



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGON**

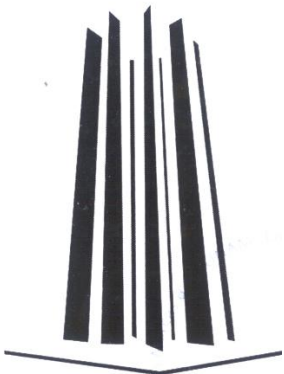
**“DISEÑO DE PERSIANAS INTELIGENTES A
PARTIR DEL COMPORTAMIENTO TERMOMECAÁNICO
DE LOS MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA”**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE :
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
ISRAEL ARUBI GARCÍA SALMORÁN**

**Asesor de Tesis:
Dr. Jacinto Cortés Pérez**

México, 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 C. Cassiodoro Domínguez Crisanto**

Secretario: **M. en I. Alberto Reyes Solís**

Suplente: **Dr. Jacinto Cortes Pérez**

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

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM

Centro Tecnológico Aragón, UNAM

DEDICATORIAS

DIOS:

Señor gracias por permitirme conocerte a tiempo y poner a JESUS en mi corazón, pues hoy reconozco que contigo de mi lado no hay imposibles. Te doy las gracias por haber llenado mi vida de bendiciones, haberme escogido la mejor de las familias donde he aprendido grandes valores y a luchar por lo que quiero Gracias por acompañarme en cada uno de mis pasos y así permitirme realizar uno de mis más grande sueños.

MIS PADRES:

Porque han estado conmigo en todo momento y a través de sus consejos me han enseñado que en la carrera de la vida hay que luchar y derrumbar muchos obstáculos, y que el mejor camino para llegar a la meta son la honradez, la fe, la humildad, la sinceridad, la perseverancia y el amor.

Con la mayor gratitud por los esfuerzos realizados para que yo lograra terminar mi carrera profesional siendo para mí la mejor herencia.
Gracias por ser mis padres, los AMO.

ROCIO A. SALMORÁN VALDIVIA:

Porque es la mejor de las Madres y el más maravilloso ser del mundo. Gracias por el apoyo moral, cariño y comprensión que siempre me has brindado, por ser mi ángel, guiar mi camino y estar siempre junto a mí en los momentos más difíciles.

No podría estar más orgulloso y contento por tener una gran amiga, una gran consejera, una gran maestra, una gran mujer. Mama te amo no se qué haría sin ti.

VICTOR M. GARCÍA GARCÍA:

Por ser un Padre extraordinario, porque desde pequeño has sido para mí un hombre maravilloso y grande al que siempre he admirado. Que me quiere ver volar pero a la vez me ha enseñado a mantener los pies bien firmes en la tierra. Por mostrarme con tu ejemplo que hay que ser humildes en la riqueza y ricos en humildad.

Gracias por guiar mi vida con energía, siendo comprensivo y amoroso porque esto ha hecho de mi lo que soy.

Gracias porque se que el esta tan orgulloso de mi como yo de él.

MIS HERMANOS:

Por creer en mí, por empujarme, levantarme y estar conmigo en los momentos más difíciles. Porque a pesar de ser el mayor he aprendido demasiado de ellos y me han hecho ver lo mucho que valgo.

Quiero compartir este sueño para que lo hagan suyo y sigan creciendo y desarrollándose para algún día llegar a ser unos grandes profesionistas.

VICTOR IVAN GARCÍA SALMORÁN:

Porque es una gran persona y aunque es menor que yo me ha dado varias lecciones, ya que en los momentos que me sentía hundido fuiste de gran ayuda para salir de ese bache y que con ese gran carácter que tienes muchas veces me he sentido protegido.

Gracias hermano por creer en mí, te adoro.

IRVING ENRIQUE GARCÍA SALMORÁN:

Hermanito gracias, porque a tu corta edad has vivido conmigo los momentos más delicados y me has mostrado tu apoyo y amor.

Por verme como un ejemplo a seguir, porque con tus halagos y elogios me das ánimo y fuerzas para seguir luchando y así poder seguir siendo tu orgullo.

Gracias por tanto cariño, eres el mejor hermanito del mundo, te quiero.

MI HIJA

ALLISON SHERLYN GARCÍA:

Este logro también es tuyo ya que aunque eres una bebe me haces sentir un padre orgulloso, le pido a Dios con todo mi corazón que me guíe y me permita seguir creciendo como humano y profesionalmente para poder ser un gran papá y transmitirte todos los valores y enseñanzas que me dieron mis padres.

Mi amor, mi nena hermosa te amo, eres un motorcito en mí para seguir luchando.

DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ:

Por haberme transmitido las enseñanzas que por otros lados no hubiera encontrado ya que sin ayuda y conocimientos no estaría en donde me encuentro ahora.

Por ser un ejemplo, compartir sus vivencias e ideales los cuales he adoptado y luchare para hacerlos realidad.

Con cariño, admiración y respeto porque sus logros son motivantes para seguir creciendo como profesionista.

M. en I. FERNANDO NESTOR GARCÍA CASTILLO:

Por tu apoyo y dedicación, porque tu colaboración fue muy importante ya que sin tu ayuda me hubiera sido más difícil concluir con el presente trabajo.

Por tus consejos y enseñanzas, los cuales han sido motivantes para querer seguir preparándome.

Gracias por brindarme tu amistad.

RECONOCIMIENTOS

DR. JACINTO CORTÉS PÉREZ:

Por permitirme ser parte de su grupo de trabajo y compartirme su amor por la Ingeniería.

Por sus comentarios, dominio del tema, por y por dirigirme el presente trabajo con esa visión profesionalismo que lo caracteriza.

M. en I. FERNANDO NESTOR GARCÍA CASTILLO:

Por haberme brindado tus conocimientos y experiencia en el momento justo.

Por tu enorme paciencia, sencillez y humildad, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

DR. DANIEL ALDAMA AVALOS, M. EN C. CASSIODORO DOMÍNGUEZ CRISANTO, M. EN I. ALBERTO REYES SOLÍS, M. EN I. JOSÉ ANTONIO SOUZA JIMÉNEZ:

Por ser miembros del jurado, por todos sus comentarios y aportaciones al presente trabajo.

AMIGOS Y COMPAÑEROS DEL CTA:

M. en I. David Becerril, Ing. Max Galván, Ing. Dorian, Fernando Paris, Alejandro Ríos, Arturo Martínez, Carlos Resendiz, Jonnathan García, Guillermo Domínguez, Rodrigo Lechuga por formar parte del equipo de trabajo y hacer del laboratorio un lugar ameno para trabar.

CO MECYT y CONACYT

Por el apoyo otorgado a través del programa Beca Tesis de Licenciatura 2008.

SEP

Por el apoyo brindado a través del programa Becas de Titulación 2008-2009.

AGRADECIMIENTOS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:

Por haberme acogido durante 5 años en la
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN
preparándome con éxito como una persona Profesional gracias a todos los maestros que
contribuyeron realmente en mi formación.

CENTRO TECNOLÓGICO ARAGÓN:

Por abrirme sus puertas para realizar este trabajo en el
Laboratorio de Mecánica Aplicada.

A MI FAMILIA GARCÍA GARCÍA:

Empezando por mamita Meche, mis tíos Guadalupe, Pedro, Enrique, Erasmo, Martín,
Jesús, Magdalena, Carmen y Antonio, con sus respectivas familias, por la confianza
depositada ya que en momentos críticos siempre creyeron en mí, porque en los instantes
más difíciles siempre estuvieron ahí.

Gracias por todo el cariño, consejos y enseñanzas que han ayudado a mi formación.

A MIS ABUELITOS:

Patricia Valdivia Alejandre y Guillermo Salmorán Marin por creer en mí y darme todo
su apoyo moral, con mucho cariño para mis viejitos.

A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS:

Ángel, Jon (Pala), Raúl (Chabelo), Aldo, Mario, Enrique (Kike), Hugo (barza), Adrian
(Morquecho), Mauricio, Lacambra, Alberto (chino), Roberto, Alfonso (Ponchito),
Sergio, Martín, Alan (nene), Romo, William, Fernando, Jesús (el cuñado), entre otros
que por ningún motivo omití, gracias ya que estuvieron conmigo, compartimos tantas
aventuras, experiencias, desveladas y triunfos.

Gracias a cada uno por hacer que mi estancia en la Universidad y en esta ciudad que era
extraña para mí fuera cómoda, agradable y divertida.

Un agradecimiento especial a ***UNAM DGAPA-PAPIME*** por el apoyo financiero a través del programa Proyecto PE 102505.

ÍNDICE

Pág.

Introducción.	i
----------------------	----------

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS GENERALES DE LA MEMORIA DE FORMA.

1.1.- Generalidades de los MMF.	1
1.1.1.- Transformación Martensítica.	2
1.2.- Diagrama de fases de Cu-Al-Be.	8
1.3.- Comportamiento mecánico de MMF.	10
1.3.1.- Anisotropía mecánica de los MMF.	14
1.4.- Historia de las aplicaciones de aleaciones con MMF.	15
1.4.1.- Aplicaciones de los MMF.	17
1.5.- Modelos matemáticos del para pruebas de flexión en MMF.	19

CAPÍTULO 2. TRANSMISIÓN DE CARGA Y MOVIMIENTO

2.1.- Mecanismos.	26
2.1.1.- Conceptos en la teoría de maquinas y mecanismos.	26
2.1.2.- Mecanismos planos.	30
2.1.3.- Análisis cinemático de mecanismos.	31
2.2.- Tren de engranes.	33
2.2.1.- Definición de engranes y trenes de engranes.	33
2.2.2.- Tipos de engranes.	37
2.2.3.- Engranes rectos.	41
2.2.3.1- Análisis cinemático de engranes.	41
2.2.3.2.- Cargas transmitidas por engranes.	44

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE PERSIANAS INTELIGENTES EMPLEANDO MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA (MMF).

3.1.- Diseño conceptual.	49
3.1.1.- Descripción del funcionamiento de las Persianas Inteligentes.	52
3.1.2.- Mecanismo de Persianas.	55
3.1.3.- Mecanismo de Transmisión.	58
3.1.4.- Laminas MMF.	64

CAPÍTULO 4. PROTOTIPO DE LAS PERSIANAS INTELIGENTES.

4.1.- Modelo matemático	65
4.2.- Diseño de detalle.	69
4.3.- Prototipo final y modificaciones.	74

Conclusiones Generales.	80
--------------------------------	-----------

Apéndice I.- Planos de ensamble y elementos

Referencias.

Introducción

Es indiscutible que en el avance tecnológico actual los materiales son un factor muy importante, ya se pueden aprovechar sus diversas propiedades y características para mejores diseños. Está claro que el ser humano ha buscado y hecho uso de ellos para mejorar la calidad de vida, no es extraño entonces que la producción de nuevos materiales y el procesado de estos hasta convertirlos en productos acabados, constituyan una parte importante de nuestra economía actual. Debido a ello y al progreso de los programas de investigación y desarrollo tecnológico, se están creando continuamente nuevos y mejores. Dentro de estos nuevos materiales se encuentran los denominados “Materiales con memoria de forma (MMF)” también llamados “materiales inteligentes”, los cuales tienen, dos capacidades de forma general. La primera es recuperar su forma después de haber sido deformados de manera aparentemente plástica con un simple calentamiento, capacidad que se conoce como Efecto Memoria de Forma (EFM) y la de tener recuperación de deformación hasta cien veces mayor que en los materiales convencionales (Efecto Superelástico). Se ha encontrado que estos efectos lo presentan diferentes aleaciones, dentro de las que se encuentran: Ni-Ti mejor conocido como “nitinol”, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be, entre otras, las cuales reciben el nombre de aleaciones con memoria de forma (SMA por sus siglas en inglés). Las aplicaciones potenciales de estos dos comportamientos son enormes, sin embargo a pesar de que se encuentran varias en el mercado, aun falta mucho por investigar ya que estas aleaciones presentan comportamiento anisotrópico y no lineal.

