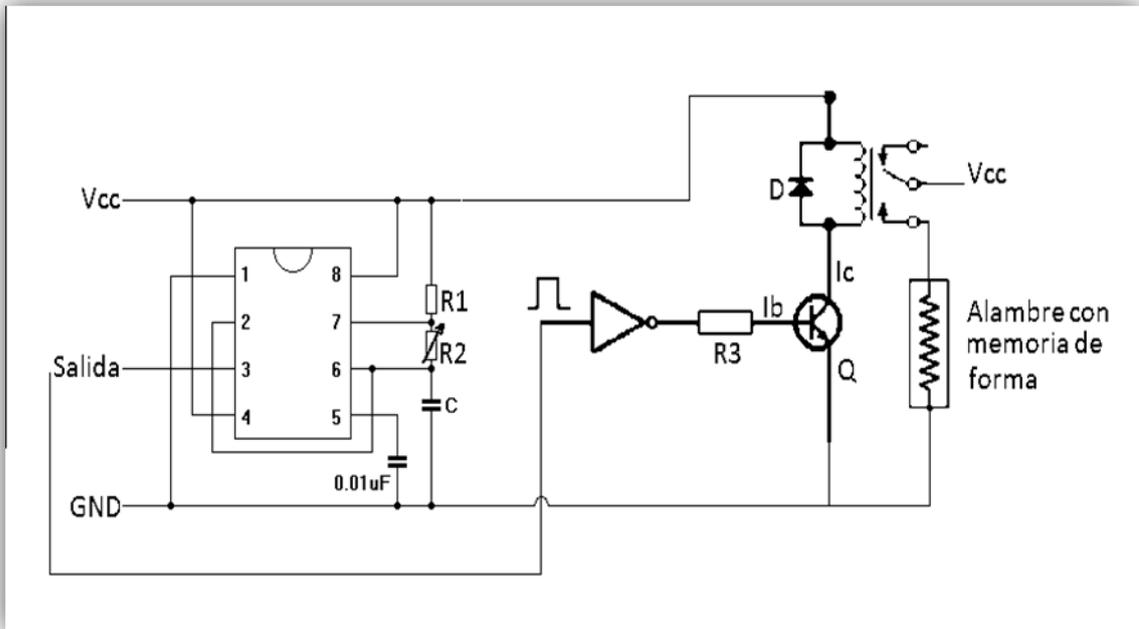
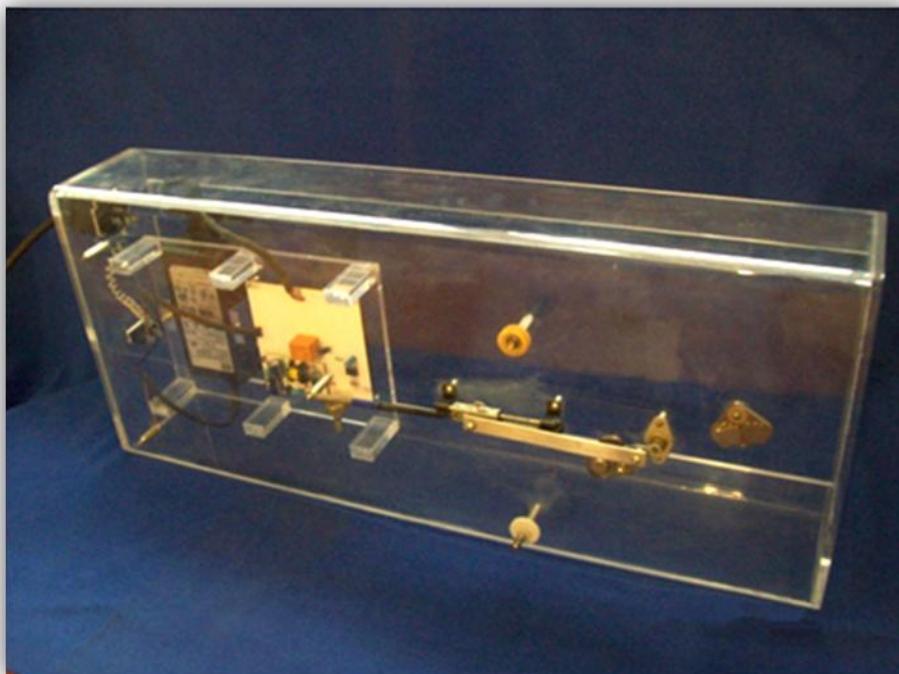


Figura 4.12 Circuito electrónico.

En el apéndice se encuentran los planos de detalle del prototipo del motor con alambres con MF. Como se puede ver en las Figuras 4.13 y 4.14, este prototipo ha recibido algunos cambios, sin embargo la operación del dispositivo sigue siendo la misma y no cambia de ningún modo la eficiencia del motor.



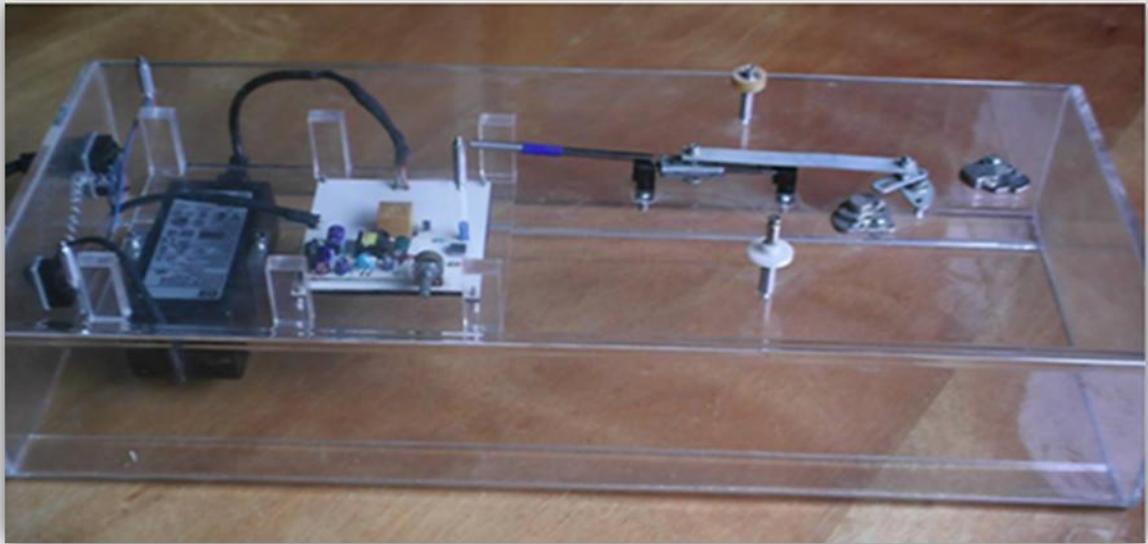
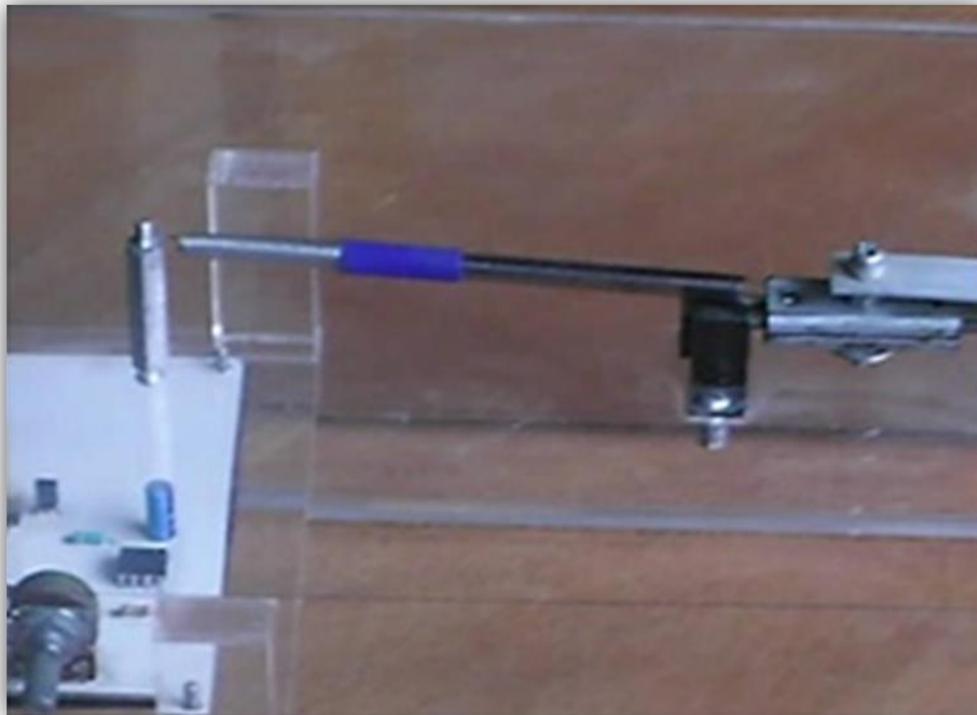


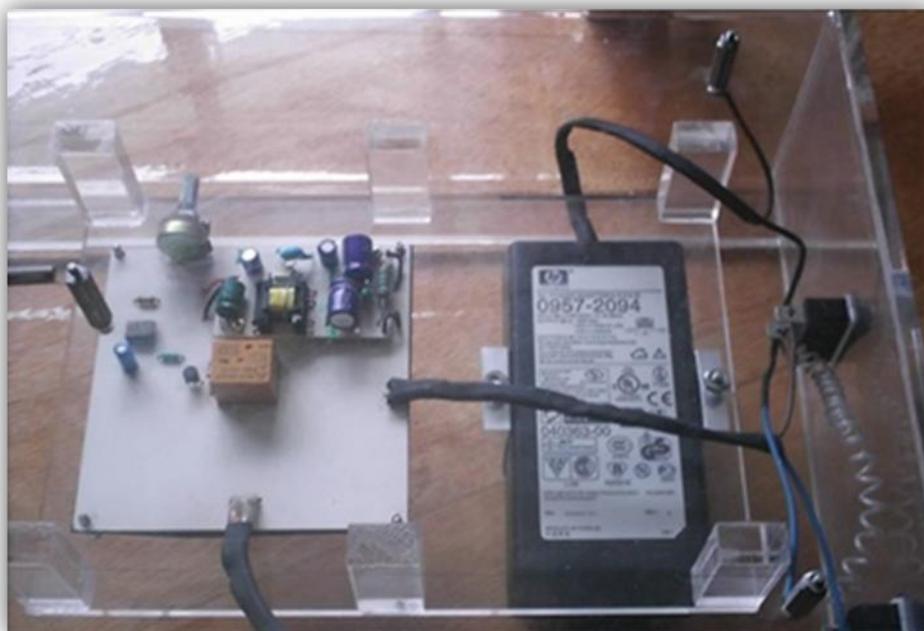
Figura 4.13 Motor con memoria de forma.



a)



b)



c)

Figura 4.14 a) Mecanismo biela-manivela-corredera, b) resortes, c) circuito electrónico.

4.2 Dispositivo recuperador de energía de desecho.

Como se mencionó en el capítulo 1, a partir del principio del desplazamiento de la corredera mediante calentamientos y enfriamientos del alambre con MF, se diseñó un dispositivo capaz de operar con energía térmica proveniente de gases de expulsión de una máquina térmica. Este dispositivo tiene como fin, recuperar energía térmica que se desecha en máquinas térmicas convencionales en las cuales se requieren gases a alta presión para su operación. Como se sabe, en dichas máquinas, generalmente se expulsan gases a alta temperatura pero baja presión, los cuales ya no pueden ser empleados en la máquina a pesar de que contienen una gran cantidad de energía.

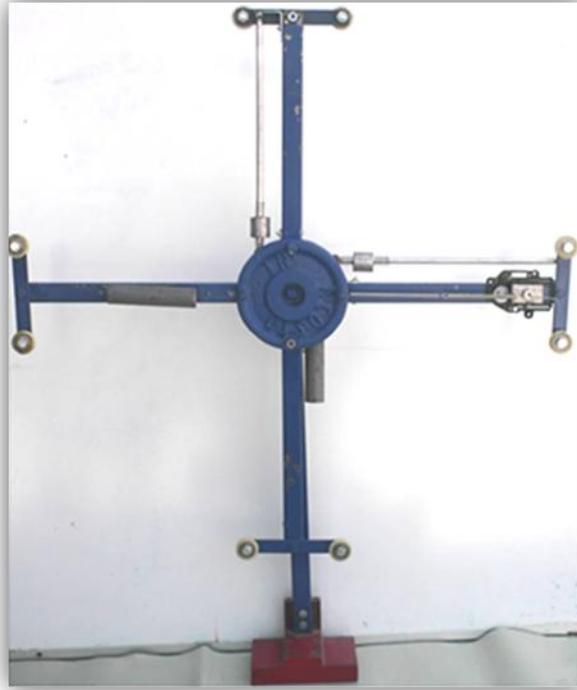
En el presente trabajo se obtuvo una primera versión de dispositivo el cual presentó una serie de inconvenientes que fueron corregidos, sin embargo, en esta etapa del diseño no se logró generar en el dispositivo un movimiento circular continuo, sólo una oscilación más o menos regular de amplitud cercana a los 180°. A continuación se presenta un listado de los problemas encontrados en el primer prototipo del dispositivo así mismo en la Tabla 4.2 se describe el criterio que se empleó para resolver cada uno de ellos.

1. Desplazamiento irregular de la masa.
2. Desbalance casi nulo de la cruz.
3. Poco desplazamiento angular del arreglo.
4. Poco desplazamiento longitudinal de la masa.
5. Mayor requerimiento energético para el calentamiento.

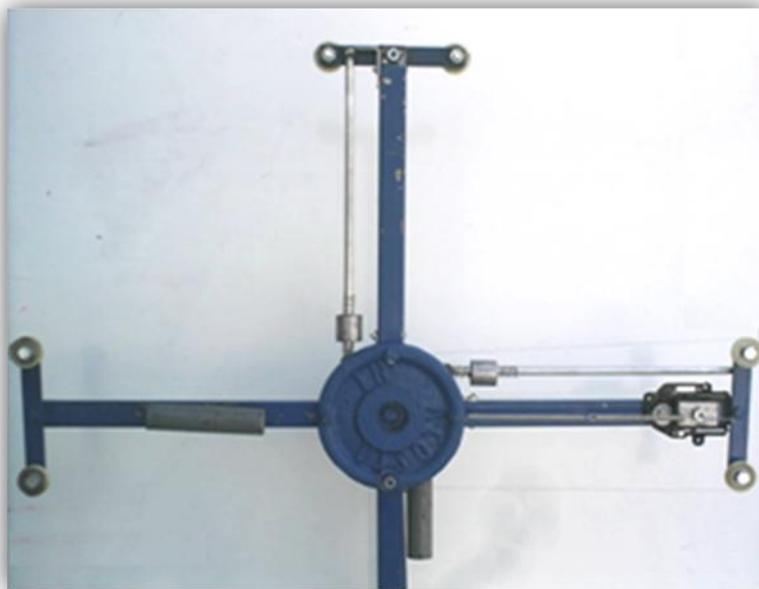
En la Tabla 4.2. Problemas encontrados en el primer prototipo del dispositivo recuperador de energía y la propuesta de solución correspondiente.