Es significativo señalar que en el presente, sólo en países desarrollados como Alemania, España, Estados Unidos, Francia, Inglaterra y Japón entre otros, existen empresas dedicadas al desarrollo y comercio de estos materiales, por lo que es claro que el estudio del comportamiento de los MMF es un tema actual y relevante. Es una realidad que actualmente en México existe una gran necesidad de desarrollo de Tecnología en todos los ámbitos, ya que la mayoría de los diseños importantes son de importación. El problema depende de muchas cosas que salen del alcance del presente trabajo, sin embargo es claro que una manera de contribuir a desarrollar nuevos diseños en nuestro país es el tener una vinculación entre la investigación y el desarrollo tecnológico; es decir tomar los conocimientos recolectados durante años de investigación y llevarlos a la práctica. Es precisamente con esta idea que en el Laboratorio de Mecánica Aplicada del Centro tecnológico Aragón se han diseñado algunas aplicaciones con Materiales con Memoria de Forma con la ayuda de algunos modelos matemáticos realizados anteriormente y durante el desarrollo de los diseños dentro del mismo laboratorio. Entre los equipos diseñados se encuentran: Termoactuador, Motor con alambres de Ni-Ti, Persianas Inteligentes entre otros que siguen en desarrollo, los cuales en general aprovechan la capacidad de estos materiales para generar movimiento.

Es claro que para poder emplear los MMF en algún dispositivo o sistema de modo eficiente, es necesario contar con ecuaciones de diseño que permitan predecir el comportamiento de los elementos mecánicos fabricados con estos materiales.

En el presente trabajo se muestra el diseño de un dispositivo “inteligente” para ventilación tipo persiana con MMF. El dispositivo presenta la apertura y el cierre de vidrios al variar la temperatura del ambiente de manera automática, sin emplear componentes eléctricos ni electrónicos, está constituido esencialmente por los mismos

componentes de las persianas convencionales con algunas modificaciones; ya que se le adaptó un mecanismo que transmite una componente del peso de los vidrios a una serie de láminas SMA de Cu-Al-Be. Esto permite tener un sistema más sencillo que los construidos por sensores de temperatura y motor, ya que el material con memoria de forma hace las funciones de ambos sirviendo como sensor y actuador a la vez lo cual le confiere el término de “material inteligente”. También se adapta un modelo matemático, basado en modelos anteriores, el cual obtiene el desplazamiento de las láminas de MMF en un arreglo en cantiléver sujetas a una carga puntual variable. Dicho modelo es no lineal por lo que es resuelto empleando el método numérico Runge-Kutta.

En el capítulo 1 se presenta una breve historia de las aplicaciones de los MMF, conceptos básicos del comportamiento de estos materiales, también la terminología utilizada en el presente trabajo, como: “transformación martensítica”, “estado martensítico”, “fase austenítica”, entre otros, asimismo trata el comportamiento mecánico de la aleación y los parámetros de deformación y temperatura analizados mediante graficas.

En el capítulo 2 se muestran algunos conceptos básicos de la teoría de maquinas y mecanismos, enfocándose a los de transmisión, haciendo mayor énfasis al tren de engranes empleando definiciones y formulas que permitan una mayor comprensión ya que este mecanismo es el encargado de la transmisión de carga y movimiento utilizado en el prototipo del presente trabajo.

En el capítulo 3 aparece parte del diseño conceptual, en el que se describe de forma detallada el funcionamiento del dispositivo, así como una descripción de las partes medulares de las Persianas Inteligentes y sus componentes.

En el capítulo 4 se emplea un modelo matemático adaptado para el diseño de las persianas, el cual permite obtener el desplazamiento teórico de las laminas con MMF sujetas a carga variable en un arreglo en cantiléver. Así mismo se desarrolla el diseño de detalle y finalmente se hace una breve comparación del prototipo con una versión modificada de las persianas.

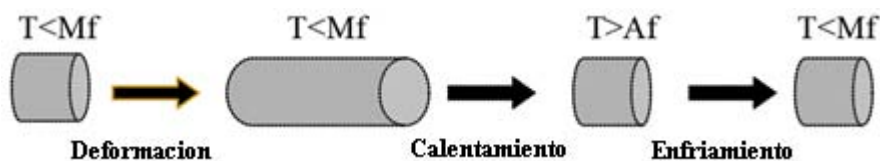
El Apéndice I se encuentra los planos de construcción de cada una de las partes que conforman el prototipo, una lista detallada de cada una de las partes, así como el ensamble y sub-ensambles correspondientes a los elementos que conforman las Persianas Inteligentes.

CAPÍTULO 1. Conceptos generales de la memoria de forma.

1.1.- Generalidades de los MMF.

Los materiales con memoria de forma (MMF) tienen la habilidad de cambiar de fase al pasar cierta temperatura crítica con un efecto reversible. 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]. Debido a lo anterior estos materiales poseen propiedades fundamentales y características conocidas como: superelasticidad, memoria de forma simple, efecto combinado y doble efecto de memoria de forma. Tales efectos se describen a continuación:

- *Efecto de memoria de forma (EMF)*: Es la recuperación por calentamiento, de una forma macroscópica predeterminada a alta temperatura, después de sufrir una deformación permanente, aparentemente plástica, a baja temperatura. (figura 1.1 (a)).
- *Efecto superelástico (ES)*: Consiste en que el material, estando a una temperatura por encima de la crítica (A_f), al ser sometido a esfuerzos es capaz de experimentar deformación de hasta 100 veces mayor que la que pueden experimentar los materiales convencionales.
- *Efecto combinado*: Consiste en que el material sujeto a una carga constante, toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura.
- *Doble Efecto Memoria de Forma*: Consiste en el cambio espontáneo reversible de una forma inicial a alta temperatura a una forma a baja temperatura. Dicho efecto se obtiene después de que el material es sometido a un proceso termomecánico llamado educación, debido a que este efecto no es propio del material. (figura 1.1 (b))



a)



b)

Figura 1.1 a) Efecto de memoria de forma simple y b) efecto doble memoria forma

Por lo tanto los materiales con memoria de forma (MMF), dentro de los cuales se encuentran: aleaciones metálicas, metales puros, polímeros, etc, después de una aparente deformación plástica, vuelven a su forma original tras un calentamiento. Es decir, tienen la capacidad de “recordar” una forma incluso después de severas deformaciones, 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 la deformación. 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 fase en estado sólido 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.

Por lo tanto la transformación martensítica ha sido definida como una transformación displaciva de primer orden, constituida por una deformación de corte[3], por tanto se lleva a cabo sin difusión atómica, con movimientos menores al parámetro de red. Se forma al enfriar una fase que se encuentra a alta temperatura llamada fase madre o austenita, por la aplicación de esfuerzo a temperatura constante a partir de la fase madre o por combinación de ambas. Son, además, transformaciones de primer orden por presentar discontinuidades en las primeras derivadas de sus potenciales termodinámicos como son: volumen, presión, etc. A demás estos materiales presentan una entalpía de transformación (ΔH), 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 en el material 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 1.2 donde se presenta una gráfica fracción volumétrica transformada-temperatura ($f - T$). En la figura se puede ver que existen cuatro temperaturas característica 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.

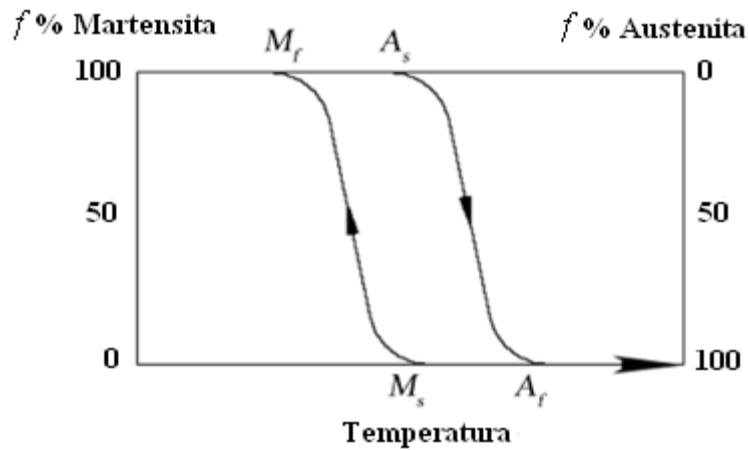


Figura 1.2.- Curva fracción volumétrica-temperatura

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 y la final de la transformación austenítica, A_s , A_f respectivamente. La formación de la fase austenítica comienza 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 más allá de A_f , la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto de memoria de forma (EMF).

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 1.3 se muestra una curva típica: flujo de calor-temperatura que se obtiene en una calorimetría diferencial de barrido practicada a un MMF.

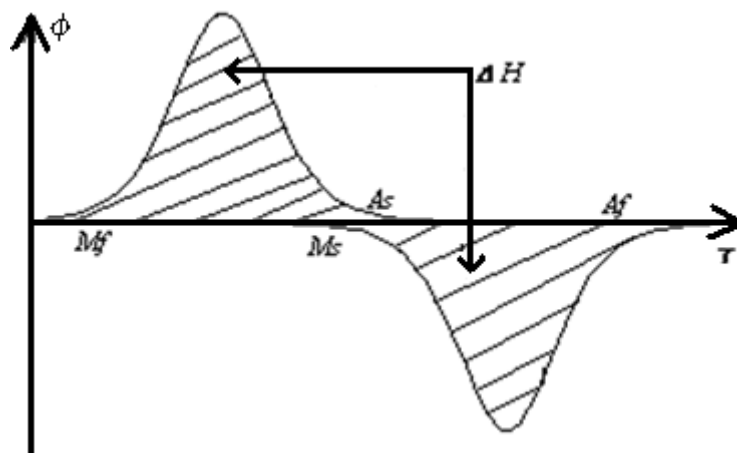


Figura 1.3.- Curva flujo de Calor-Temperatura, típica de una prueba de calorimetría diferencial de barrido en un material con memoria de forma

La parte superior de la curva de la Figura 1.3 corresponde con el enfriamiento y la parte inferior con el calentamiento. Cabe destacar que en la Figura 1.3 se muestran las temperaturas críticas mostradas también en la Figura 1.2 así como la entalpía de transformación.

La entalpía de transformación es un parámetro propio de cada tipo de TM en los MMF.

Donde: ϕ , como se puede ver en la Figura 1.3, 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 1.3, 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:

$$\Delta H = \int_{-\infty}^{\infty} \phi dT \quad (1.1)$$

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

$$f \propto \int_{T_1}^T \phi dT \quad (1.2)$$

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 1.4 se muestra un diagrama esfuerzo-temperatura-transformación donde pueden ser apreciadas los distintos tipos de transformación.

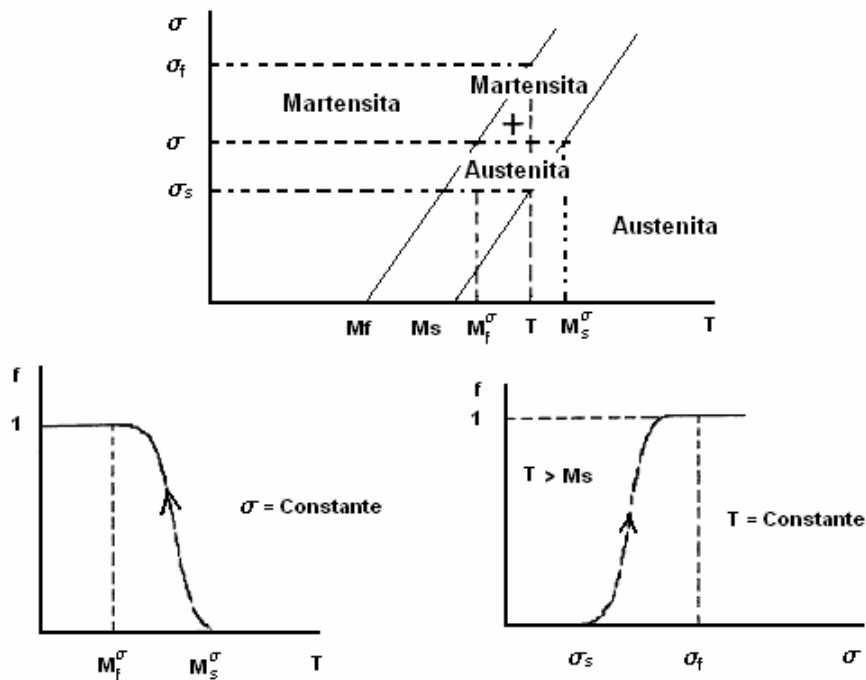


Figura 1.4.- Diagrama esfuerzo-Temperatura-Transformación típico de un material con memoria de forma.[4]

En la Figura 1.4 se aprecia que cuando la transformación martensítica es inducida por enfriamiento ($\sigma=0$) esta inicia en $T=M_s$ y finaliza en $T=M_f$, lo que es coherente con los diagramas mostrados en las Figuras 1.2 y 1.3, también 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 1.4 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 1.5 se muestran los diagramas esfuerzo-temperatura-transformación correspondientes al Cu-Al-Ni[5, 6], Cu-Zn-Al[7] y Cu-Al-Be[8].

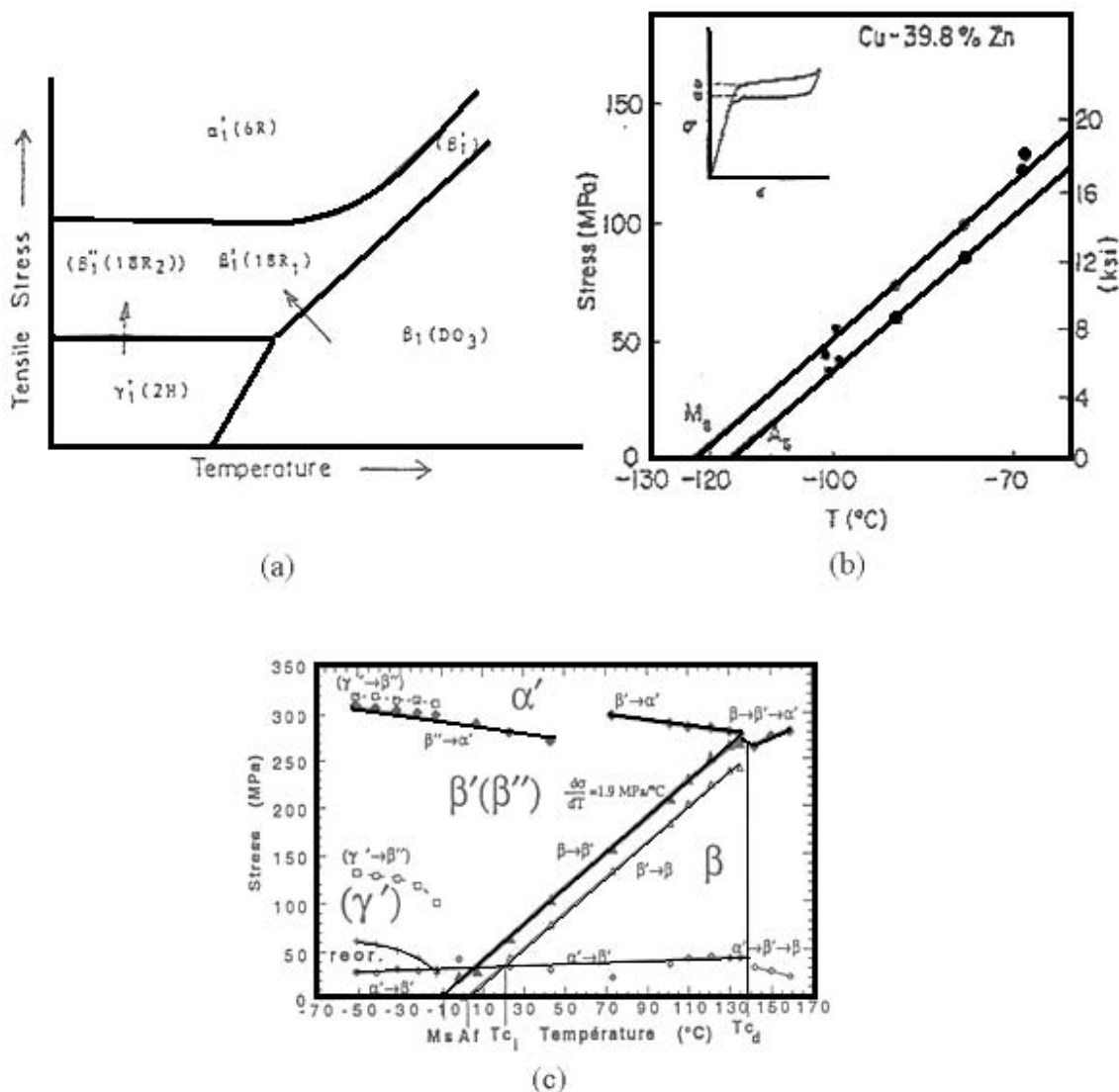


Figura 1.5.- Diagrama esfuerzo-temperatura-transformación correspondientes a: a) Cu-Al-Ni[6], b) Cu-Zn-Zl[7] y c) Cu-Al-Be[8].

La magnitud del esfuerzo crítico (σ_C) depende de la temperatura y sigue la relación de Calssius-Clapeyron[1, 4], la cual puede ser escrita como:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial M_s} = -\frac{\Delta H}{T \varepsilon_0} \quad (1.3)$$

donde: $\frac{\partial \sigma}{\partial M_s}$ es la razón de esfuerzo (las cual corresponde con la pendiente de la recta que se muestra en la Figura 1.4), ΔH es la entalpía de transformación, T es la temperatura a la cual se induce la transformación y ε_0 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.[17,18]

Microscópicamente la transformación de austenita a martensita puede explicarse separandola 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 1.6, 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”.

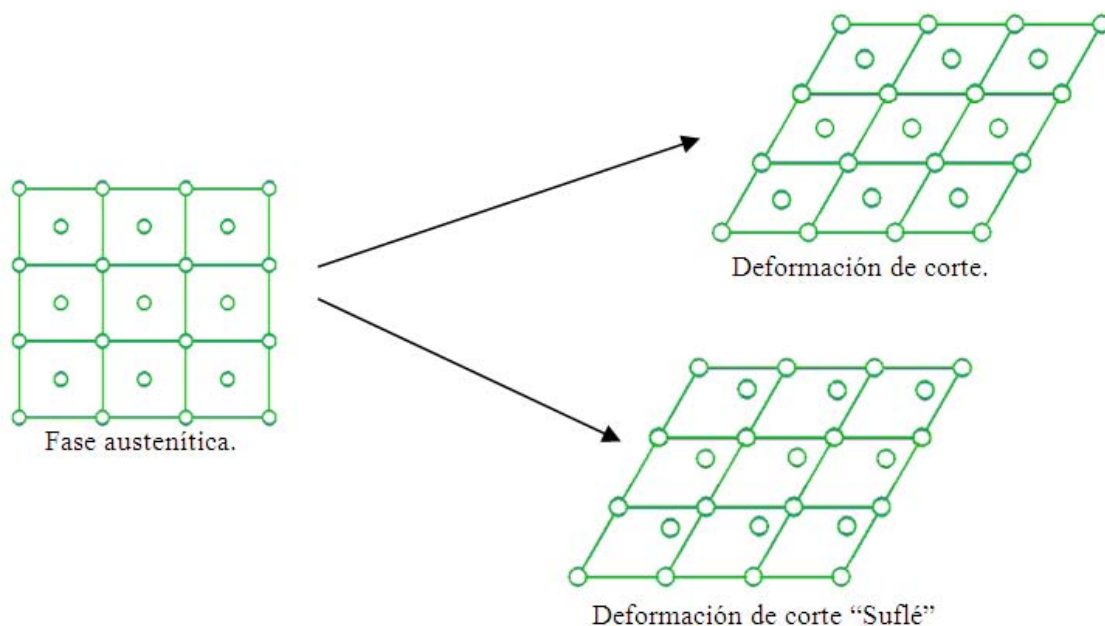


Figura 1.6.- Diagrama que muestra la deformación que sufre la estructura de la fase madre durante la TM.

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 [1]. 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 autoacomodo reversible llamado: “formación de variantes “autoacomodantes” [1]. 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 Figura 1.7 (a) y 1.7 (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 son las que permiten que se presente en los MMF el llamado: “efecto memoria de forma simple” (EMFS).

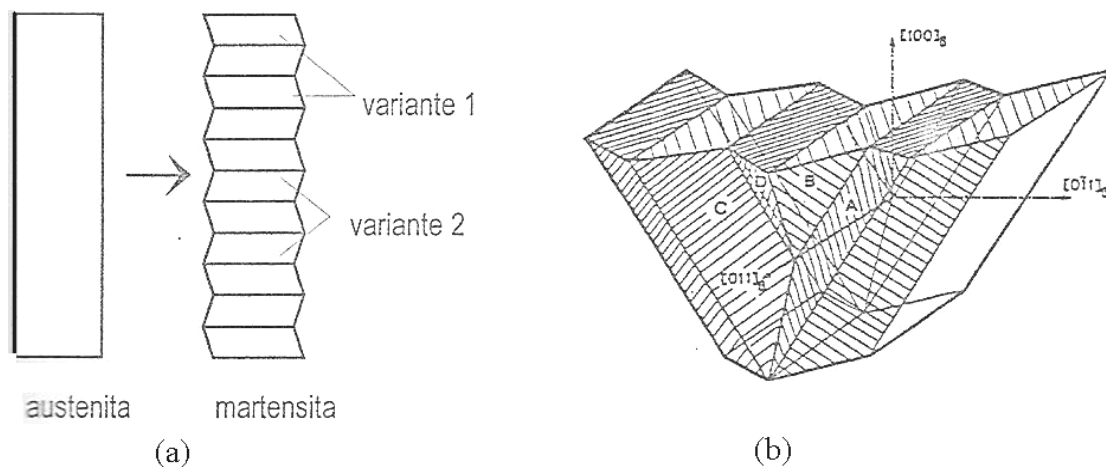


Figura 1.7.- Diagramas que muestran el mecanismo de autocomodo que se presenta en los MMF durante la transformación martensítica inducida por enfriamiento: (a) Diagrama bidimensional [9] y (b) diagrama tridimensional [9].

En el caso de transformaciones martensíticas no termoelásticas, el mecanismo de autoacomodo es el deslizamiento de planos atómicos el cual no es reversible [1]. 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 1.8 se muestran una serie de curvas $G-T$ para diferentes tipos de transformaciones martensíticas en donde se aprecia claramente el gran tamaño de la histéresis para transformaciones tipo Burtz típica de transformación martensítica no termoelásticas.