PROBLEMA	SOLUCIÓN
<p>1. <i>Desplazamiento irregular de la masa</i></p>	<p>Se incorporo una corredera con su respectiva guía, de esta forma se asegura el movimiento completamente longitudinal y paralelo al PTR de la masa.</p>
<p>2. <i>Desbalance casi nulo de la cruz</i></p>	<p>Para lograr un mayor desbalance se le agregó masa a la corredera.</p>
<p>3. <i>Poco desplazamiento angular del arreglo</i></p>	<p>Con la nueva masa se logra un aumento de desplazamiento angular, sin embargo, no se considera significativo este aumento. Con la implementación de la guía y el contrapeso se obtiene la mitad de una revolución (este movimiento se conserva con la implementación del volante de inercia).</p>
<p>4. <i>Poco desplazamiento longitudinal de la masa</i> 5. <i>Mayor requerimiento energético para el calentamiento</i></p>	<p>El cambio de alambre de 0.01 in por el de 0.006 in que brinda un mayor desplazamiento longitudinal utilizando menos energía, de esta forma se logra calentar más rápidamente el alambre.</p>

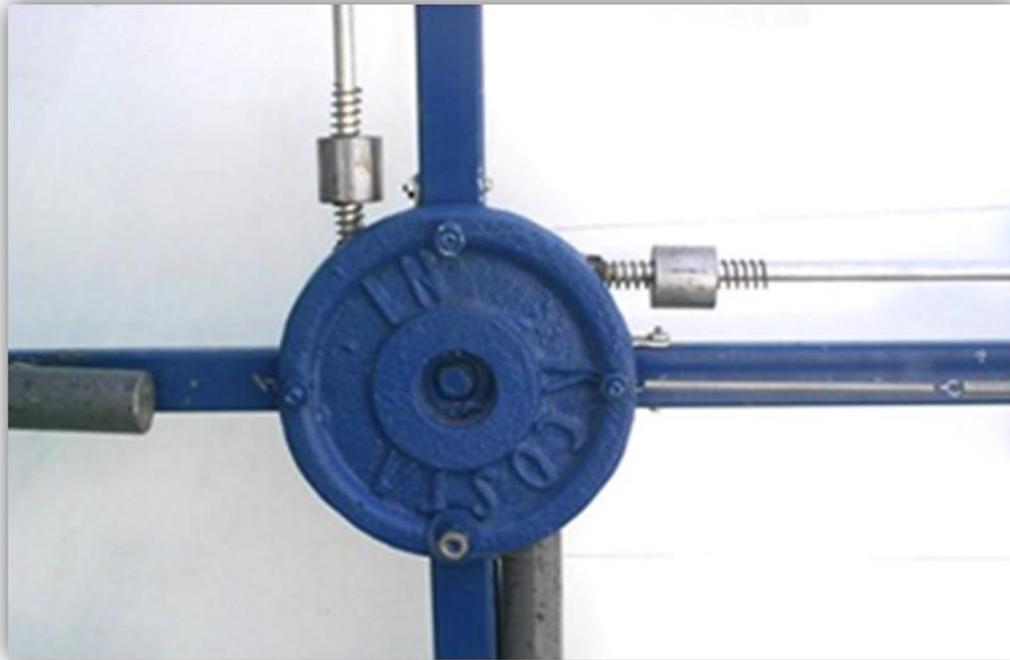
En la Figura 4.15, se muestran una serie de fotografías del dispositivo recuperador de energía en su estado actual en donde se aprecian las mejoras implementadas. No obstante el dispositivo aún no se encuentra en condiciones de operar de manera eficiente debido a que es necesario resolver algunos problemas referentes a la amplitud de la oscilación. Dada la complejidad de dicho estudio, se dejan para un trabajo posterior.



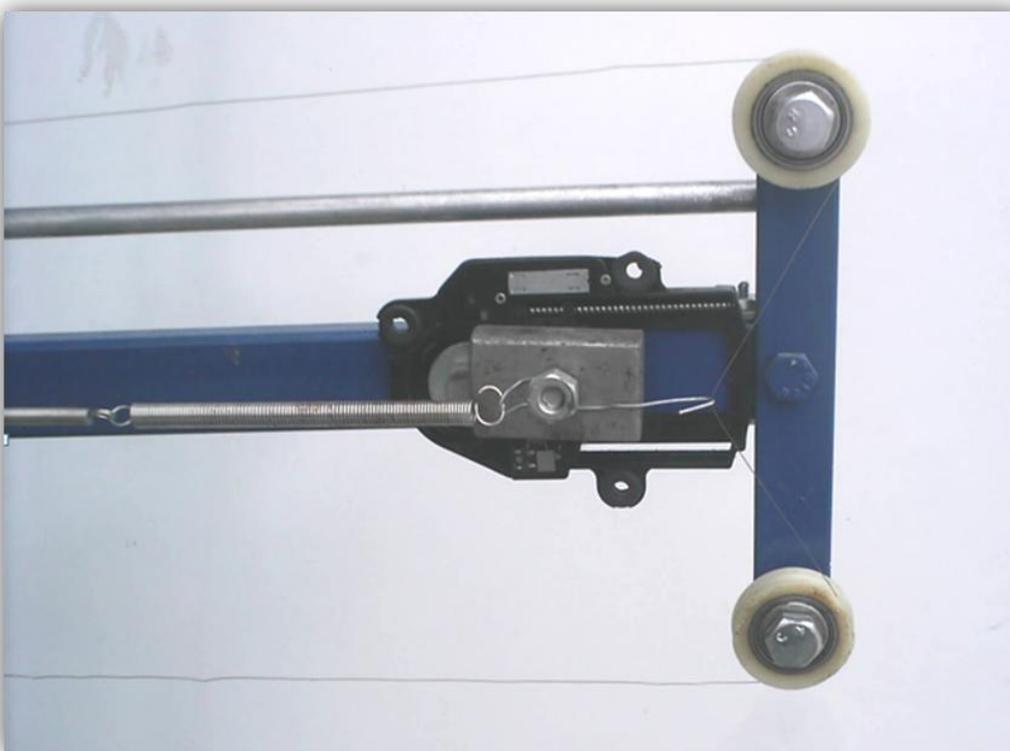
a)



b)



c)



d)

Figura 4.15. a) Dispositivo recuperador de energía. b) Contrapesos fijos y móviles.
b) Corredera, poleas y resortes.

Conclusiones.

Se diseñó y construyó un dispositivo que proporciona un giro continuo en un eje a partir de un alambre fabricado con una aleación de Ni-Ti con memoria de forma que es sometido a fluctuaciones térmicas mediante la aplicación de pulsos eléctricos. Este dispositivo presenta las siguientes características:

- a) Transforma energía térmica asociada al calentamiento del alambre, mediante los pulsos eléctricos, en energía mecánica útil ya que es entregada por éste en forma de un giro continuo en el eje de salida.
- b) Puede ser considerado como un “motor” ya que convierte energía, de una naturaleza diferente a la mecánica, en trabajo mecánico.
- c) El “motor con memoria de forma” trabaja con un principio totalmente diferente al que operan los motores conocidos hasta ahora.
- d) El dispositivo obtenido representa la base tecnológica de una amplia gama de aplicaciones de los MMF que está siendo desarrollada en países del primer mundo.

A partir del principio de operación del “motor con memoria de forma” se diseñó un dispositivo denominado: “Recuperador de Energía de Desecho de Máquinas Térmicas Convencionales” el cual ofrece la posibilidad de incrementar la eficiencia de dichas máquinas y así, contribuir de manera importante en los siguientes aspectos de relevancia nacional:

- a) Disminuir el impacto ambiental que la producción de energía eléctrica a partir de hidrocarburos ocasiona.
- b) Incrementar las reservas de hidrocarburos a través de un menor consumo de éstos.
- c) Ofrece una alternativa para la conversión de energía solar en energía mecánica útil.

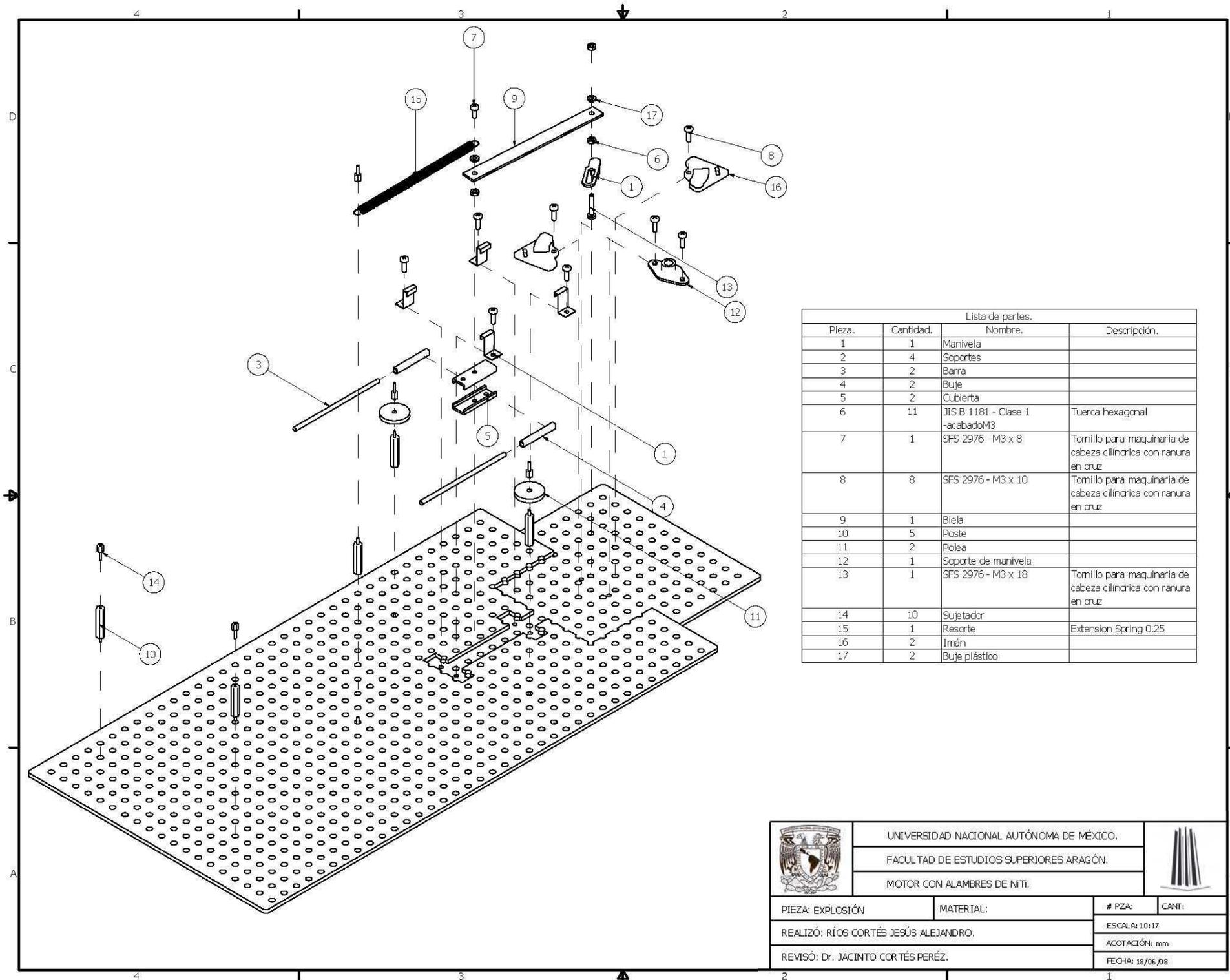
Referencias.

1. K. Otsuka and C. M. Wayman. Introduction to Shape Memory Materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.1-48. (1998).
2. K. N. Melton. General applications of SMA's and smart materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.220-240. (1998).
3. De la Flor López. Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas de los materiales con memoria de forma. Universidad politécnica de Cataluña, Pp.15-26(2005).
4. Patoor E., Berveiller M. *Les alliages à mémoire de forme*, Technologies de pointe. Hermes, PARIS, 1990.
5. Otsuka and C. M. Wayman. Mechanism of shape memory effect and superelasticity. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. pp.27-97. (1998).
6. 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).
7. C. M. Wayman, T. M. Duerig. An Introduction to martensite and shape memory. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. London: Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 3-20.
8. Houtocour, A Eberhard, E Patoor and Berveiller. Thermomechanical Behavior of Monocrystalline Cu-Al-Be Shape Memory Alloys and Determination of the Metastable Phase Memory Properties. *Proceedings of de III European Symposium on Martensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES a*, (ed), J. de Physique Colloque C2, 459. (1994).
9. E.Patoor, A Eberhardt an M. Berveiller. Micromechanical Modeling of Superelasticity in Shape Memory Alloys. *Proceedings of de III European Symposium on Mrtensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES a*, (ed), J de Physique Colloque C-2, pp. 501-506. (1994).
10. D. Rios, S. Belkahala, A. Canales, H. Flores and G. Guenin. Elastic Constants Mesurrement of beta Cu-Al-Be Alloys. *Scripta Metallurgica et Materalia*, 25, 1315-1355. (1991).
11. C. Bouvet, S. Calloch and . C. Lexcellent. Mechanical Behavior of a Cu-Al-Be Shape Memory Alloy under multiaxial proportional and nonproportional loadings. *Journal of Engineering Material and Technology*. 124 , pp. 112-123. (2002).
12. V. Novák, P. Zárubová. Anisotropy of transformation characteristics of Cu-Base shape Memory alloys. *Materials Science and Engineering. A* 234-236. pp. 414-417. (1997).
13. W. M. Huang and J. J. Zhu. To predict the behavior of shape memory alloys under proportional load. *Mechanics of Materials*. 34, pp. 547-561. (2002).