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

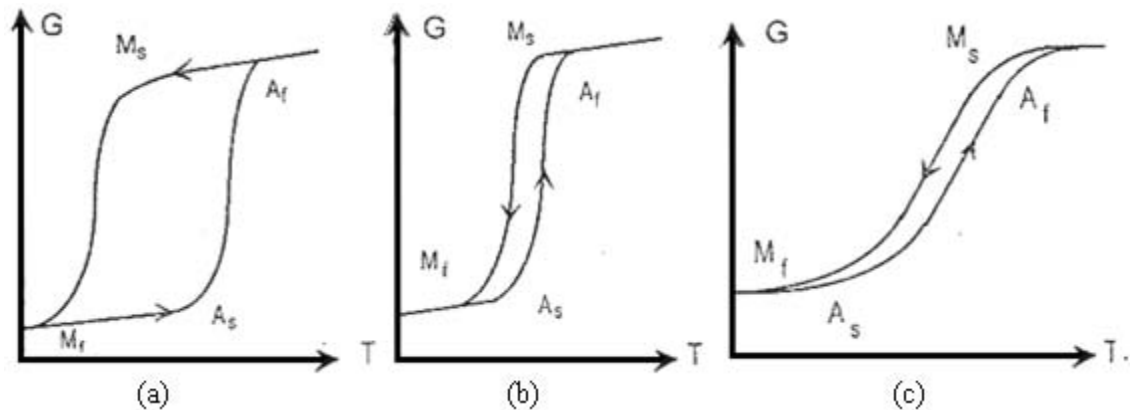


Figura 1.8.- Diferentes tipos de curvas G-T para distintos tipos de transformaciones martensíticas. a) tipo Burst b) y c) termoelásticas

1.2.- Diagrama de fases de Cu-Al-Be.

La literatura [1] reporta diferentes aleaciones que presentan el comportamiento de memoria de forma, dentro de las cuales se encuentran Ni-Ti, Cu-Al-Ni y Cu-Zn-Al, se ha encontrado que dichas aleaciones presentan inconvenientes en cuanto a costo, estabilidad térmica, conformado y fabricación.[28]

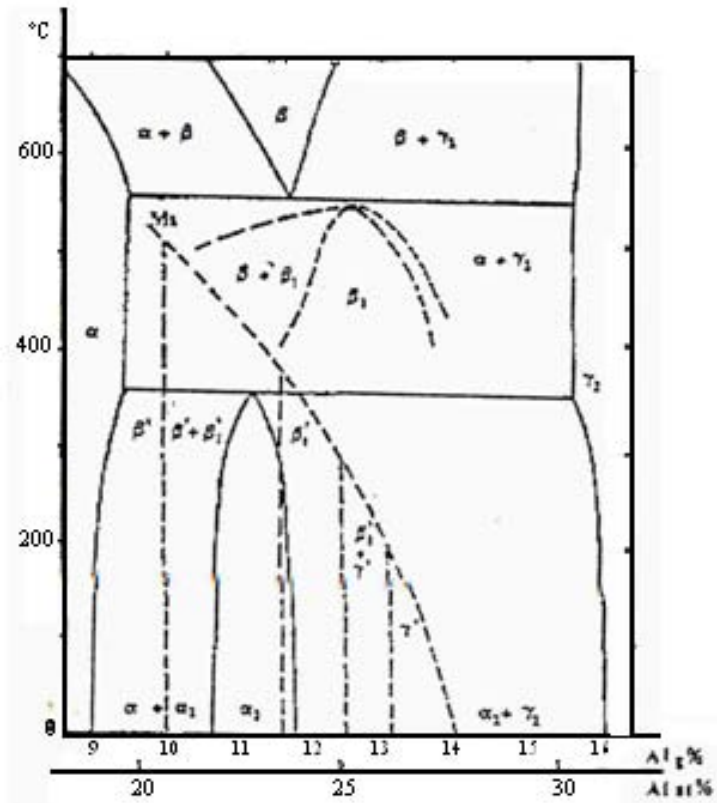
Las aleaciones de Cu-Al-Be presentan memoria de forma, llenan la necesidad de tener una temperatura de transformación M_S bajas como de -200°C y una buena estabilidad térmica a temperaturas relativamente altas de 200 a 300°C .

El diagrama de fases de Cu-Al-Be está basado en el diagrama de fases binario del Cu-Al (figura 1.9a) el problema es que la temperatura de transformación martensítica (M_S) es bastante alta.

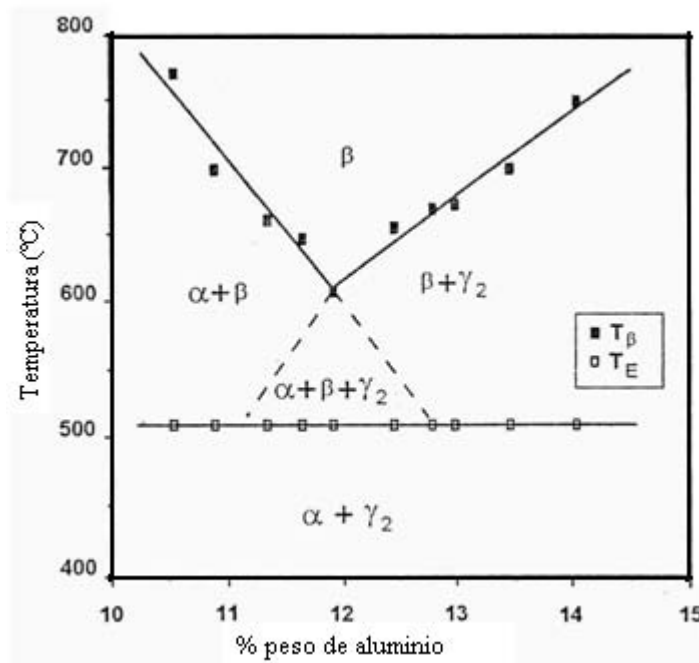
Belkahla propone un sistema pseudo binario para Cu-Al-Be mostrado en la figura 1.9b), en el cual se puede ver que es esencialmente la misma forma que el diagrama de Cu-Al, pero la adición de 0.5% en peso de Be, provoca que la isoterma eutectoide quede desplazada unos 50°C .

Por otro lado Belkahla estudio la influencia de los elementos aleatantes en las temperaturas de transformación, por lo que propuso la siguiente ecuación para transformación martensítica en función de la composición:

$$M_S = 1245 - 71\%Al - 893\%Be$$



a)



b)

Figura 1.9.- a) Diagrama de fases en equilibrio del sistema Cu-Al, b) diagrama pseudo binario para Cu-Al-Be.[28]

1.3.- Comportamiento Mecánico de los MMF.

La transformación martensítica inducida por esfuerzo involucra una variación considerable del comportamiento esfuerzo-deformación (σ - ϵ) respecto al que presentan los materiales convencionales. En la Figura 1.10 se muestra un diagrama esfuerzo-deformación-temperatura donde se aprecian los diferentes comportamientos que presenta el Ni-Ti[7].

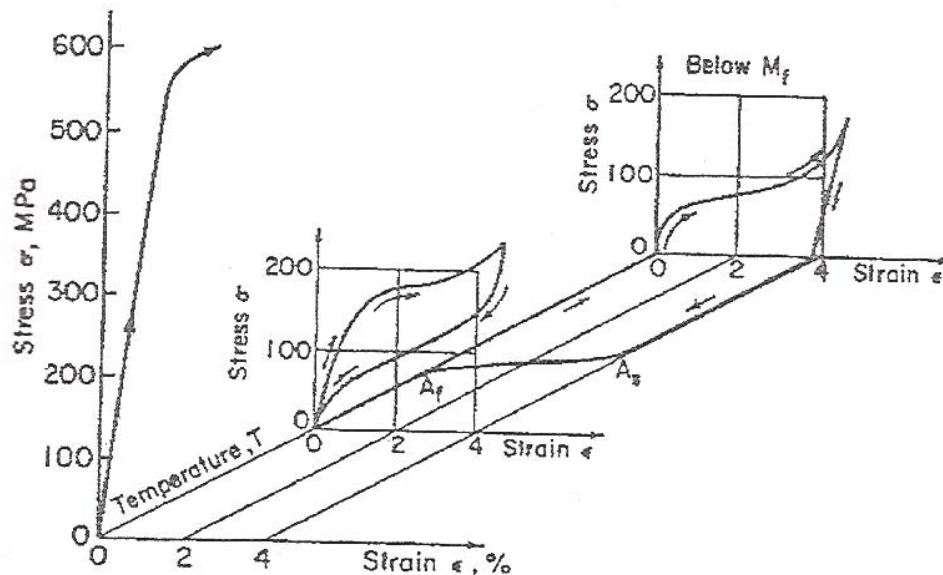


Figura 1.10.- Comportamiento mecánico a diferentes temperaturas que presentó una aleación de Ni-Ti con memoria de forma[7].

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: EMFS. 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. Ese mecanismo es mostrado en un esquema simple en la Figura 1.11 en donde se emplea un modelo bidimensional.

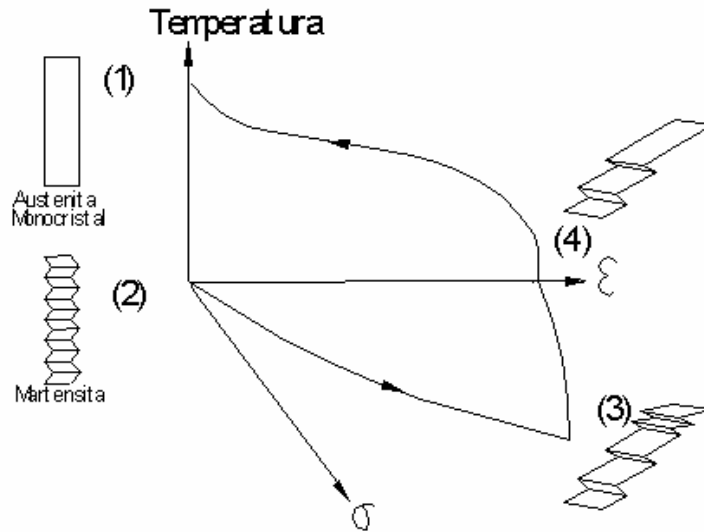


Figura 1.11 Diagrama esquemático que muestra los efectos estructurales involucrados en el efecto memoria de forma simple [9].

De la Figura 1.10 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 martésítica inducida por esfuerzo[5]. Para valores bajos de esfuerzo el material presenta un comportamiento lineal, similar a 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 1.12 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 1.4.

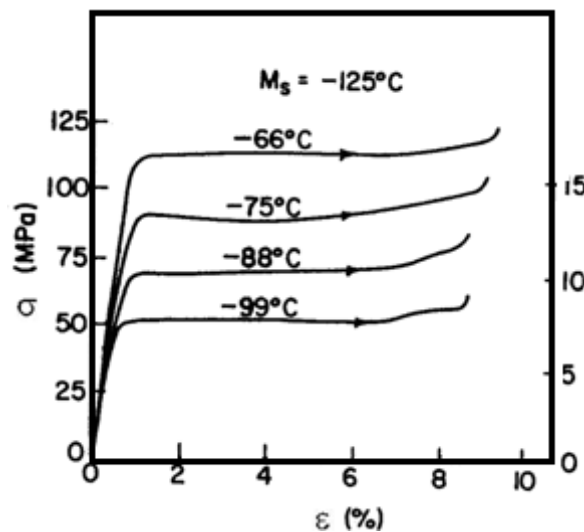


Figura 1.12.- Comportamiento esfuerzo-deformación correspondiente a una muestra de Cu-Zn-Al con memoria de forma sometida a pruebas de tensión uniaxial a diferentes temperaturas $T > A_f$. [7]

En la región lineal de las curvas esfuerzo-deformación, el material se encuentra en fase austenítica y el comportamiento corresponde con el comportamiento elástico de dicha fase, mientras que la meseta se asocia a la TMIE y la deformación es proporcional a la fracción volumétrica del material transformado. La deformación que sufre el material durante la transformación, la cual es la 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 la grafica esfuerzo-deformación de materiales monocristalinos como se muestra en la Figura 1.13. Al finalizar la meseta en el material nuevamente se presenta un comportamiento lineal con una pendiente constante la cual se debe a que 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 en la grafica σ - ϵ se observa más bien un cambio de pendiente como se aprecia en la Figura 1.13.

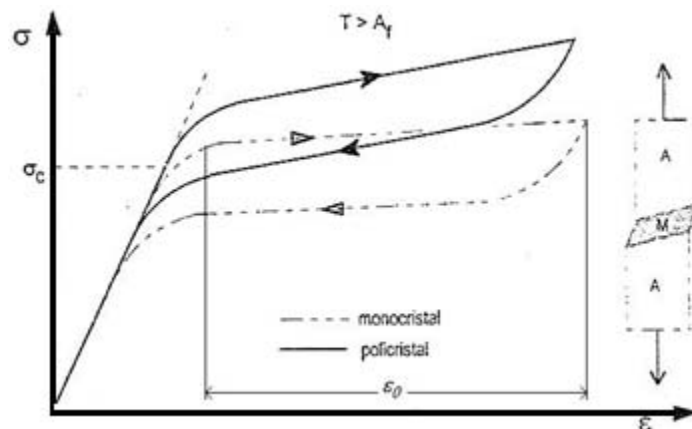


Figura 1.13.- Curvas esfuerzo-deformación correspondientes a un MMF monocristalino y otro policristalino.

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 de tensión uniaxial el tamaño real del grano altera considerablemente el valor del esfuerzo crítico y las temperaturas críticas en los MMF.

Las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a cada tipo de transformación martensítica suelen presentar cambios importantes como se aprecia en la Figura 1.14, dicha 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.

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

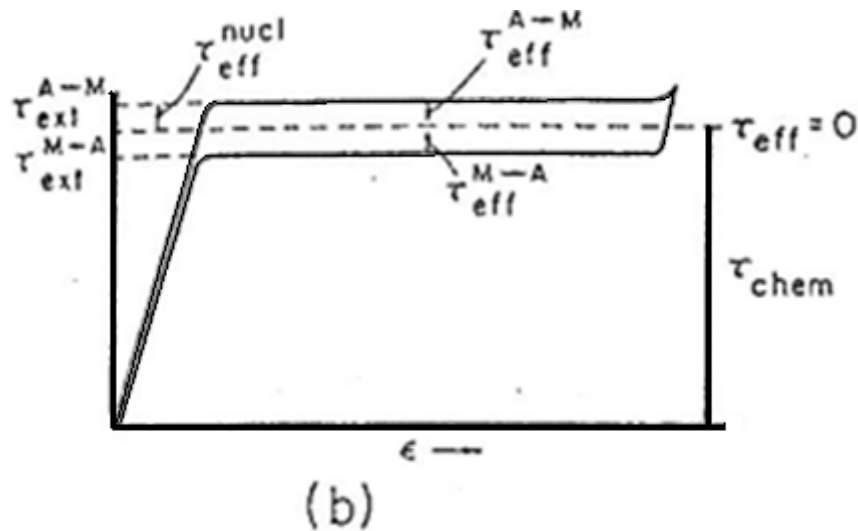
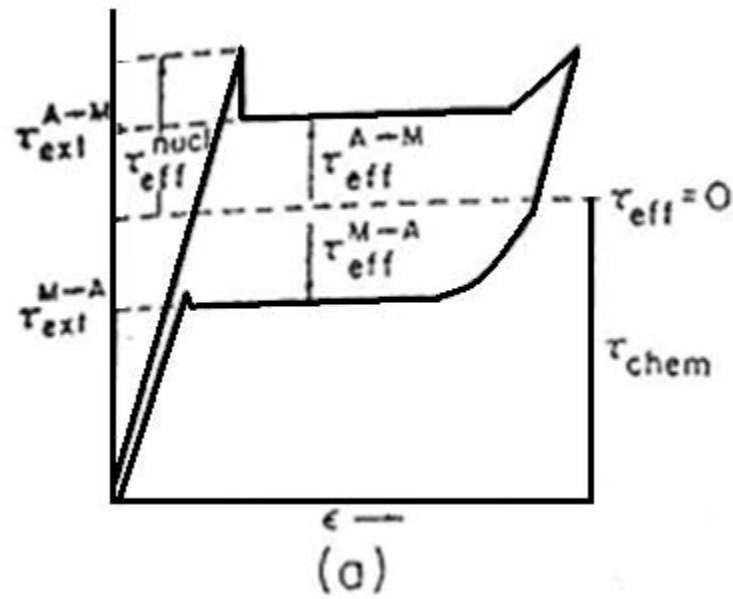


Figura 1.14.- Diferentes tipos de curvas esfuerzo-deformación generadas por dos tipos diferentes de transformaciones martensíticas presente en aleaciones de Cu-Al-Ni. a) $\beta \rightarrow \beta'$ y b) $\beta \rightarrow \gamma'$. [15]

La tabla 1.1 muestra los parámetros correspondientes a los diferentes tipos de transformación martensítica inducida por esfuerzo que se presentan en un aleaciones de Cu-Al-Ni.

Tabla 1.1.- 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. [15]

Kind of transformation	$(d\sigma)/dT$ (MPa/K)	ϵ_0	ΔS (J/mole · K)	ΔH (J/mole)	ΔH (cal/mole)	T (K)
$\gamma_1 \rightleftharpoons \beta_1'$	-0.206	0.056	0.086	17.3	4.1	200
$\beta_1' \rightleftharpoons \alpha_1'$	-0.139	0.112	0.117	46.7	11.2	400
$\beta_1' \searrow \alpha_1'$	-0.174	0.145	0.145	36.4	8.7	250
$\beta_1 \rightleftharpoons \beta_1$	2.04	0.085	-1.30	-389	-93.0	300

1.3.1.-Anisotropía mecánica de los MMF.

Una de las principales limitantes para poder diseñar nuevos dispositivos que aprovechen los efectos 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.

La fase austenítica de las AMF posee generalmente una estructura de simetría cúbica centrada en el cuerpo [1, 9], en sus distintas modalidades; B2, L2 y DO₃ las cuales se observan en la figura 1.15. En esta fase el material llega a presentar variaciones del Modulo de Young de entre 17 y 70 MPa en Cu-Al-Ni [1].

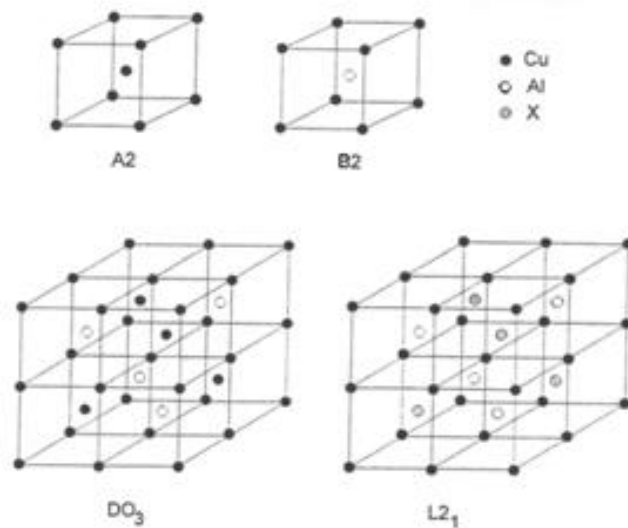


Figura 1.15.- Representación gráfica de las simetrías A2, B2, DO₃ y L2₁

En cuanto a la deformación transformacional se muestra la deformación necesaria para inducir la transformación, 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 [13, 14]

Por otro lado los estudios presentados en cuanto al esfuerzo transformacional, están basados en la teoría fenomenológica de la transformación martensítica (TFTM) y en el Factor de Taylor (FT), los cuales muestran que el valor del esfuerzo crítico, más bien definido como un esfuerzo equivalente, depende fuertemente de la orientación del cristal [13, 14]. Se han encontrado que en AMF existen 6 planos de hábito con 4 posibles direcciones de deslizamiento cada uno, con lo cual es posible obtener 24 variantes de martensita en el material [1].

1.4.- Historia de de las aplicaciones de los MMF.

Los MMF tienen propiedades únicas que les permite usarse en gran variedad de aplicaciones, enormes usos se han sugerido usando esta gama de características disponibles para el diseñador.

Se estima que hay sobre 10000 patentes o modelos para uso general basados en los MMF sin embargo, no todos estos modelos han llegado a ser aplicaciones acertadas de los MMF comerciales. Además del efecto de memoria de forma, donde la tensión se recupera con el calor, el efecto superelástico puede también ser utilizado donde el material va alrededor de un ciclo de la transformación sin cambio de temperatura externa, simplemente cargando y descargando apenas sobre la A_f [1].

La gran parte de las patentes que se han archivado, están los actuadores. Muchas aplicaciones recientes dentro de la comercialización de los MMF han estado en el sector médico dental.

El primer uso ahora bien documentado a gran escala de los MMF en 1971 estaba como acoplador para conectar la tubería hidráulica titanio en los aviones de Grumman F-14. Éste fue un ejemplo clásico de la tecnología que era adaptada a una necesidad verdadera del mercado.

La decisión de utilizar tubería de titanio para los ahorros del peso fue tomada, pero la dificultad fue experimentada en el abastecimiento de un confiable sistema del acoplador. Raychem ya vendía la tubería polimérica termocontraíble conocida como tubería de Thermofit®, por lo tanto los acopladores de Ni-Ti fueron creados y conocidos como acopladores de Cryofit® mostrados en la figura 1.16. Ahora los MMF estaban en el mapa. Cabe mencionar que los acopladores empalmes eléctricos están dentro de los principales usos de los MMF.[1]

En la tabla 1.2 se muestra una comparación de las características de los acopladores hechos por tres tipos de aleaciones.[1]

Tabla 1.2.- Tabla comparativa de los MMF

	Base Ni-Ti	Base Cu	Base Fe
Tensión recuperable	Alto	Bajo	Bajo
Fuerza generada	Alto	Bajo-medio	Bajo
Resistencia a la corrosión	Alto	Bajo	Medio-alto
Costo	Alto	Bajo	Bajo

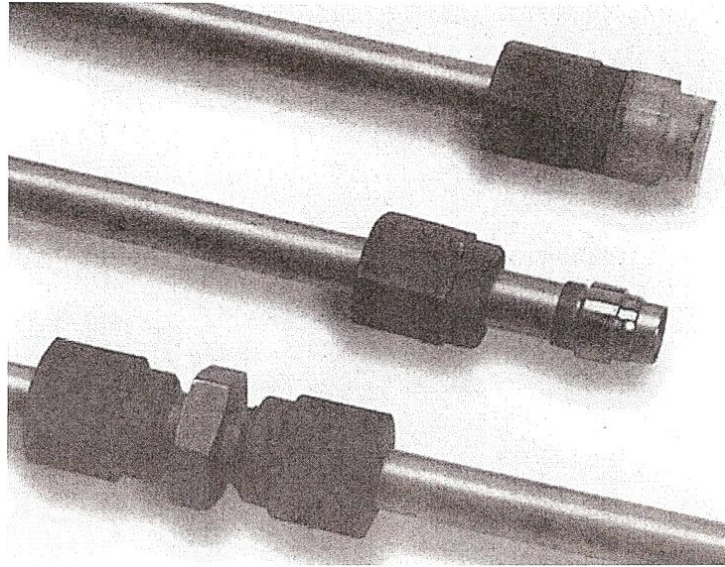


Figura 1.16.- Acopladores de Cryolive® [1]

El primer uso comercial de las propiedades altamente elásticas de los MMF estuvieron como alambres de ortodoncia para la corrección de dientes mostrado en la figura 1.16. Sin embargo el material utilizado es uno que se encuentra en fase martensítica temperatura ambiente, la mayoría de tales alambres actualmente utilizan la martensita inducida por tensión.