14. H. Flores. Stabilité thermodynamique de la phase beta et L'effect memoire double sens d'un alliage a memoire de forma du type Cu-Al-Be. Thèse de doctorat: Inst. Nat. Sc. Appl., Lyon., FRA 1993.
15. 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).
16. G. N. Sure and L. C. Brown. *The Mechanical Properties of refined β Cu-Al-Ni Strain-Memory Alloys*. Metallurgical Transactions A. 5^a. pp. 613-1621. (1984).
17. S. S. Leu, Y. C. Chen, R. D. Jean. Effect of rapid solidification on mechanical properties of Cu-Al-Ni shape memory alloys. Journal of Materials Science. 27. pp. 2792-2798. (1992).
18. K. Otsuka and C. M. Wayman. Superelasticity Effects and Stress-Induced Martensitic Transformations in Cu-Al-Ni Alloys. *Acta Metallurgica*, 24, 207-226. (1976).
19. 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).
20. 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).
21. T. E. Buchheit, S. L. Kumpf and J. A. Wert. Modeling the Stress-Induced Transformation Behavior of Shape Memory Alloy Single Crystals. *Acta metall. mater.* 43-11. pp. 4189-4199. (1995).
22. R. J. Comstock, T. E. Buchheit, M. Somerday and J. A. Wert. Modeling the Transformation Stress of Constrained Shape Memory Alloy Single Crystals. *Acta Mater.* 44-9, pp. 3505-3514. (1996).
23. P. Delobelle and C. L'excellent. A Phenomenological three dimensional model for pseudoelastic behavior of Shape Memory Alloys. *J. de Physique IV.C-1*, pp.293-300. (1996).
24. S. Lecterq, G. Bourbon and C. L'excellent. Plasticity Like Model of Martensite Phase in Shape Memory Alloys. *Proceedings of de III European Symposium on Martensitic Transformations* BARCELONA, SPAIN: PLANES a, (ed), J de Physique Colloque C-2, p. 513. (1994).
25. E. J. Graesser, F.A. Cozzarelli. A proposed Three-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys. *Journal of Intelligent. Materials Systems and Structures* 5, pp. 78-89. (1994).
26. Rohan Abeyaratne, Sang-Joo Kim and J. K. Knowles. A one-dimensional continuum model for shape memory alloys. *Int. J. Solids Structures*. 31. No. 16, pp.2229-2249. (1994).

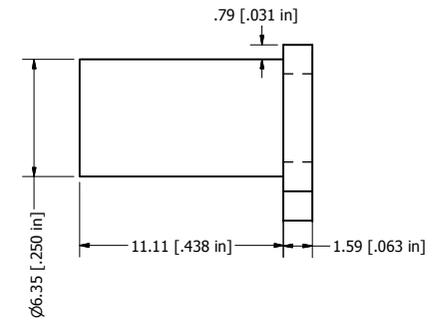
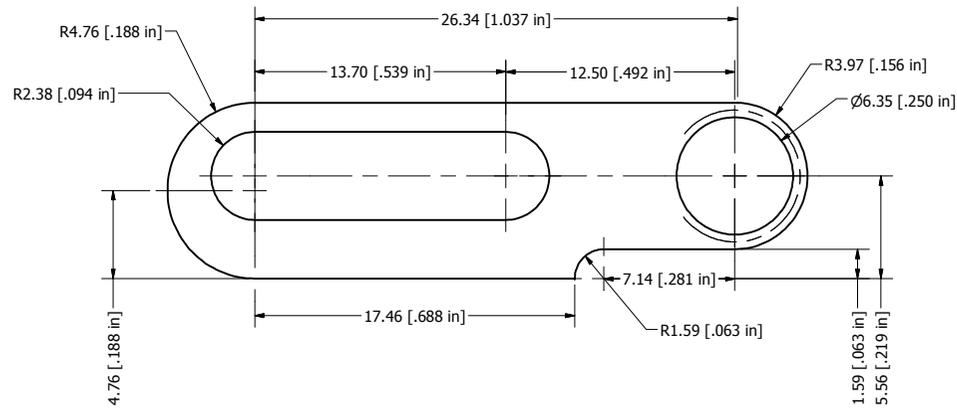
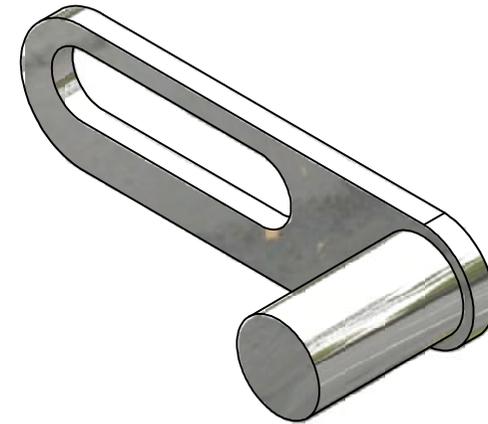
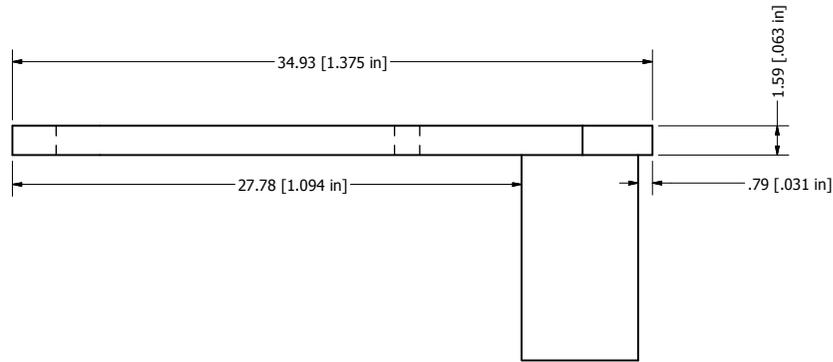
27. L. C. Brinson. Constitutive behavior of shape memory alloys: one dimensional thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. Conference on Recent Advances in Adaptive and Sensory Materials and their Applications, Virginia Tech, Blacksburg, V. A. 27-29 April. Technomic Publishing. New York. (1992)
28. L. C. Brinson, Ina Schmidt and Rolf Lammering. Stress-Induced transformation behavior of a polycrystalline NiTi shape memory alloy: Micromechanical Investigations via in situ Optical Microscopy. Submitted to JMPS, (2003).
29. S. Cardona, D Clos. Teoría de Máquinas. Universidad Politécnica de Catalunya. Pp.13-54. (2001)
30. R. Calero, J. Carta. Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros. McGraw-Hill Interamericana de España. Pp.1-67. (1999)
31. J. C. Miranda. Mecanismos. Instituto Tecnológico y de estudios superiores de Monterrey. Pp.1-36. (2003)
32. J.M. Rico. Introducción a la cinemática de las máquinas. Una guía de estudio para la clase de mecanismos. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica Salamanca Gto. México. (2006)
33. M. A. Pucheta, A Cardona. Software para síntesis de mecanismos planos. Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC) Santa Fe, Argentina. (2004)
34. J. Cortés, H. Becerril. Diseño de un termo-actuador basado en alambres con memoria de forma. Laboratorio de Mecánica, Centro Tecnológico Aragón, ENEP Aragón UNAM. Edo. de México. (2003)
35. F. J. Peña. Aleaciones con memoria de forma, una filosofía diferente en la ingeniería y el diseño con materiales. Universidad Tecnológica de Cataluña, (2002).
36. Diccionario de la lengua española - Vigésima segunda edición, (2001).
37. J. Cortés. Superelasticidad en aleaciones Cu-Al-Be con memoria de forma. ENEP Aragón UNAM. Edo. de México. (1997)
38. L. Cheverría. Puesta en marcha de un dispositivo para obtener muestras con doble efecto memoria de forma. ENEP Aragón UNAM. Edo. de México. (1997)
39. R. L. Mott, V. González, S. Saldaña, A. Hernández, J. Villanueva. Diseño de máquinas. Cuarta edición. Pearson education. Pp. 729-769. (2006)

MOTOR CON ALAMBRES DE Ni-Ti.

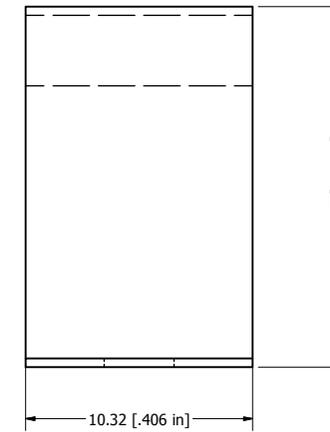
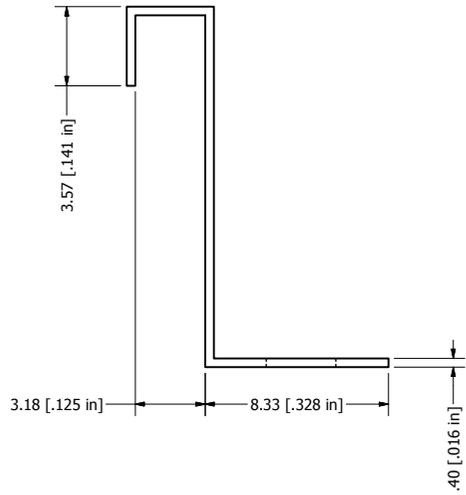
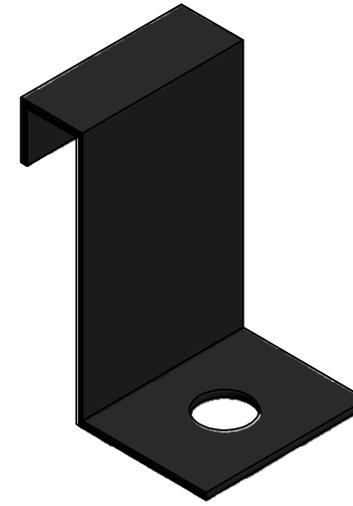
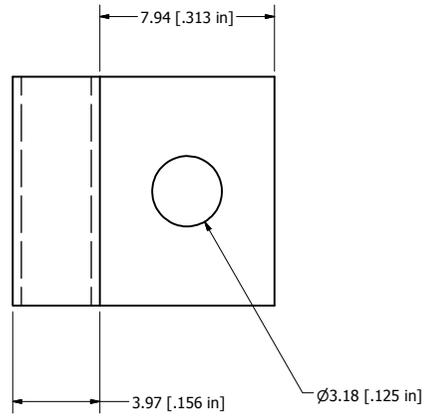


Lista de partes.			
Pieza.	Cantidad.	Nombre.	Descripción.
1	1	Manivela	
2	4	Soportes	
3	2	Barra	
4	2	Buje	
5	2	Cubierta	
6	11	JIS B 1181 - Clase 1 -acabadoM3	Tuerca hexagonal
7	1	SFS 2976 - M3 x 8	Tomillo para maquinaria de cabeza cilíndrica con ranura en cruz
8	8	SFS 2976 - M3 x 10	Tomillo para maquinaria de cabeza cilíndrica con ranura en cruz
9	1	Biela	
10	5	Poste	
11	2	Polea	
12	1	Soporte de manivela	
13	1	SFS 2976 - M3 x 18	Tomillo para maquinaria de cabeza cilíndrica con ranura en cruz
14	10	Sujetador	
15	1	Resorte	Extension Spring 0.25
16	2	Imán	
17	2	Buje plástico	

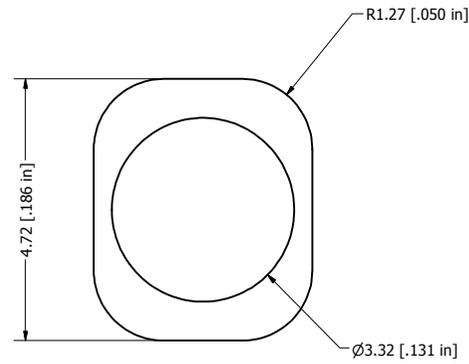
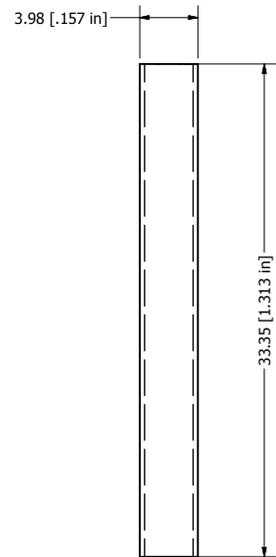
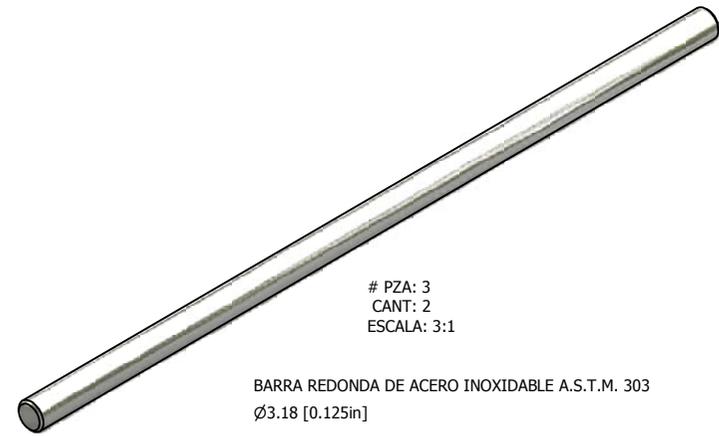
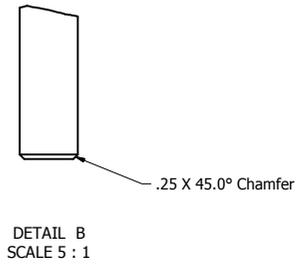
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITI.		
PIEZA: EXPLOSIÓN	MATERIAL:	# PZA:	CANT:
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 10:17	
REVISÓ: DR. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



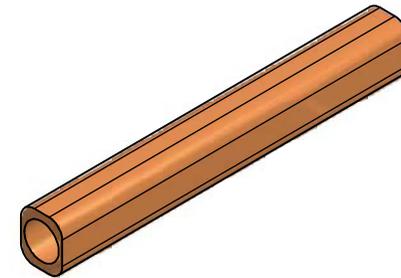
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITI.		
PIEZA: MANIVELA.	MATERIAL: ACERO INOXIDABLE A.S.T.M. 303	# PZA: 1	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 5:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