Las aplicaciones siguientes eran también del área médica, el gancho del pecho del Mamelok® usados para establecer y para marcar los tumores del pecho de modo que la cirugía subsecuente sea más precisa, requiriendo menos retiro de tejido.

Muchas de las posibles aplicaciones de los MMF siendo perseguidas por la facultad de medicina a mediados de 1980 intentaban utilizar el efecto memoria de forma activada térmicamente.

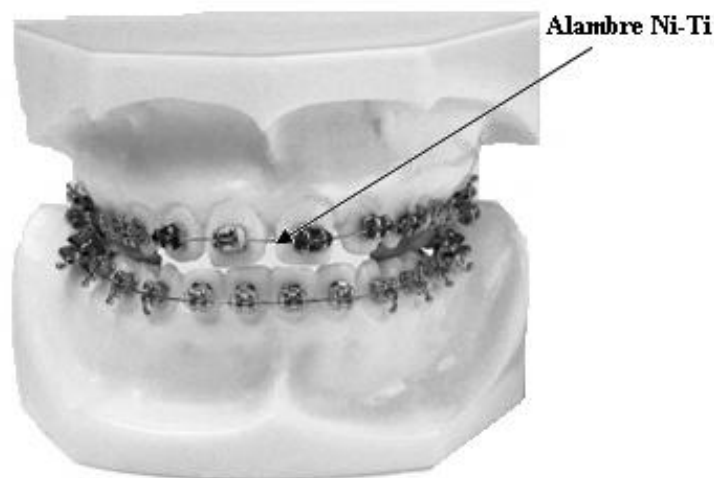


Figura 1.17 Alambre Ni-Ti utilizado en ortodoncia.

1.4.1.- Aplicación de los MMF

Como se menciona anteriormente uno de los campos más importantes de la aplicación de los MMF son los actuadores. Una característica no encontrada en actuadores convencionales tales como los solenoides electromagnéticos, los dispositivos neumáticos o hidráulicos y los motores eléctricos es la capacidad de sentir y responder a una cierta temperatura, esta función es única de los actuadores MMF.

Mientras que los actuadores convencionales y los elementos bimetálicos detectan temperatura; los actuadores de aleaciones con memoria de forma (SMA por sus iniciales en inglés “Shape Memory Alloy”) son capaces de entregar un movimiento y una fuerza mucho más grande. De acuerdo con la capacidad de temperatura detectada es convencional dividir los actuadores de SMA en dos grupos según cómo son calentados descritos a continuación [1]:

1. Primera categoría: Incluye los actuadores que detectan temperatura y en la temperatura apropiada experimentan un cambio de fase apropiado y entrega una fuerza correctiva y un desplazamiento.
2. Segunda categoría: Incluye los actuadores que son calentados por el líquido, el aire o la corriente eléctrica y hechos para realizar su función que se ha pedido.

El sistema de control que funciona empleando una temperatura que se detecta consiste generalmente en tres elementos: El dispositivo de detección de la temperatura, el procesador electrónico y el actuador eléctricamente energizado.

En la tabla 1.3 se muestran algunos dispositivos donde las SMA son aplicadas como actuadores, registrados en la literatura [1].

Las micro maquinas no son simplemente versiones miniatura de las maquinas convencionales si no que son mecanismos basados en nuevos conceptos de diseño y nuevas técnicas de fabricación [1]. Son el interfaz natural con el mundo creciente de la microelectrónica y pueden actuar como máquinas miniatura inteligentes. Una micro maquina requiere un micro actuador capaz de entregar fuerza y movimiento con un mínimo de energía de entrada. El desarrollo de los dispositivos se ha centrado en los actuadores de SMA usando micro alambres y las películas finas.

En la figura 1.18 se muestra robot de 6 patas donde el actuador es un resorte Ni-Ti.

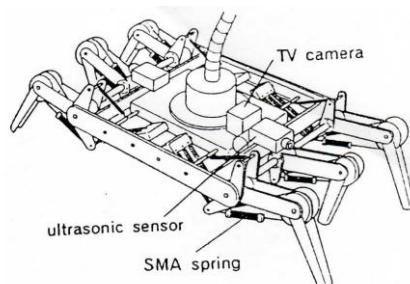


Figura 1.18 Cangrejo robot de 6 patas [1].

Tabla 1.3.- Esquematzación de dispositivos con SMA.

<i>Nombre</i>	<i>Esquema del dispositivo</i>
Válvula térmica de protección	
Switch térmico	
Válvula térmica mixta	
Pivote para el control de flujo de aire	
Mecanismo protector de lámpara de niebla para auto	

1.5.- Modelos matemáticos para pruebas de flexión en MMF.

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.

Se han elaborado algunos modelos matemáticos en trabajos anteriores basados en el funcionamiento de materiales con memoria de forma para vigas sujetas a flexión. Se desarrollo de un modelo el cual analiza el comportamiento termo elástico: desplazamiento-temperatura observado en un elemento tipo viga en cantiléver, elaborado en un material con Memoria de Forma, sujeto a carga constante y temperatura variable. El análisis se realiza suponiendo que en elemento se presentan dos propiedades elásticas que varían al disminuir la temperatura de la muestra. Para realizar el análisis se hace la suposición de que el elemento se comporta como un material compuesto donde las contribuciones de los dos materiales son locales al eje longitudinal de la viga.

La forma en que se manifiesta dicho efecto es esencialmente la misma que el doble efecto memoria de forma es decir, el elemento toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura en cierto intervalo. Aunque el comportamiento ha sido poco estudiado [8, 24, 25, 26], representa una buena alternativa para aprovechar estos materiales en aplicaciones industriales sobre todo porque no es necesario someter a las muestras a ningún tratamiento de educación como sucede cuando se desea que el material adquiera el doble efecto memoria de forma.

El caso estudiado se refiere a un elemento tipo viga en cantiléver con carga puntual en su extremo libre. Empleando algunos de los modelos propuestos en trabajos anteriores [26] para el comportamiento desplazamiento-temperatura a carga constante para arreglos en flexión el análisis es determinación analítica del comportamiento desplazamiento-temperatura para el punto de aplicación de la carga. Como resultado del trabajo citado a continuación se presentan dos expresiones:

$$v_T = \left(\frac{2 \left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} T - \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} M_s \right) l^2}{3E_A h} \right) + \left(\frac{4}{bE_M^2} \right) \left(\frac{l}{h} \right)^3 \left\{ F_T E_M + \left(\frac{\left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} T - \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} M_s \right) b h^2}{6l} \right) K_5 \right\} \quad (1.4)$$

$$K_5 = \left[(E_A - E_M) \ln \left(\frac{\left(\frac{\left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} T - \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} M_s \right) b h^2}{6l} \right) E_A}{\left(\frac{\left(\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} T - \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s} M_s \right) b h^2}{6l} \right) (E_A - E_M) + F_T E_M} \right) - E_M \right]$$

Donde:

b, h, l son las dimensiones de la viga como se muestra en la figura 2.

v_T es el desplazamiento que sufre el punto de aplicación de la carga, de la viga, al variar la temperatura.

F_T es la magnitud de la carga aplicada. E_A y E_M son las pendientes que se aprecian en las curvas esfuerzo-deformación para una prueba en tensión simple en una muestra policristalina con memoria de forma.

T es la temperatura de prueba. M_S es la temperatura a la cual inicia la transformación martensítica por enfriamiento.

$\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_S}$ es la razón de clausius-clapeyron que, según se ha reportado, para el caso de Cu-Al-Be es aproximadamente de $1.9 \frac{MPa}{^\circ C}$ [8, 27, 28].

$$v(d) = \left[\frac{F(n+2)}{bk} \right]^{\frac{1}{n}} \left(\frac{2 \frac{n+1}{n}}{h \frac{n+2}{n}} \right) \left(\frac{nl \frac{1+2n}{n}}{2n+1} \right) \quad (1.5)$$

$$f = \frac{e^{\frac{T-M_S-T_C}{T_a}}}{1 + e^{\frac{T-M_f^0-T_C}{T_a}}} \quad k = f(k_2 - k_1) + k_1$$

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

$$T_C = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_S}} \quad T_a = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_S} \ln(99)}$$

Donde:

b, h, l, T y $\partial \sigma_c / \partial M_S$ tienen el mismo significado que en la ecuación 1

n es una constante que depende de la relación entre dos pendientes que se aprecian en las curvas de esfuerzo-deformación, para una prueba en tensión simple, en una muestra policristalina.

σ_A es la magnitud del esfuerzo máximo generado por la fuerza F .

E/α es la constante de la magnitud que depende del módulo elástico del material en fase austenítica.

Para obtener la ecuación 1.4 se partió de la solución de la “elástica” para la viga en cantiléver en el punto de aplicación de la carga, posteriormente se descompuso el desplazamiento total en pequeños desplazamientos debidos a la aparición de la nueva fase, con distinta propiedad elástica, lo cual se logra al incrementar la carga más allá de cierto valor crítico o bien al disminuir la temperatura, en realidad esta ecuación solo es

válida para un intervalo $M_S < T < M_S^\sigma$ para el enfriamiento y $A_S < T < A_f^\sigma$ para el calentamiento. Por otro lado, el criterio empleado para deducir la ecuación 1.4 considera que la nueva fase crece a lo largo de toda la viga una vez que en el comportamiento alcanza el valor crítico (σ_c). En realidad el criterio descrito no es muy preciso ya que la transformación iniciara solo en aquellos puntos, a lo largo y ancho de la viga, donde el esfuerzo alcance dicho valor.

Para obtener la expresión 1.5 se empleo un modelo de plasticidad donde el coeficiente k se definió como dependiente de la temperatura según la ley de Boltzman, esta ecuación es una función continua para todo T , tanto para el enfriamiento como para el calentamiento, el empleo de la ecuación 1 o 2 depende de la aplicación que se desee implementar.

En el modelo propuesto se desarrolla un análisis que considera los puntos, a lo largo y ancho de la viga, en los que se induce la nueva fase son aquellos donde el esfuerzo normal es mayor al esfuerzo crítico (σ_c). Lo anterior implica que la viga presente una variación en las propiedades mecánicas a lo largo de su eje longitudinal, es decir un modulo elástico que varía en esa dirección. Con este enfoque se obtendrá un modelo que permite determinar el desplazamiento que sufrirá, al variar la temperatura, ya sea un punto cualquiera de la viga, situado sobre el eje neutro del elemento, o bien todo el eje neutro al aplicar una carga constante en su extremo libre.

El presente análisis parte de algunos de los planteamientos de la teoría de vigas, para casos de elasticidad lineal, que se emplean para modelar la flexión de una viga en cantiléver con carga puntual en su extremo libre. Desde luego, dichos planteamientos son empleados con ciertas correcciones que consideran el comportamiento que presentan los materiales con comportamiento que presentan los materiales con memoria de forma el cual, como se menciono anteriormente, es no lineal y dependiente de la temperatura.

La primera parte del análisis consiste en determinar las regiones donde se supondrá que aparecerá la nueva fase en la viga, es decir aquellos puntos donde el esfuerzo es mayor al valor crítico. En realidad, se sabe que después de que se alcanza el esfuerzo crítico se presenta una zona de transición [4, 7, 15], que presenta precisamente la transformación de fase austenita-martensita, la cual se extiende hasta alcanzar cierta deformación que depende de la orientación de cada grano. Dicha situación origina que en muestras policristalinas se presente una segunda pendiente, después del esfuerzo crítico, en lugar de la meseta que se presenta en monocristales. Por otro lado, frecuentemente en muestras policristalinas, no es posible observar la terminación de la zona de transición debido a la gama de deformaciones transformacionales que pueden presentarse en el mismo material [6, 15].

Las dos pendientes que se observan en las curvas esfuerzo deformación, por los materiales con memoria de forma, pueden ser interpretadas como dos propiedades elásticas aunque no precisamente se hable de dos módulos elásticos.

Se recurrió a la expresión que define la magnitud del esfuerzo normal, a lo largo del eje de la viga para un caso lineal, en una viga en cantiléver con carga puntual en su extremo libre como la que se muestra en la figura 1.19:

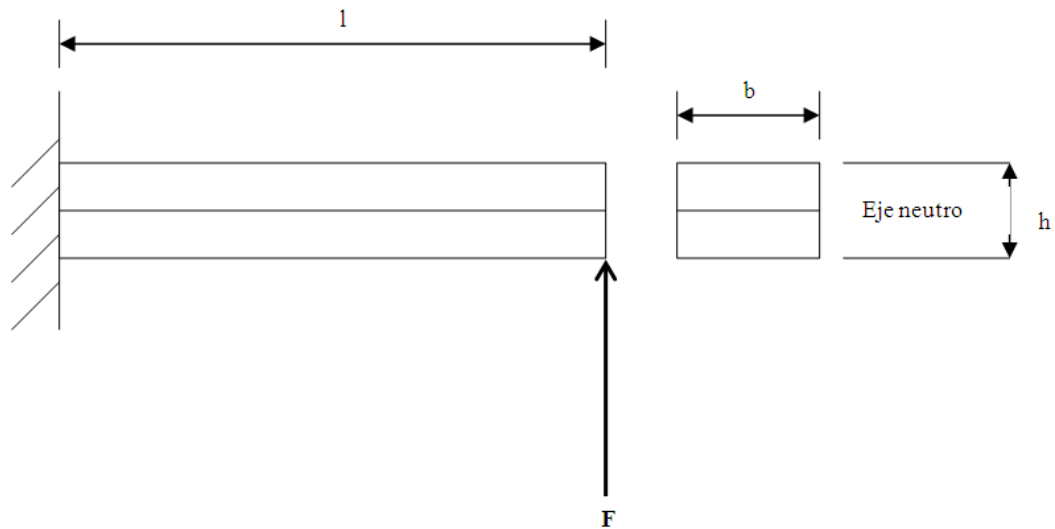


Figura 1.19.- Arreglo de una viga sujeta a flexión en cantiléver.

El esfuerzo varía tanto en la dirección del eje de la viga como en la dirección transversal como se puede apreciar en la ecuación 1.6:

$$\sigma = \frac{F(l - x)}{I} \quad (1.6)$$

Considerando el comportamiento esfuerzo-deformación de los materiales con memoria de forma, presenta dos regiones lineales delimitadas por el esfuerzo crítico, es razonable pensar que el esfuerzo crítico se alcanzara, al disminuir la temperatura, en distintos puntos en la dirección transversal de la viga (en la dirección “y” que se muestra en la figura 1.19). Considerando que para el caso de flexión que estudiamos, el cambio de pendiente se lograra cuando esfuerzo normal alcanza el valor crítico entonces resulta razonable calcular la región correspondiente mediante la expresión 1.7, partiendo de la ecuación del esfuerzo crítico:

$$\sigma_c = \frac{M}{I} y_0$$

donde:

$$M = F(l - x)$$

$$I = \frac{bh^3}{12}$$

Por lo tanto:

$$\sigma_c = \frac{12 F(l - x)}{bh^3} y_0$$

$$y_0 = \frac{bh^3 \sigma_c}{12F(l - x)} \quad (1.7)$$

Donde y_0 es la coordenada en donde el esfuerzo es igual al valor crítico.

Este criterio en realidad no sería correcto si se considera al cambio de pendiente, de las curvas esfuerzo deformación en tensión simple, como una cadencia aparente ya que en tal caso, se sabe que el criterio se debe emplear es el de Von-Misses [29]. Sabiendo que el esfuerzo crítico disminuye con la temperatura es posible determinar, empleando la ecuación 1.7, la evolución (El crecimiento) de la región donde la propiedad mecánica corresponde con la segunda pendiente que se aprecia en las curvas esfuerzo-deformación ya que “ γ_0 ” (que delimita dicha región) es función del esfuerzo crítico; el “crecimiento” de las franjas, conforme disminuye la temperatura, se puede ver en la figura 1.20.

Evidentemente las “franjas” que se muestran en la figura 1.20 no corresponden con las que se consideraron en el modelo correspondiente a la ecuación 1.5 ya que en ese caso se considero que las regiones de la viga donde la propiedad mecánica corresponde con la segunda pendiente, se extiendan a lo largo de todo elemento con un espesor constante.

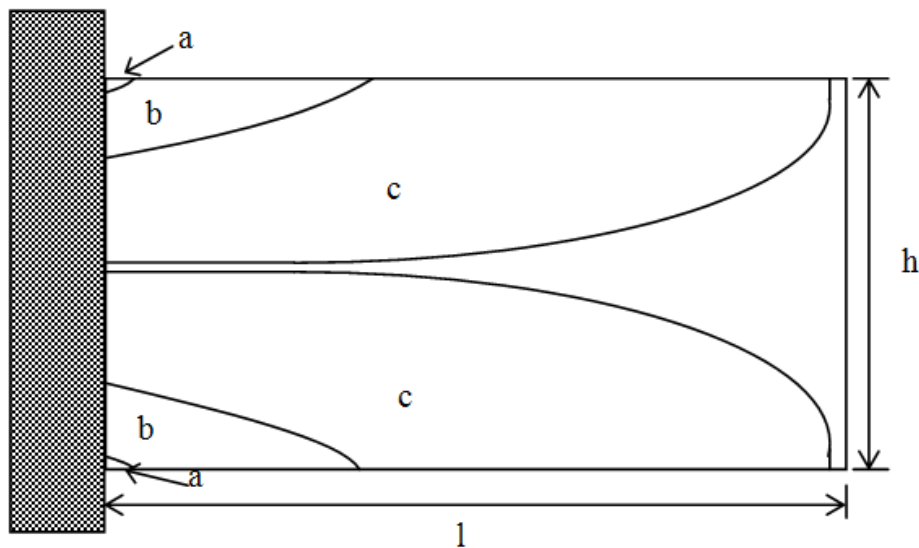


Figura 1.20.- Crecimiento de las zonas de transformación de la viga sujeta a carga constante y temperatura variable. La región “a” corresponde con una temperatura T_1 , la “b” con una T_2 y c con una T_3 ($T_1 > T_2 > T_3$).

Como se puede ver el criterio que considera las franjas como la figura 1.20 es más preciso dado que, en un caso de flexión, el esfuerzo varía tanto en la dirección x como la y . El efecto del criterio anterior puede tener sobre el comportamiento desplazamiento-temperatura desde luego es local y no global como el de la ecuación 1.5.

Considerando lo anterior es evidente que para la determinación del comportamiento desplazamiento-temperatura se debe emplear un procedimiento distinto al usado en la primera aproximación [26]. El procedimiento propuesto para resolver el problema consiste en resolver la ecuación de la deflexión uniaxial (comúnmente llamada la ecuación de la elástica) suponiendo que se presenta una variación de la propiedad elástica (modulo elástico) a lo largo de la dirección x de la viga. Para representar dicha variación del modulo elástico (E) se considera un modulo equivalente (E_{eq}), compuesto por dos “módulos” distintos, y que varía en la dirección x . Para cualquier modulo equivalente se emplearon las siguientes expresiones:

$$E_{eq} = f_A E_A + f_M E_M$$

Si $f_M = 1 - f_A$ por lo tanto:

$$E_{eq} = f_A E_A + (1 - f_A) E_M$$

$$E(x) = E_{eq} = f_A (E_A - E_M) + E_M$$

$$f_A = \frac{V_A}{V} = \frac{b^2 h^3 \sigma_C}{6F b h (l - x)} \quad (1.8)$$

Donde: f_A es la fracción volumétrica de la fase austenítica en la viga calculada a partir de la ecuación 1.7.

Luego, empleando las expresiones 1.8 e incorporándolas en la ecuación de la elástica, se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M(x)}{E(x)I} = \frac{F(l - x)}{\frac{bh^3}{12} \left[\frac{bh^2 \sigma_C}{6F(l - x)} (E_A - E_M) + E_M \right]} \quad (1.9)$$

La cual al resolverse para una temperatura constante, según la teoría de las vigas, proporciona el eje neutro de la viga (la curva elástica) desde luego, usando como condiciones de frontera: que $v(0) = \frac{dv(0)}{dx} = 0$. Así resolviendo la ecuación 1.9 se obtuvo la siguiente expresión:

$$v(x) = \frac{A(-B + Gl)}{2G^2} x^2 - \frac{Ax^3}{6G} + \frac{AB^2}{G^3} \ln(B + Gl)x + \frac{AB^2}{G^4} (B + Gl - Gx) [\ln(B + Gl - Gx) - 1] - \frac{AB^2}{G^4} (B + Gl) [\ln(B + Gl) - 1] \quad (1.10)$$

Donde:

$$A = 72F^2 \quad B = b^2 h^5 \sigma_C (E_A - E_M) \quad G = 6FE_M b h^3$$

La expresión anterior permite determinar el desplazamiento del eje neutro de la viga solo en un intervalo $0 < x < x_0$, donde x_0 corresponde con la distancia en la dirección x a la cual llega la franja del material que se encuentra trabajando bajo la segunda propiedad elástica. El valor de x_0 puede ser calculado fácilmente empleando la ecuación 1.11:

$$x_0 = l - \frac{bh^2 \sigma_C}{6F} \quad (1.11)$$

Debido a lo anterior es necesario obtener otra expresión que permita calcular el desplazamiento del eje neutro de la viga para el intervalo $x_0 < x < l$.

Para lograr esto, simplemente se considero la solución de la elástica para un caso lineal tomando $E = E_A$ y con condiciones de frontera convincentes. Tales condiciones de frontera fueron: que tanto el desplazamiento como su primera derivada con respecto a x en $x = x_0$ considerando lo anterior se obtuvo la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 v(x) &= \frac{2F(l-x)^3}{bh^3} + C_1x + C_2 \\
 C_1 &= \frac{A(-B+Gl)}{G^2}x_0 - \frac{Ax_0^2}{2G} \\
 &\quad + \frac{AB^2}{G^3}\ln(B+Gl) - \frac{AB^2}{G^3}\ln(B+Gl-Gx_0) + \frac{6F(l-x_0)^2}{E_Abh^3} \\
 C_2 &= \frac{A(-B+Gl)}{2G^2}x_0^2 + \frac{2A}{6G}x_0^3 \\
 &\quad + \frac{AB^2}{G^3}\ln(B+Gl-Gx_0)x_0 - \frac{6F(l-x_0)^2}{E_Abh^3}x_0 - \frac{2F(l-x)^3}{bh^3} \\
 &\quad + \frac{AB^2}{G^4}(B+Gl-Gx_0)[\ln(B+Gl-Gx_0)-1] \\
 &\quad - \frac{AB^2}{G^4}(B \\
 &\quad + Gl)[\ln(B+Gl)-1] \tag{1.12}
 \end{aligned}$$

Donde A , B y G tiene el mismo significado que en la ecuación 1.10.

El hecho de que sea necesario emplear la ecuación 1.10 y 1.12 para simular el desplazamiento se puede ver claramente si analizamos la ecuación 1.12 para el caso en el que $x_0 \neq 0$ y $x = 0$. Bajo tales condiciones, el desplazamiento calculado con la ecuación 1.12 es distinto de cero, lo que viola las condiciones de frontera en el empotramiento. En cambio si se emplea la ecuación 1.10 el resultado es el esperado en virtud de que dicha condición fue impuesta al realizar la integración y por lo tanto se satisface.