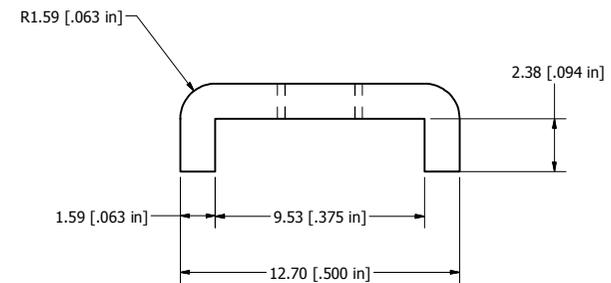
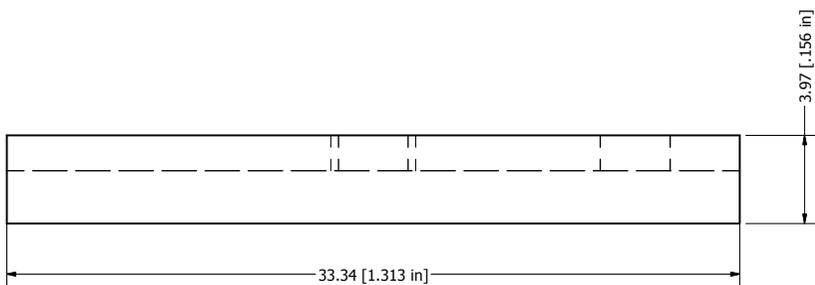
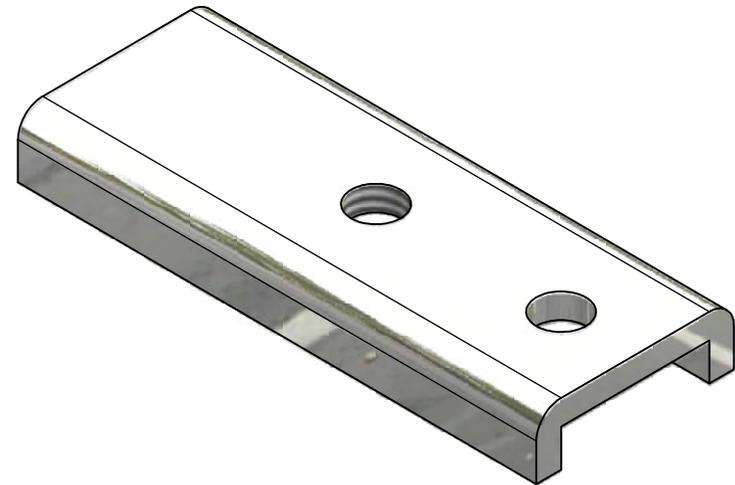
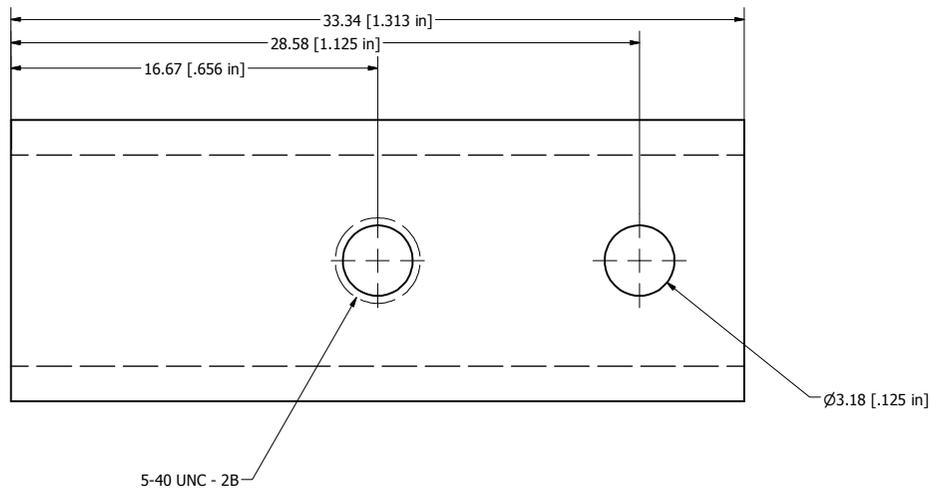
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: SOPORTE.	MATERIAL: ACERO 1018	# PZA: 2	CANT: 4
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 6:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



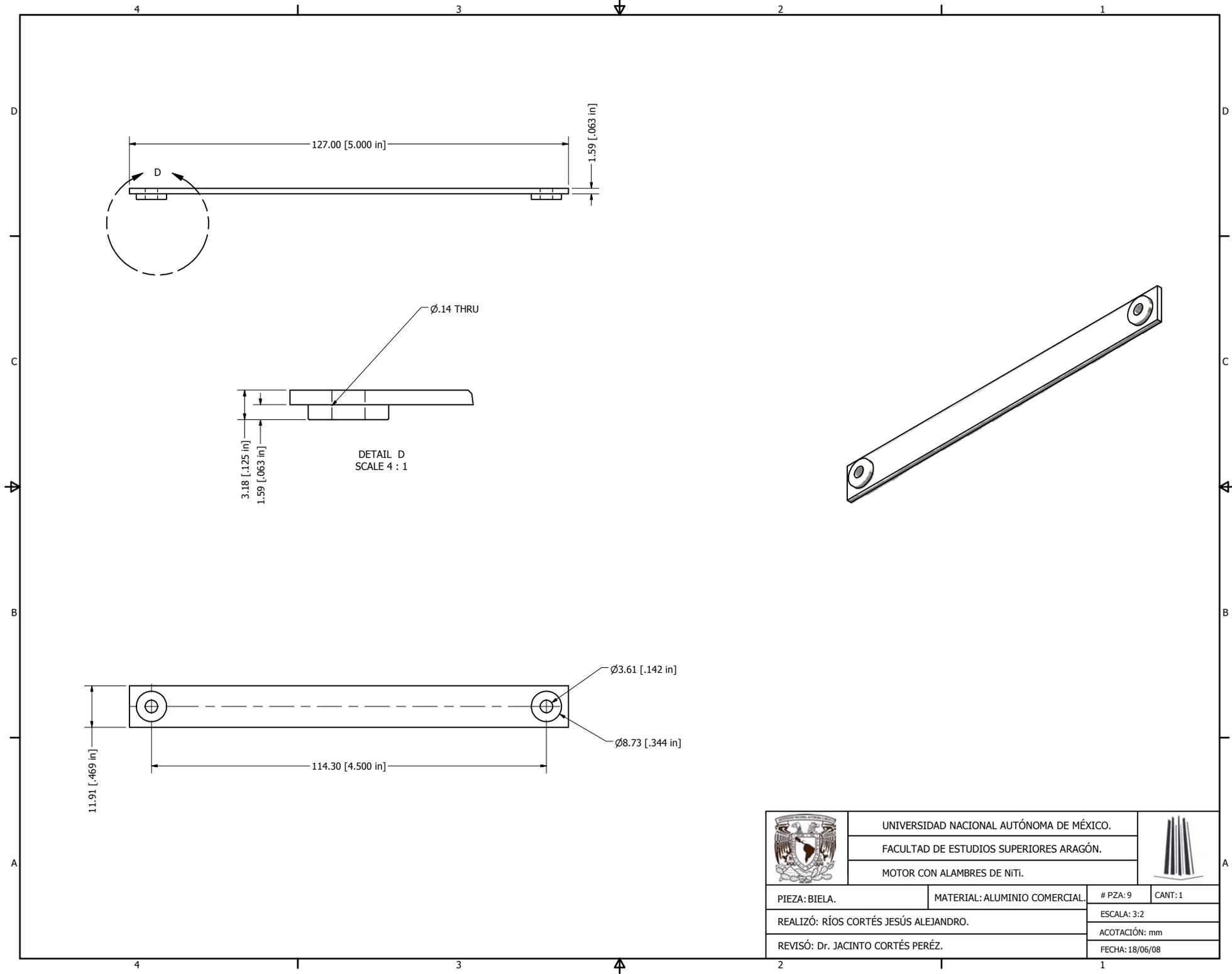
SCALE 15 : 1



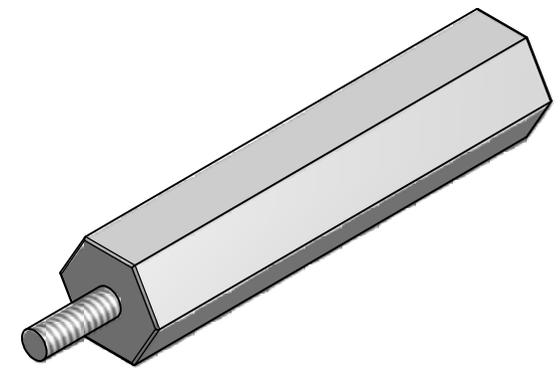
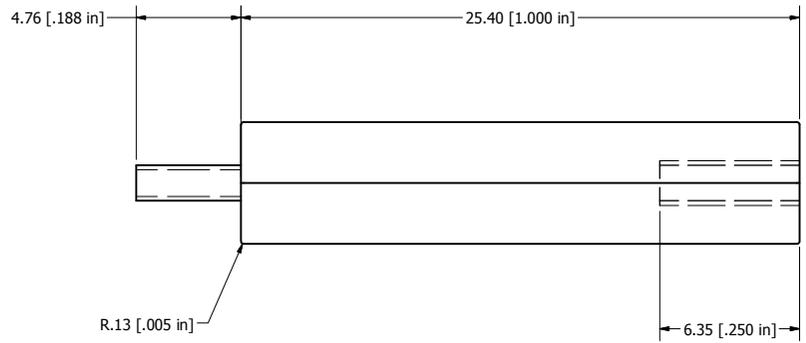
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: BUJE.	MATERIAL: BRONCE A.S.T.M.B-145(3A)	# PZA: 4	CANT: 2
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 4:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



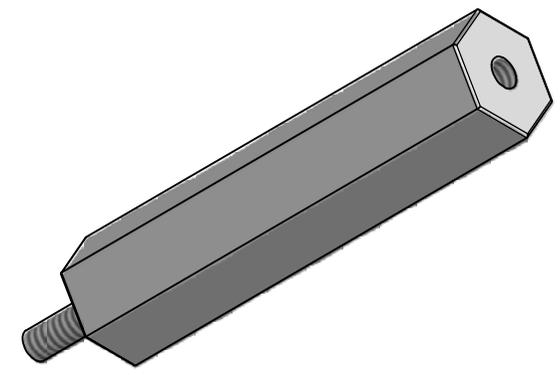
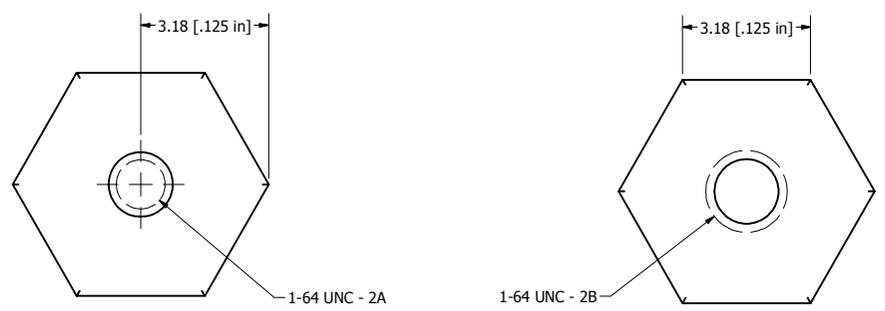
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: CUBIERTA.	MATERIAL: ALUMINIO COMERCIAL.	# PZA: 5	CANT: 2
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 6:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



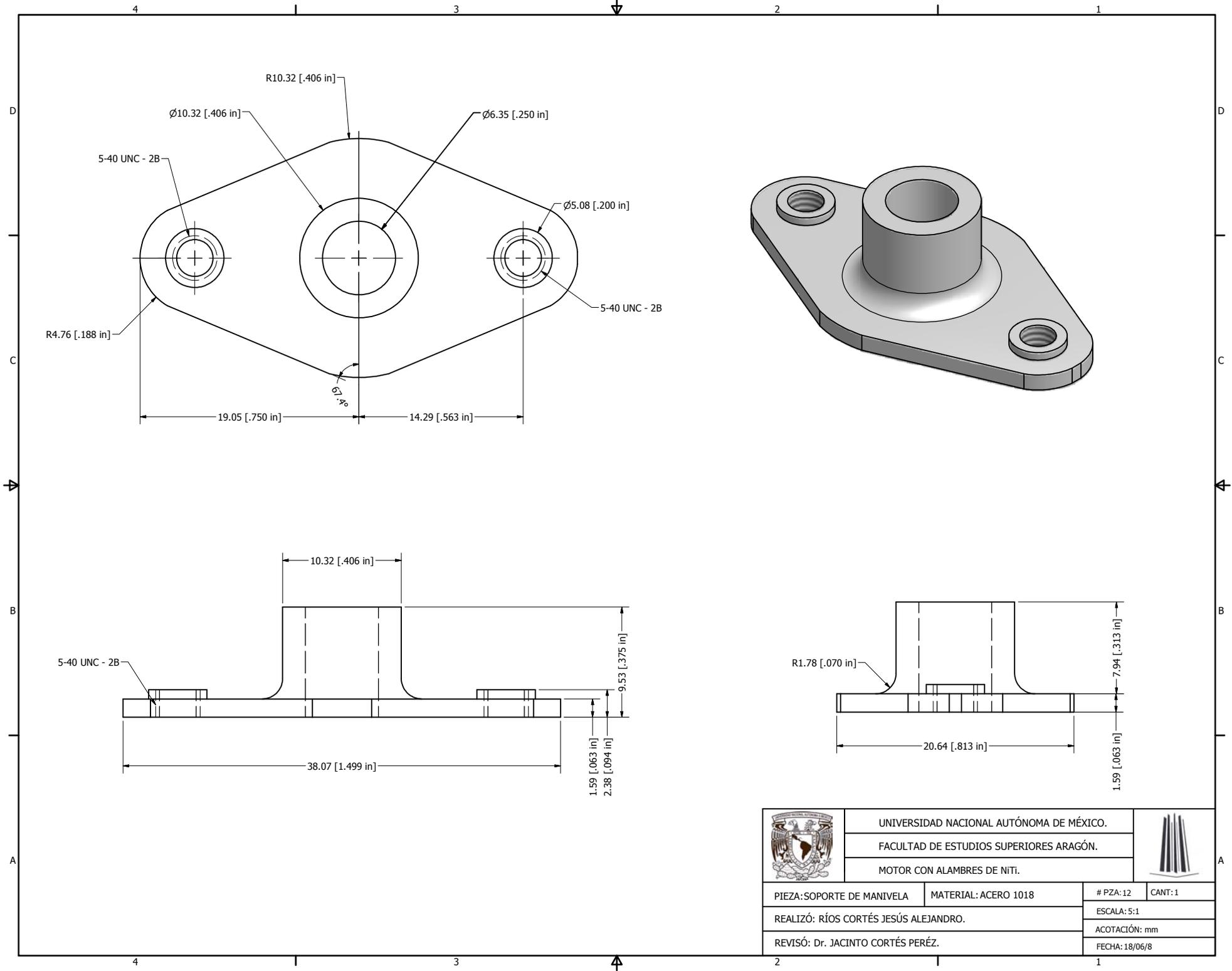
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: BIELA.	MATERIAL: ALUMINIO COMERCIAL.	# PZA: 9	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 3:2	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



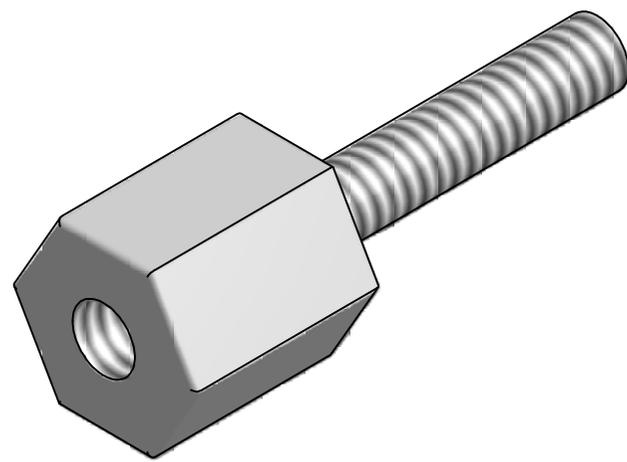
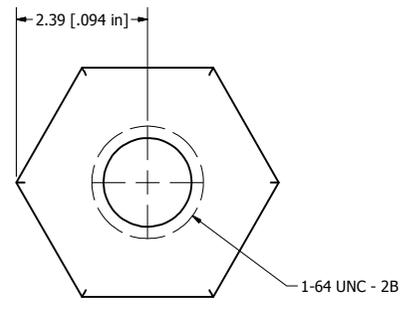
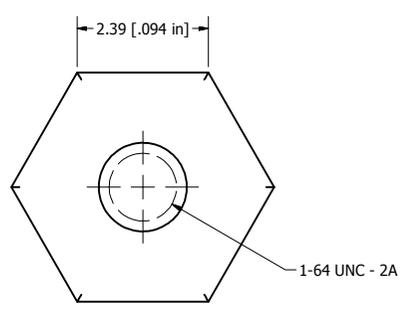
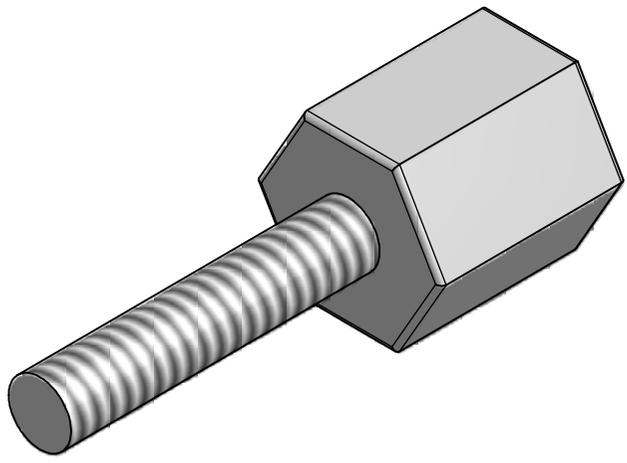
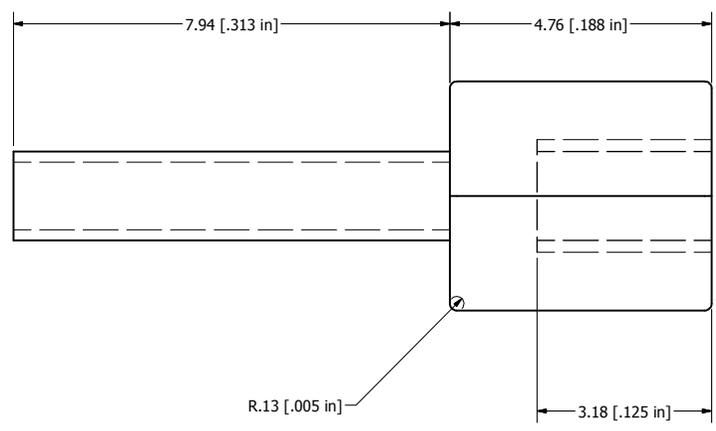
ESCALA 11:1



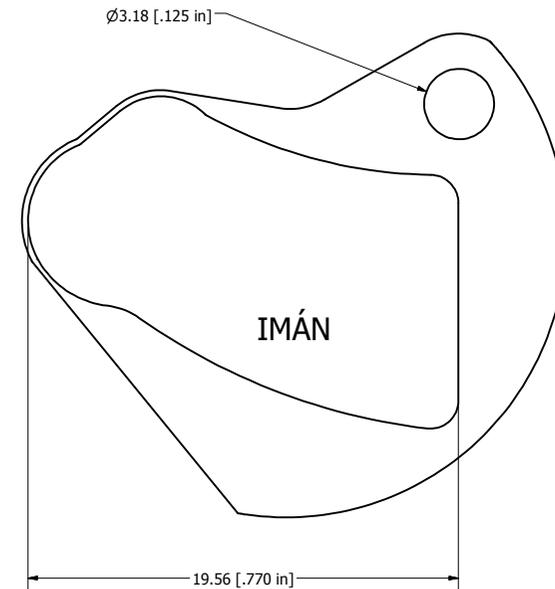
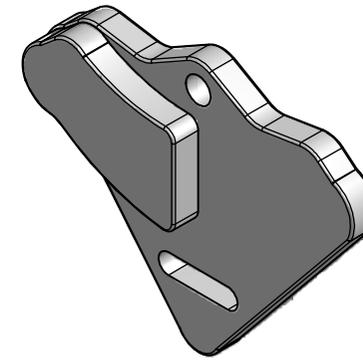
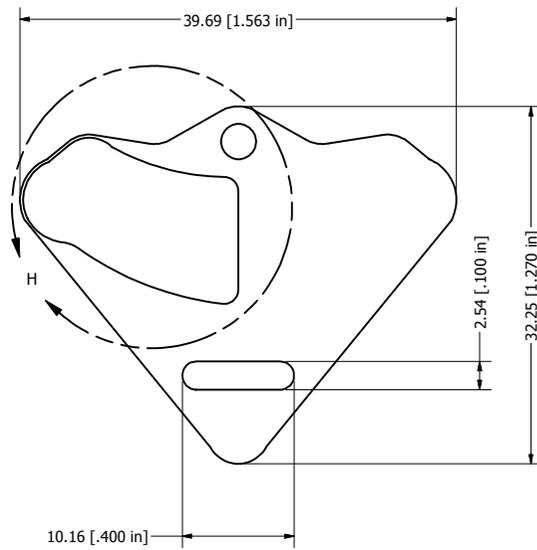
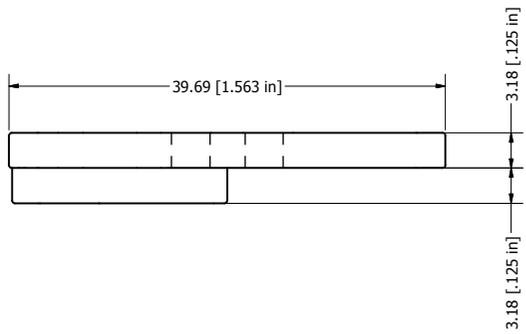
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: POSTE.	MATERIAL: ALUMINIO COMERCIAL	# PZA: 10	CANT: 5
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 6:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: SOPORTE DE MANIVELA	MATERIAL: ACERO 1018	# PZA: 12	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 5:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/8	

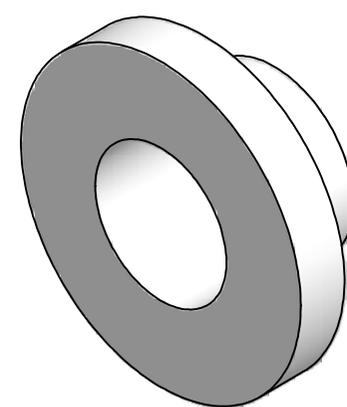
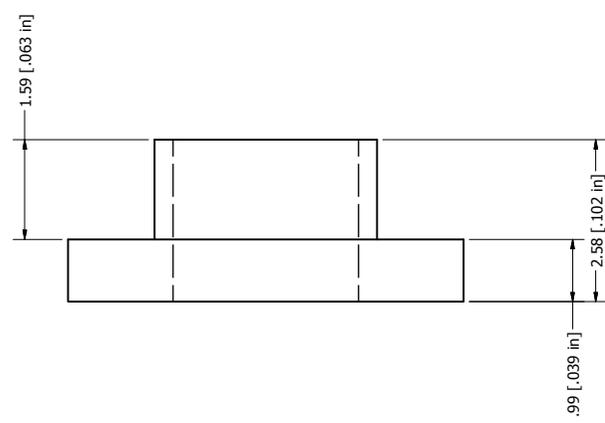
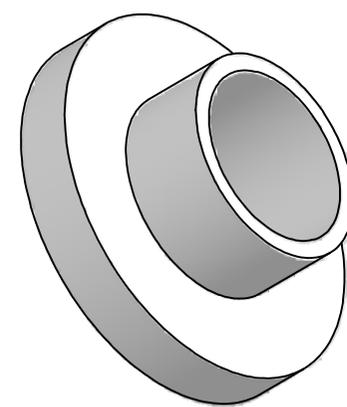
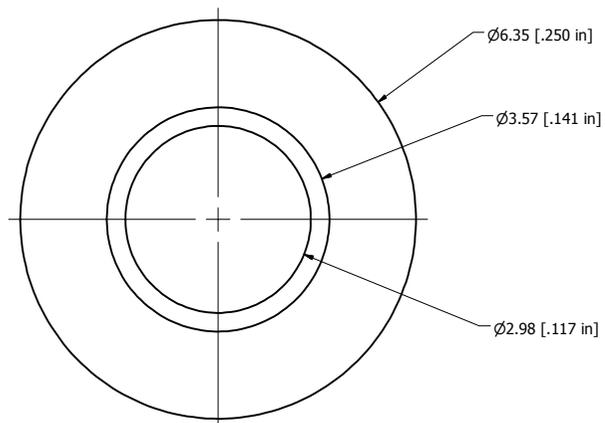


	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: SUJETADOR	MATERIAL: ALUMINIO COMERCIAL	# PZA: 14	CANT: 10
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 15:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	

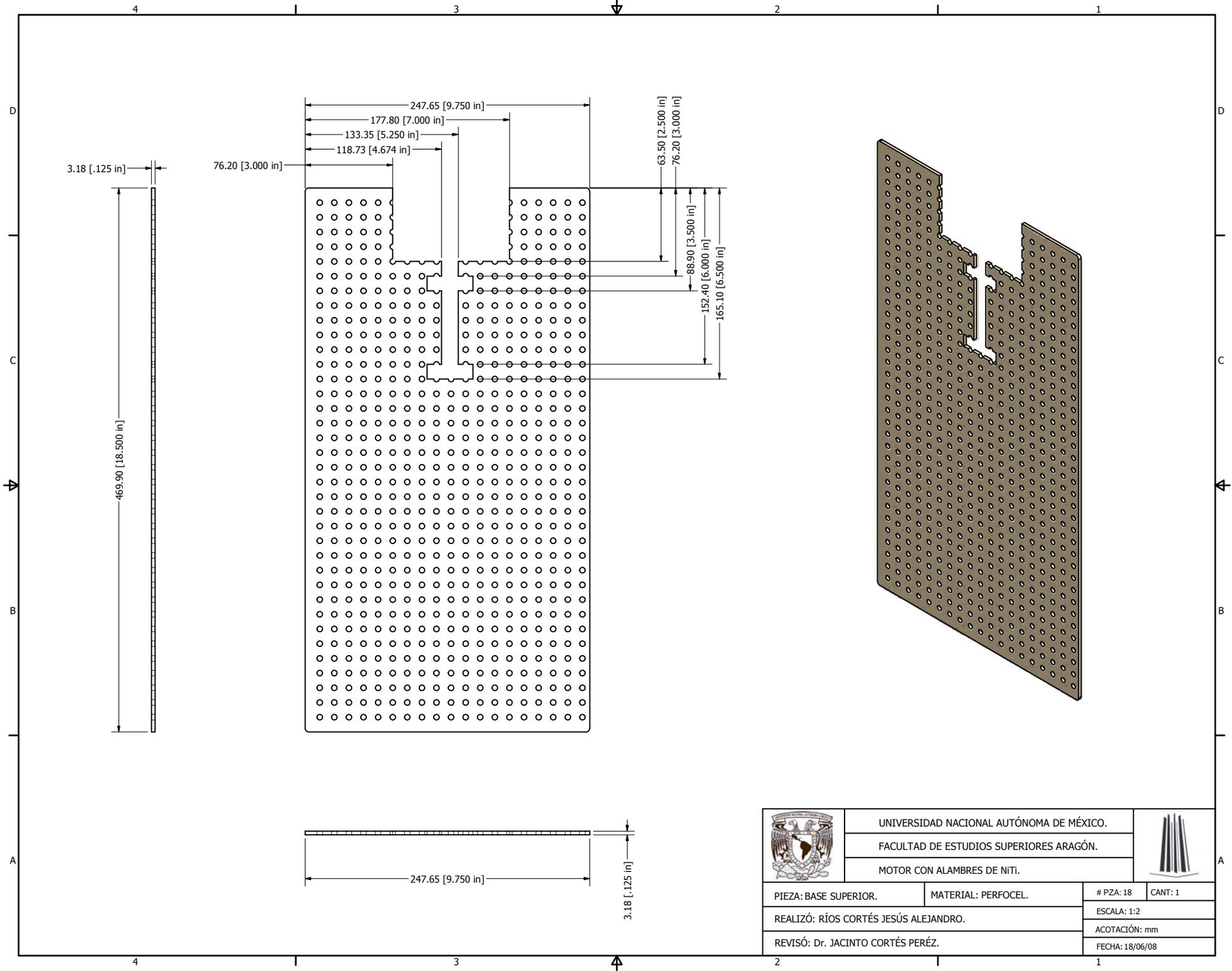


DETAIL H
SCALE 6 : 1

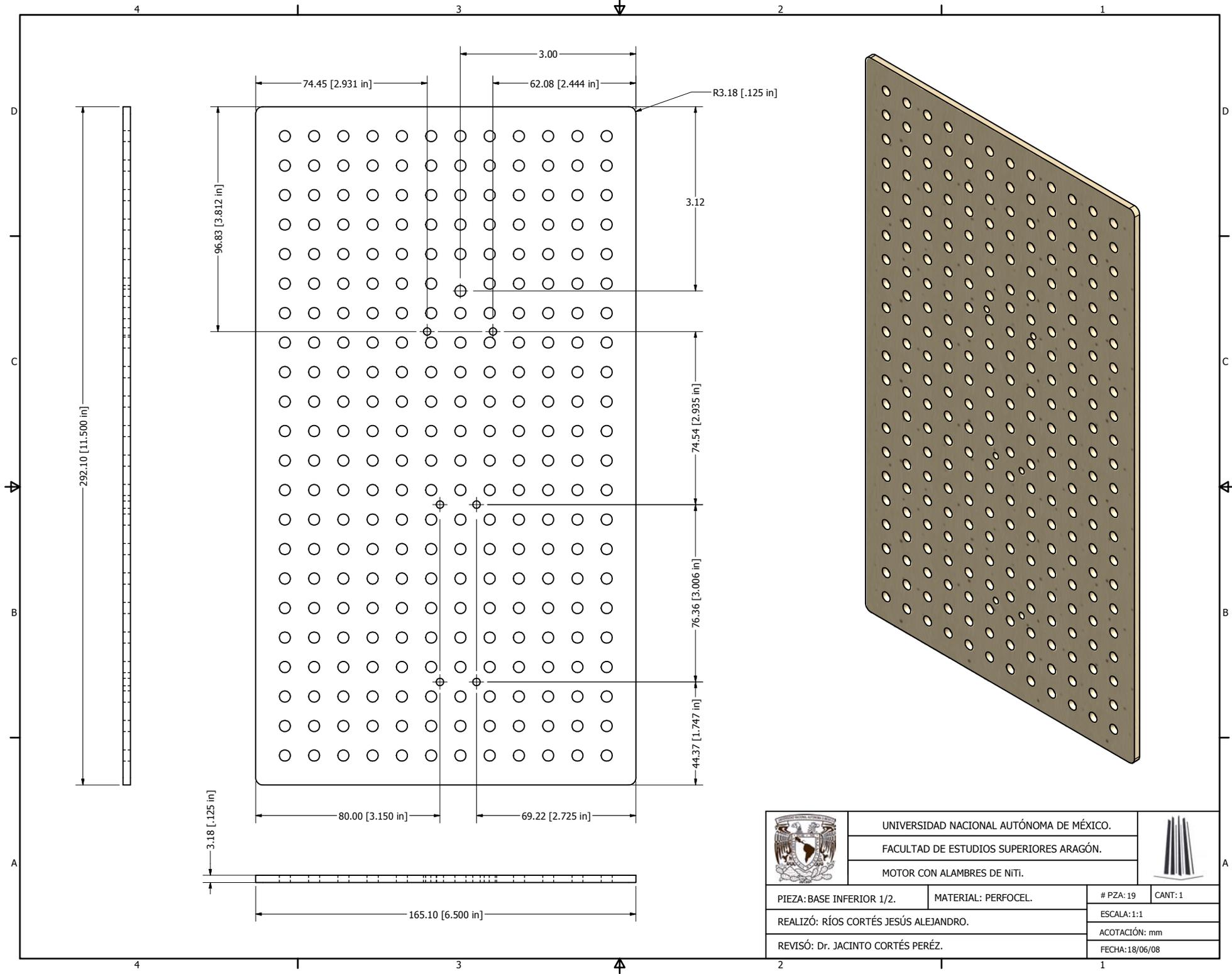
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: IMÁN.	MATERIAL: ACERO 1018, NdFeB	# PZA: 16	CANT: 2
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 3:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



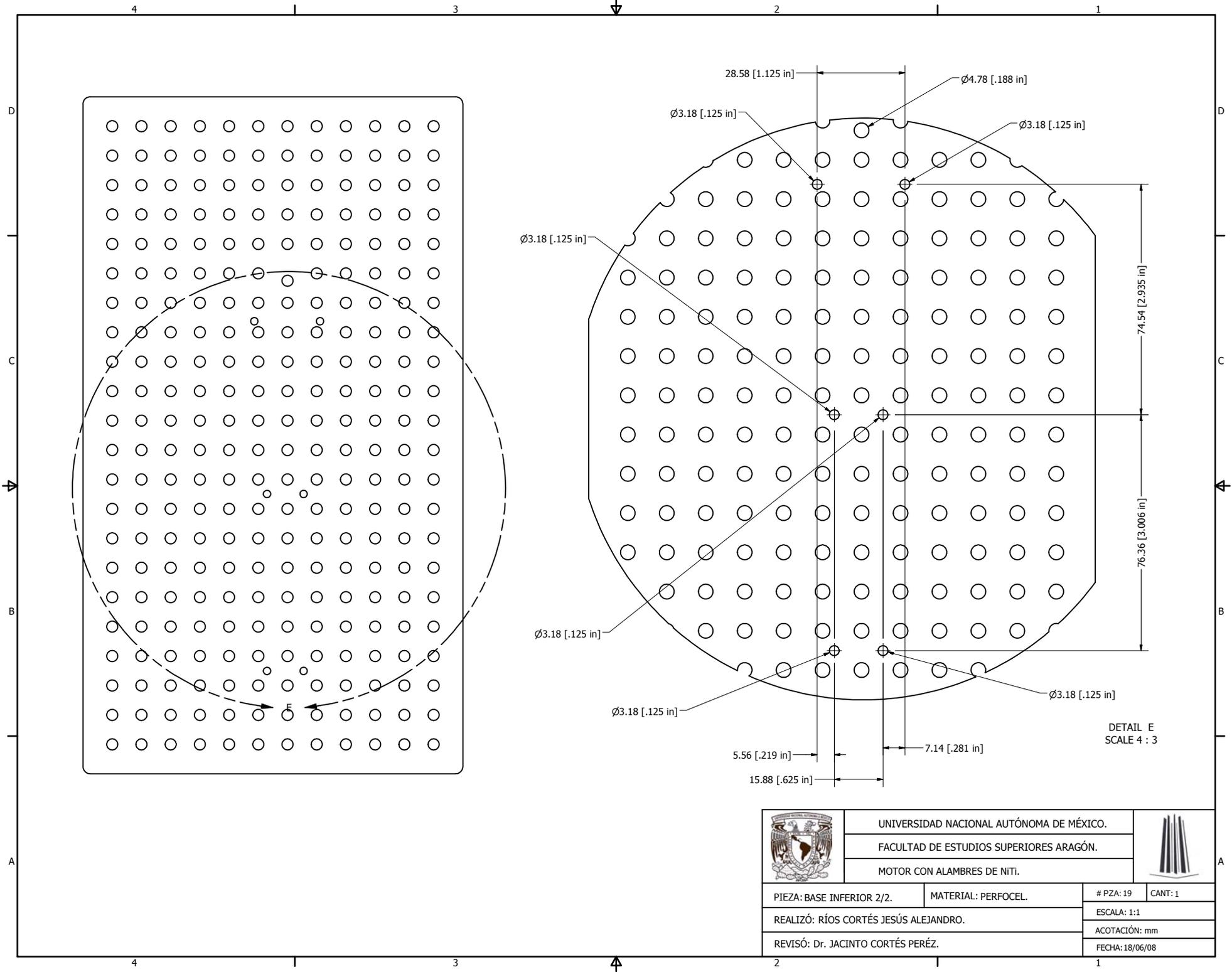
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: BUJE PLÁSTICO.	MATERIAL: NYLAMID.	# PZA: 17	CANT: 2
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 17:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITI.		
PIEZA: BASE SUPERIOR.	MATERIAL: PERFOCEL.	# PZA: 18	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:2	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	

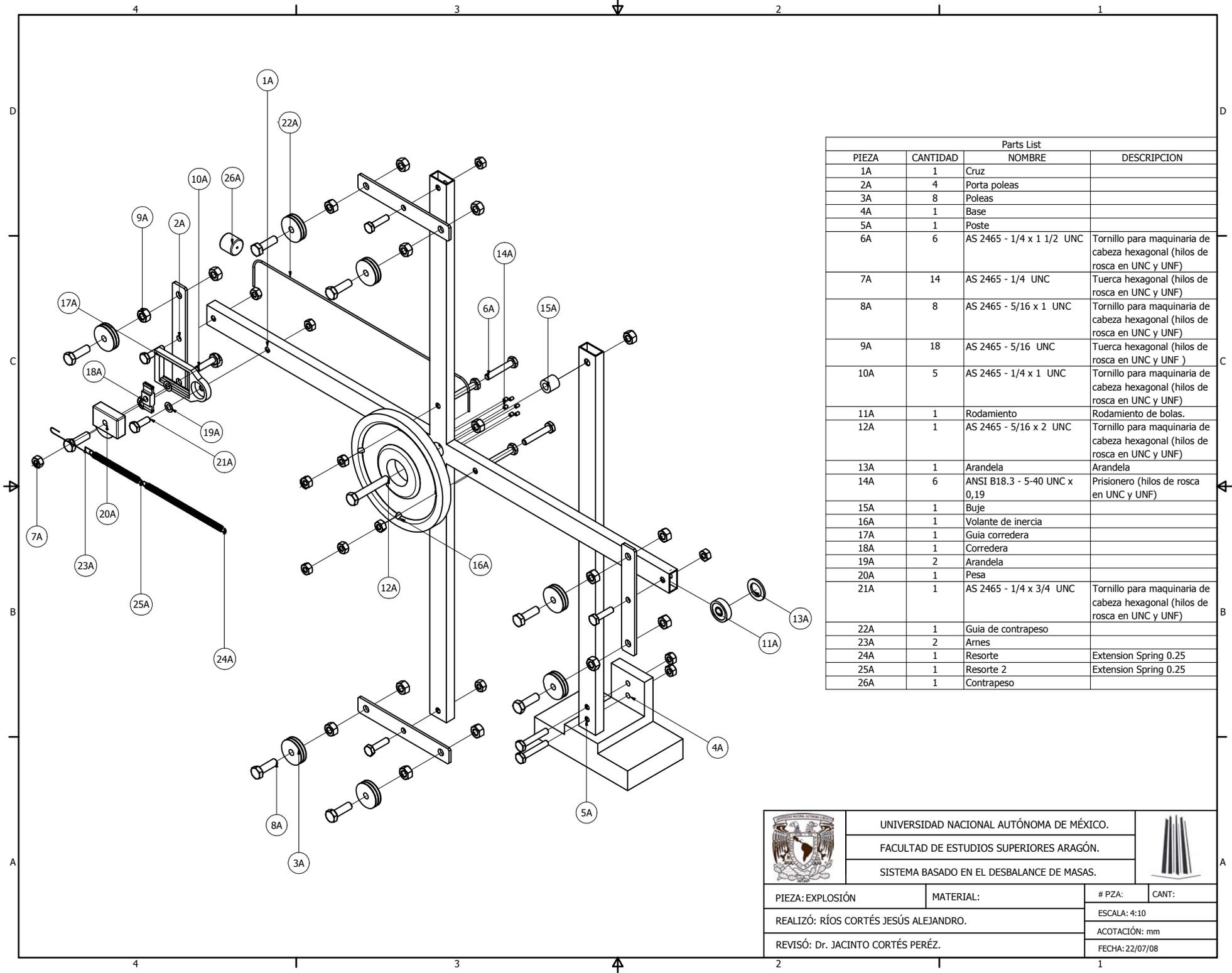


	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: BASE INFERIOR 1/2.	MATERIAL: PERFOCEL.	# PZA: 19	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	

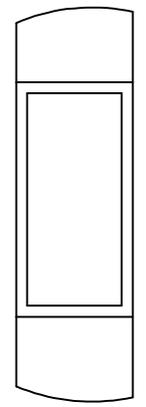
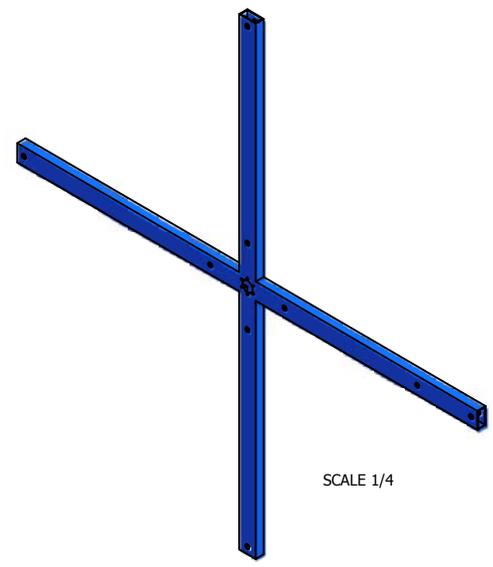
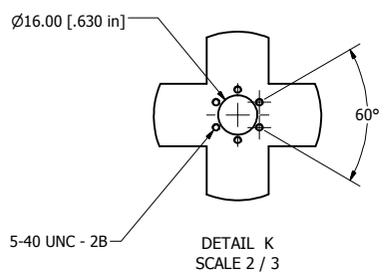
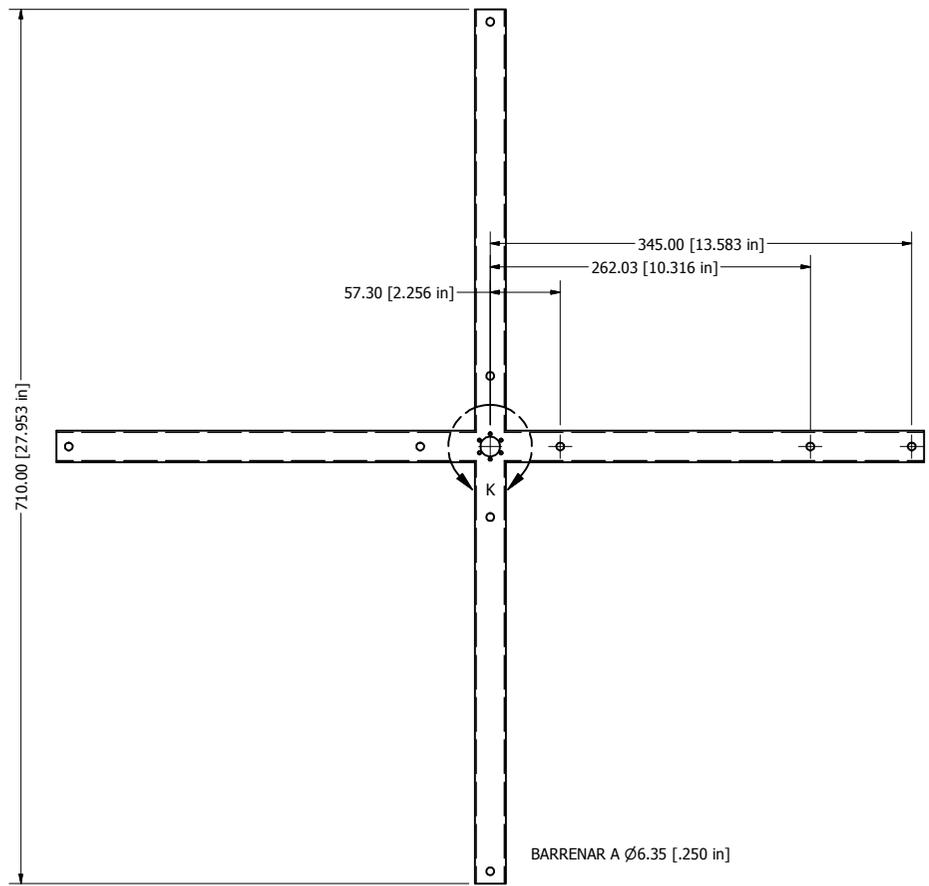
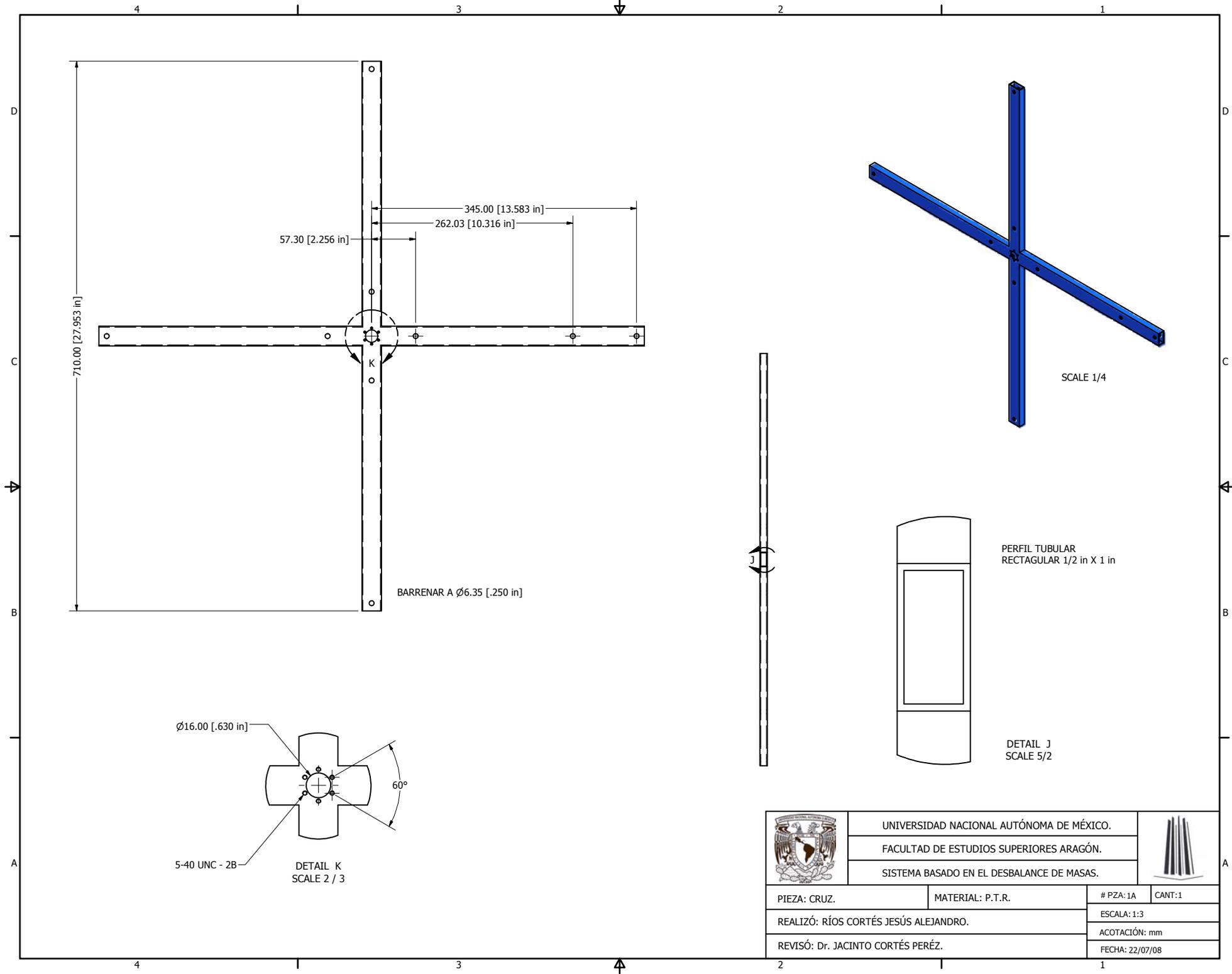


	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	MOTOR CON ALAMBRES DE NITL.		
PIEZA: BASE INFERIOR 2/2.	MATERIAL: PERFOCEL.	# PZA: 19	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 18/06/08	

**SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE
MASAS.**



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.		
PIEZA: EXPLOSIÓN	MATERIAL:	# PZA:	CANT:
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 4:10	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	



PERFIL TUBULAR
RECTAGULAR 1/2 in X 1 in

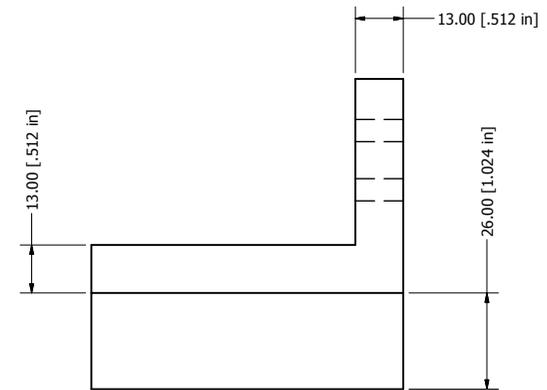
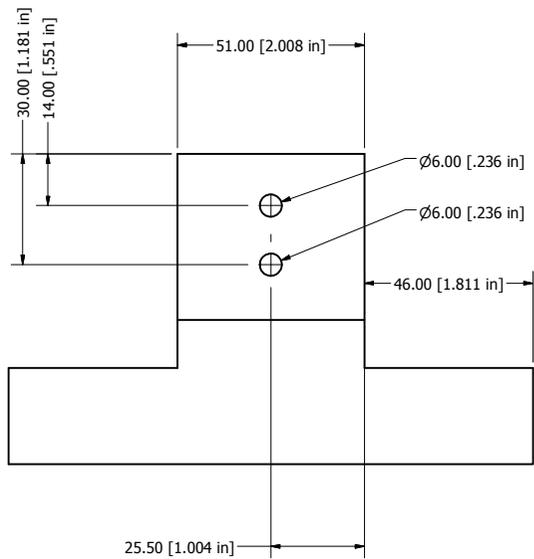
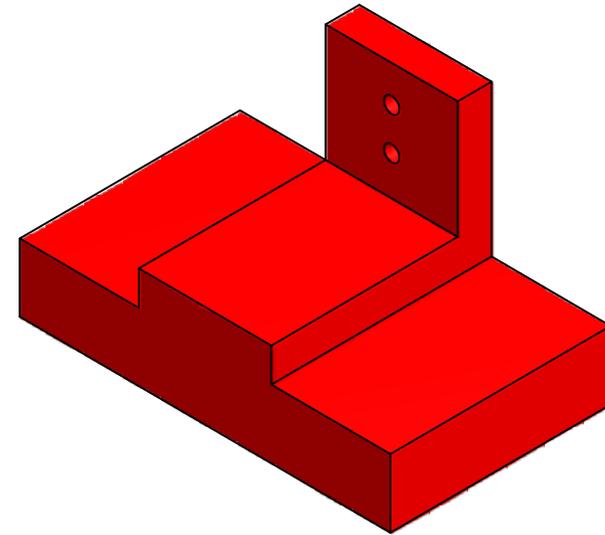
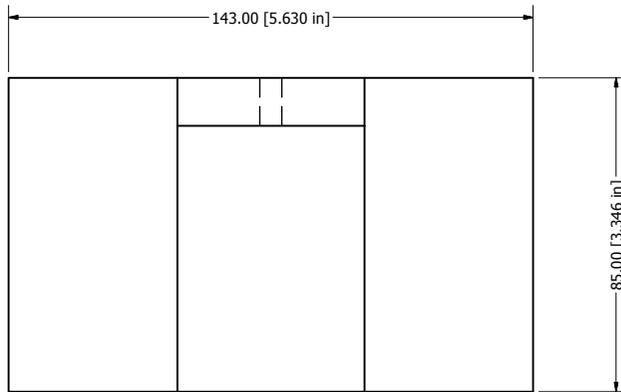
DETAIL J
SCALE 5/2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.
SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.



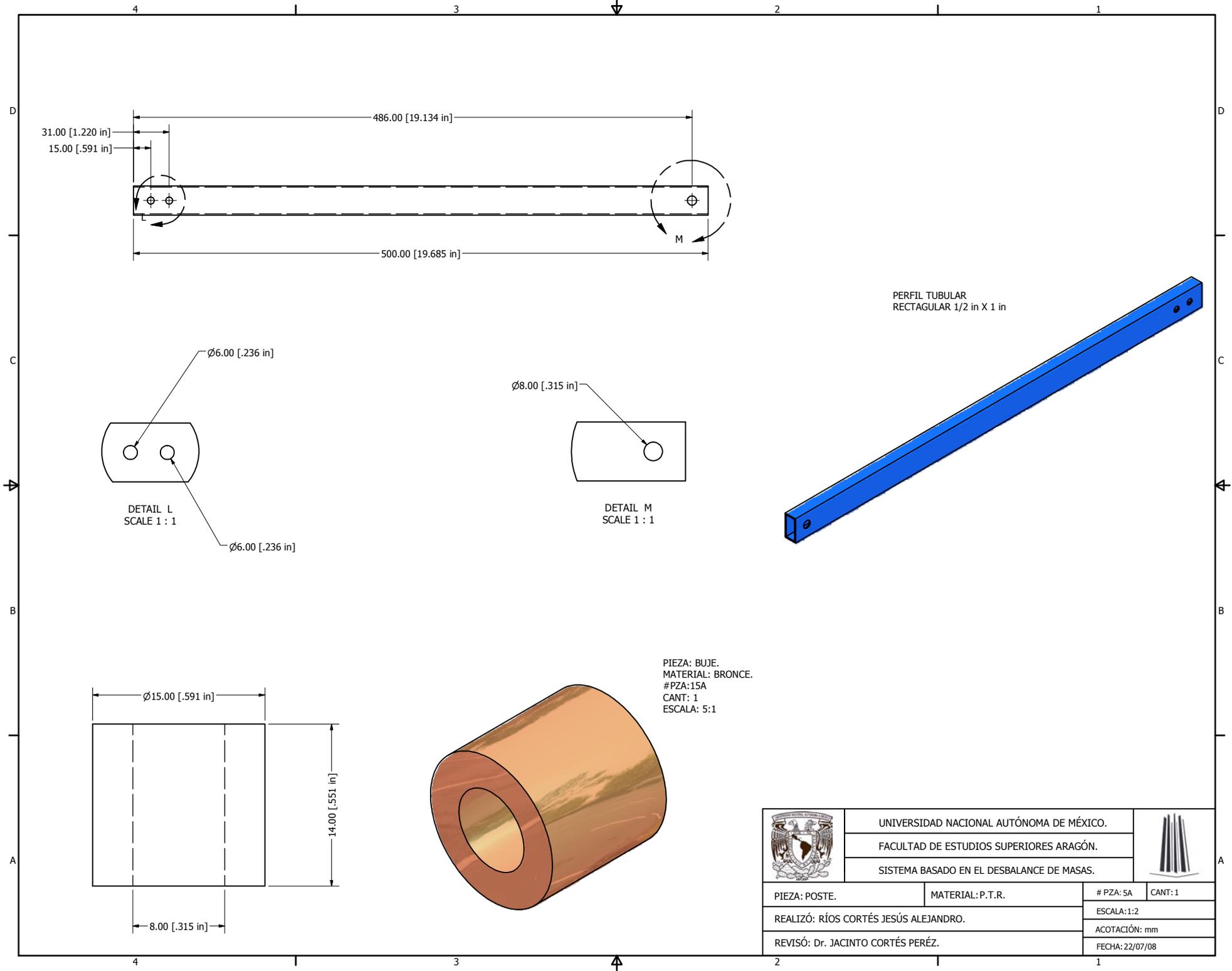
PIEZA: CRUZ.	MATERIAL: P.T.R.	# PZA: 1A	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:3	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	



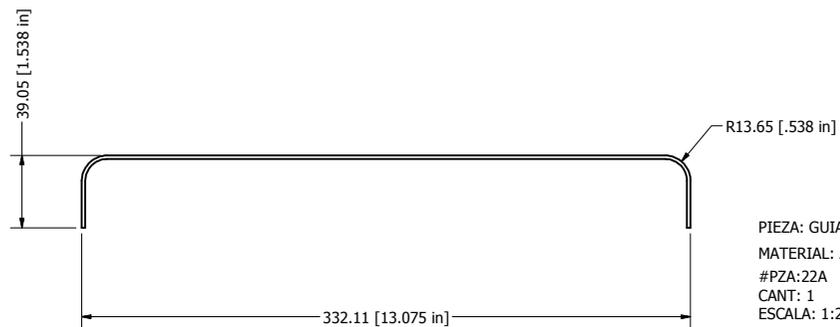
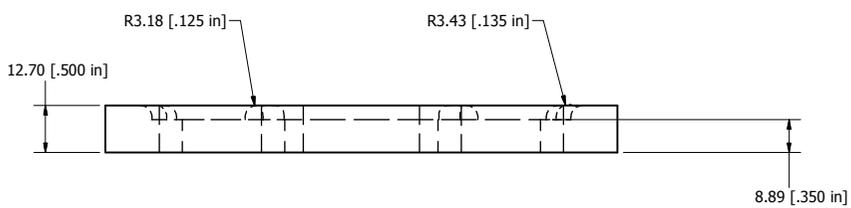
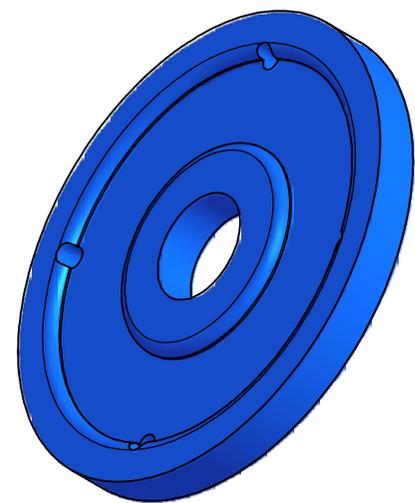
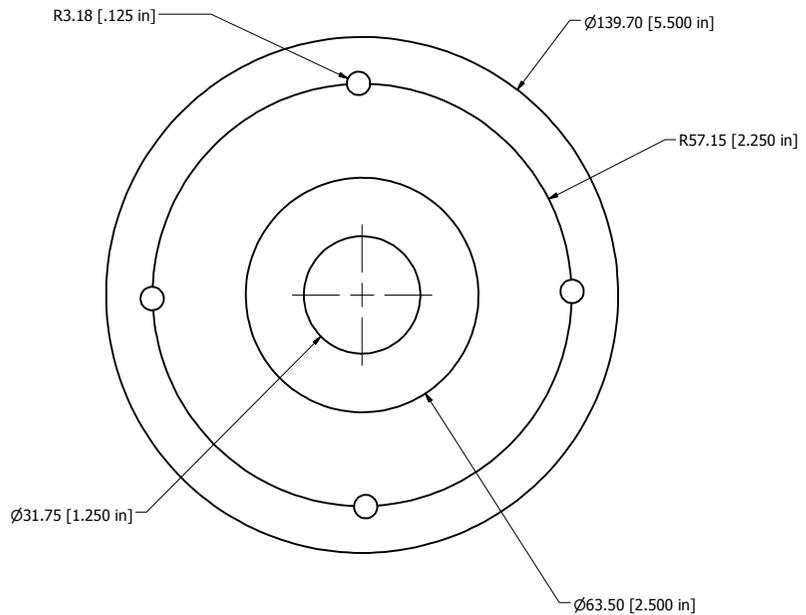
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.
 SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.



PIEZA: BASE.	MATERIAL: ACERO 1018.	# PZA: 4A	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.		
PIEZA: POSTE.	MATERIAL: P.T.R.	# PZA: 5A	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:2	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	



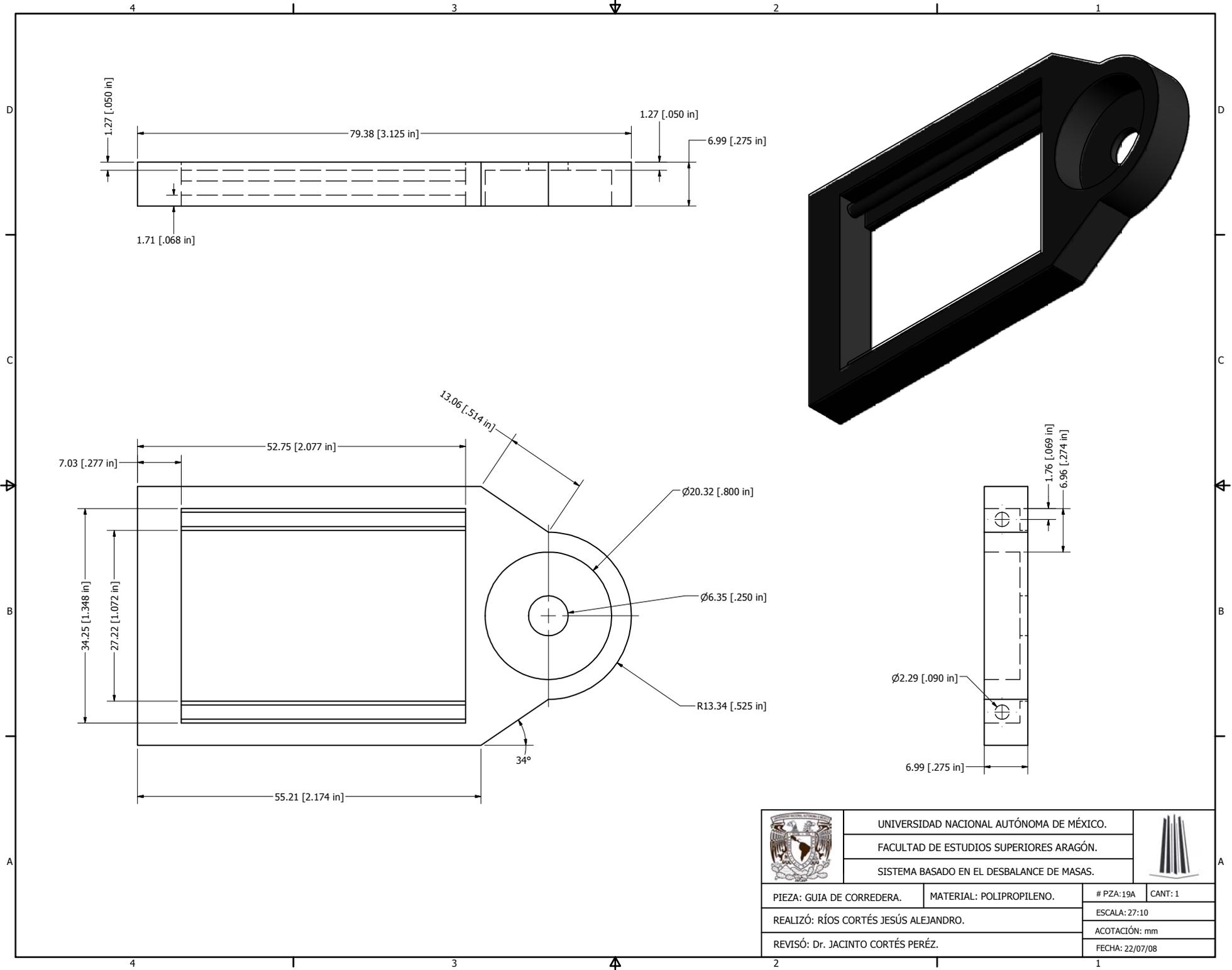
PIEZA: GUIA DE CONTRAPESO.
 MATERIAL: ALAMBRE RECOCIDO 18 (BWG) Ø1.25
 #PZA:22A
 CANT: 1
 ESCALA: 1:2

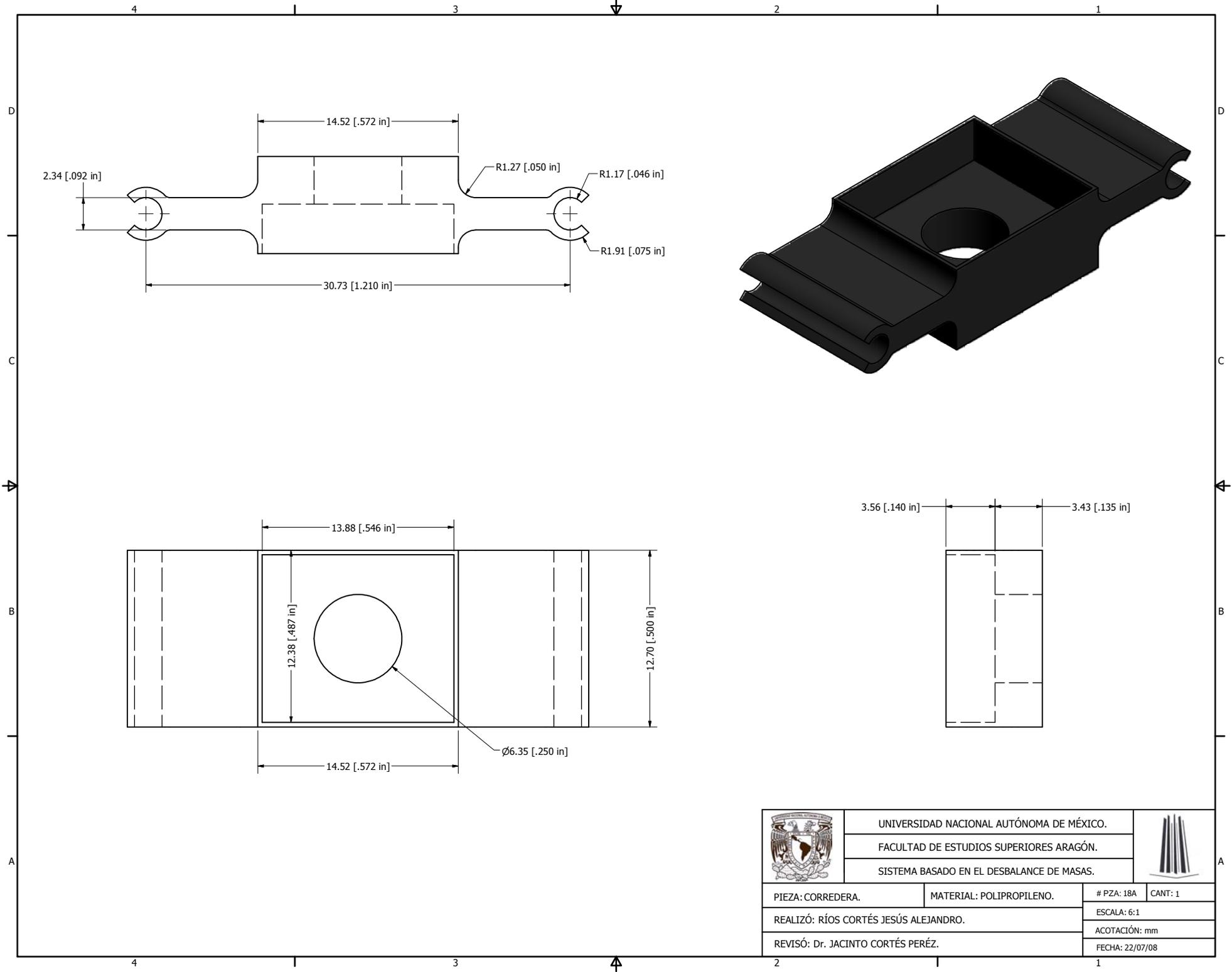


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.
 SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.

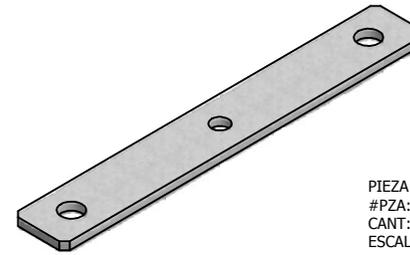
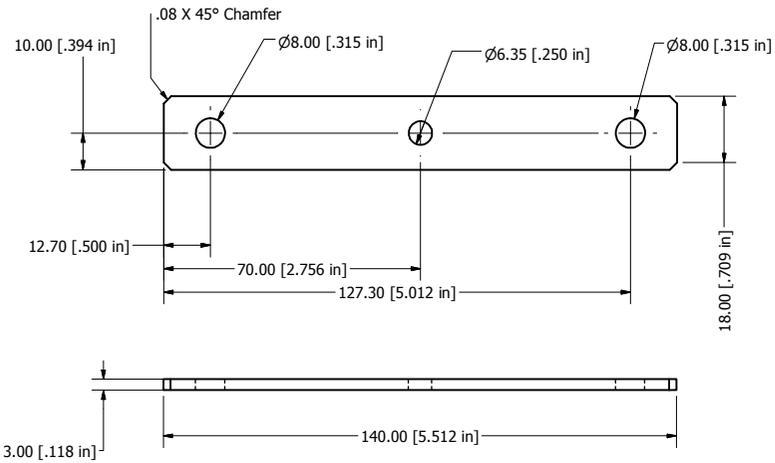


PIEZA: VOLANTE DE INERCIA.	MATERIAL: HIERRO FUNDIDO GRIS.	# PZA: 16A	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 1:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	

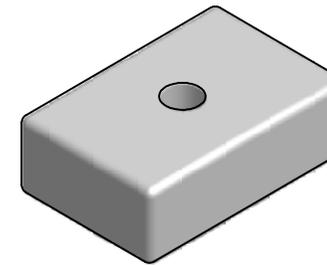
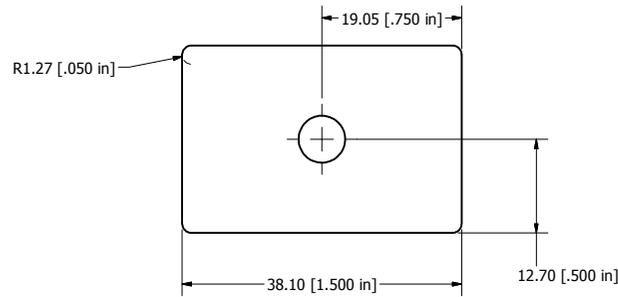




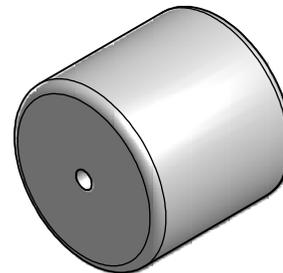
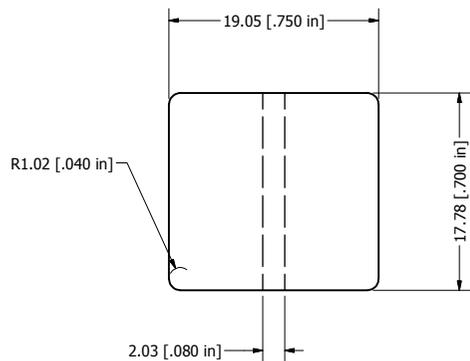
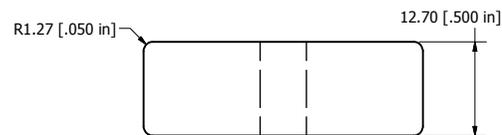
	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.		
PIEZA: CORREDERA.	MATERIAL: POLIPROPILENO.	# PZA: 18A	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 6:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	



PIEZA: PORTA POLEAS.
#PZA:2A
CANT: 4
ESCALA: 1:1



PIEZA: PESA.
#PZA:20A
CANT: 1
ESCALA: 2:1



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	SISTEMA BASADO EN EL DESBALANCE DE MASAS.		
PIEZA: CONTRAPESO.	MATERIAL: ACERO 1018	# PZA: 26A	CANT: 1
REALIZÓ: RÍOS CORTÉS JESÚS ALEJANDRO.		ESCALA: 3:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA: 22/07/08	

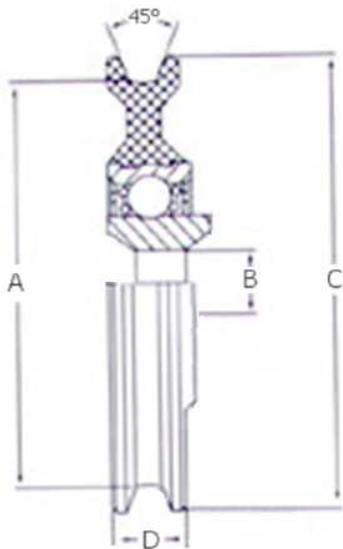
Poleas empleadas en el Motor con Alambres de Ni-Ti (MANT) y para el Sistema Basado en el Desbalance de Masas (SBDM).

Plastic Cable Idler Pulley.

MANT



SBDM



	A	B	C	D
MANT	0.750in	0.125in	0.875in	0.125in
SBDM	1.010in	0.315in	1.180in	0.315in



LAKESIDE INDUSTRIES INC.