CAPÍTULO 2. Transmisión de carga y movimiento

2.1.- Mecanismos.

No cabe duda que los MMF tienen propiedades únicas que pueden ser aplicables a varios diseños, dentro de los cuales se puede pensar en la adaptación de ellos a diversos mecanismos como impulsor de movimiento. Debido a lo anterior a continuación se definirán conceptos generales de la teoría de máquinas y mecanismos (TMM).

La 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.[19]

Las similitudes entre máquinas y mecanismos son [20]:

- Ambos son combinaciones de cuerpos rígidos.
- El movimiento relativo entre los cuerpos rígidos está limitado.
- 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.

En la TMM se diferencian el análisis y la síntesis de mecanismos [19] las cuales se describen a continuación:

- 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.

Por ejemplo en un diseño se habrá de emprender la determinación de un mecanismo – síntesis– que permita guiar un sólido de una configuración a otra. Este capítulo estará dedicado al análisis de mecanismos, mientras que en el capítulo tercero se llevarán a cabo la síntesis de los mecanismos haciendo mayor énfasis a los mecanismos de transmisión de carga y movimiento ya que tienen aplicación en el diseño presentado en este trabajo.

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

El propósito real de una máquina o mecanismo es aprovechar los movimientos internos relativos para transmitir potencia o transformar el movimiento [19, 20]. Se definirán algunos de los conceptos utilizados en la teoría de máquinas y mecanismos:

Máquina: Diversos autores reportan diferentes conceptos, pero la mayoría coincide en que es un sistema concebido para realizar una tarea determinada, que comparta la presencia de fuerzas y movimiento, un dispositivo para aplicar potencia o cambiar su dirección y, en principio, la realización de un trabajo [19, 20, 22].

Mecanismo:

- 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[22].
- Es un dispositivo para transformar un movimiento en otro[19, 20].
- Es una combinación de piezas de materiales resistentes cuyas partes tienen movimientos relativos restringidos[19, 20].

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. Y además que 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.

Estructura: Combinación de cuerpos rígidos conectados por medio de articulaciones pero cuyo objetivo no es efectuar trabajo ni transformar el movimiento, además tiene por objeto ser rígida y carece de movilidad interna.

Cabe mencionar que la literatura cita que existe una analogía directa entre los tres primeros términos. El término estructura es la estática, lo que el término mecanismo es la cinemática y el término máquina es la cinética [19].

Grupo o unidad: Salvador Cardona lo reporta en su literatura como un conjunto diferenciado de elementos de una máquina. (A veces grupo se utiliza como sinónimo de máquina).[22]

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

Eslabón: Un 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 [19, 20].

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 existen dos tipos de cadenas cinemáticas descritas a continuación[22]:

- 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.

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[19, 20].

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.

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.

Esquemas: 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[22]:

- Si la información que se quiere presentar es únicamente la de información 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.

Tabla 2.2. Representación simbólica de algunos elementos según la norma UNE-EN ISO 3952[22].

par de revolución o articulación			leva plana de rotación		con articulación fija	ruedas dentadas	
par prismático o guía-corredera			leva plana de traslación			transmisión por ruedas dentadas (engranajes)	
par helicoidal			palpadores	de traslación	de rotación		
par cilíndrico				plano			
par plano				de rodillo			
par esférico o rótula esférica				puntual			
jointa universal			curvo		ruedas de fricción	embragues y frenos	
corredera con articulación					plana	transmisiones por correa y cadena	
par guía-botón					cilíndrica		
unión rígida entre miembros					cónica interior		
articulaciones en medio de barras					cónica exterior		

- 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 a 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.

Para realizar un esquema de símbolos de un mecanismo se pueden seguir los siguientes pasos:

- 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.

2.1.2.- 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.

Un mecanismo plano es aquel en el que sus eslabones describen curvas en un solo plano o en planos paralelos. En otras palabras todas sus partículas describen curvas planas en el espacio y todas estas se encuentran en planos paralelos[19, 20]. Puede pensarse en ellos como mecanismos bidimensionales. La transformación de movimiento de cualquier mecanismo de esta índole se llama “coplanar”. 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. En la figura 2.1 se muestra la esquematización de un mecanismo con planos paralelos.

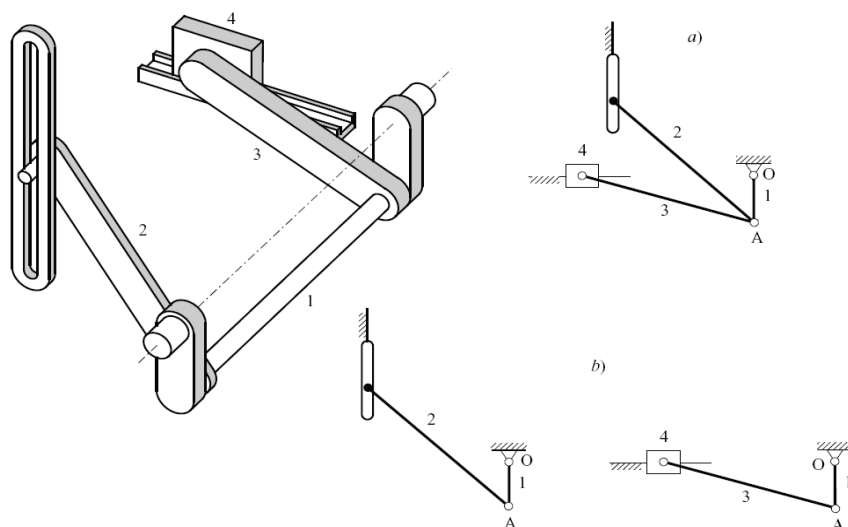


Figura 2.1 Mecanismo de barras y esquema de símbolos, completo a) y partido en dos b).[22]

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.

2.1.3.- 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.

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

El análisis cinemático o 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 o 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.

Centrándose un poco más en el análisis cinemático, para un mecanismo del cual se conoce: la configuración descrita mediante un conjunto de n coordenadas generalizadas, los enlaces descritos mediante un conjunto de ecuaciones de enlace, y otras restricciones entre coordenadas generalizadas o velocidades generalizadas, se pueden plantear el análisis de configuraciones o de montaje, el análisis de velocidades y el análisis de aceleraciones.[22]

- *Análisis de configuraciones:* Consiste en determinar el conjunto de valores de las coordenadas generalizadas que satisface todas las ecuaciones de enlace geométricas, dados los valores de las coordenadas generalizadas independientes y el tiempo, si aparece explícitamente.
- *Análisis de velocidades:* Consiste en determinar el valor de las velocidades generalizadas de un mecanismo en una configuración, dados los valores de las velocidades generalizadas independientes y el tiempo, si aparece explícitamente en la formulación de las ecuaciones de enlace. Posteriormente se puede encontrar la distribución de velocidades de todos los miembros del mecanismo.
- *Análisis de aceleraciones:* Consiste en determinar el valor de las derivadas de las velocidades generalizadas de un mecanismo en una configuración, dados los valores de las velocidades generalizadas independientes y los valores de las derivadas de las velocidades generalizadas independientes, así como también del tiempo, si este aparece explícitamente en la formulación de las ecuaciones de enlace. Posteriormente se puede encontrar, a partir de las velocidades generalizadas y sus derivadas, la distribución de aceleraciones de todos los miembros del mecanismo.

2.2.-Tren de Engranés

Un tren de engranes son que aquellos mecanismos que disponen de diferentes combinaciones en serie y en paralelo, de tal manera que el elemento impulsado de uno de estos mecanismos es el impulsor de otro[19].

Estos mecanismos van transmitiendo una fuerza para generar un movimiento uno sobre otro, y hay tres tipos: por engranes, por correa y por cadena y catalina. La unión de varios mecanismos simples, forman: un sistema de transmisión reductor, el tren de poleas y tren de engranes.

Esta sección se centrara en el tren de engranes el cual se denomina como conjunto de engranes que sirven para comunicar fuerza y movimiento desde un motor hasta su punto de aplicación (figura 2.2).

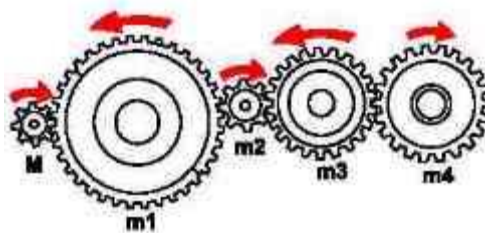


Figura 2.2 Mecanismos de transmisión “Tren de engranes”

2.2.1.-Definición de engranes y trenes de engranes.

Engrane: Rueda dentada usada para transmitir potencia mecánica entre las distintas partes de una máquina. Los engranes se estudian porque la transmisión de movimiento rotatorio de un eje a otro se presenta en todas las maquinas imaginables; ya que estos se consideran unos de los mejores mecanismos para transmitir fuerza y movimiento.

A continuación se trataran términos y definiciones que ayudaran a familiarizarse de forma general ya que posteriormente se hablara de los tipos de engranes y la diferencia entre ellos. [19, 21, 23].

Circulo de paso: Es un circulo teórico en el que generalmente se basan todos los cálculos. También conocida como circunferencia primitiva la cual se considera como el diámetro total de un engrane. Los círculos de paso entre dos engranes son tangentes entre sí.

Piñón: Es el más pequeño de los engranes acoplados el más grande casi siempre se llama engrane.

Cabeza o addendum a: Es la distancia radial entre el borde superior y el círculo de paso.

Raíz o dedendum d: Es la distancia radial que va del borde inferior hasta el círculo de paso.

Espesor de diente: Es la anchura del diente sobre la circunferencia primitiva.

Anchura del espacio: Es la distancia entre dientes medida en la circunferencia primitiva.

Anchura de la cara: Es la longitud de los dientes en dirección axial.

Cara: Es la superficie del diente comprendida entre la circunferencia primitiva y el addendum.

Flanco: Es la superficie comprendida entre la circunferencia primitiva y la raíz.

Borde superior: Es la cara de la superficie superior del diente o cabeza.

Borde inferior: Es la parte inferior comprendida entre dos dientes o fondo.

Altura total h_t : Es la suma de addendum y el dedendum.

Holgura: Circulo tangente al addendum del engrane acoplado. El dedendum del engrane dado excede al addendum del engrane con el que se acopla.

La figura 2.3 muestra cada una de las partes mencionadas anteriormente.

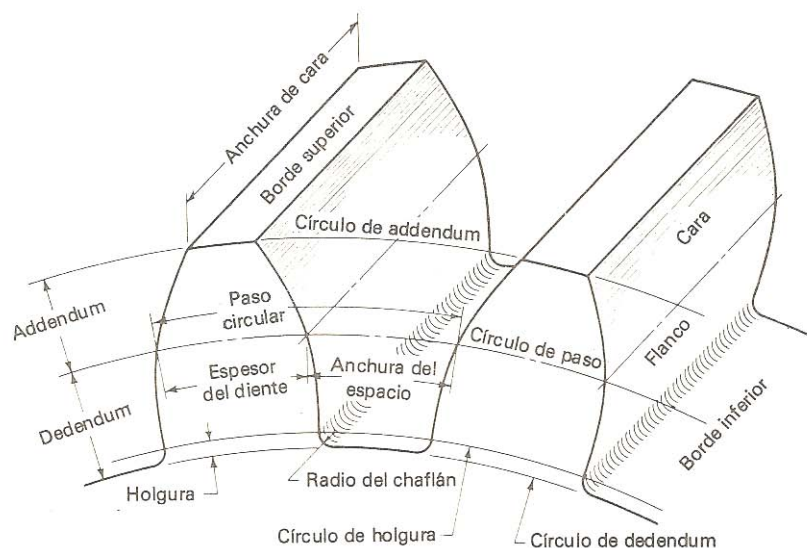


Figura 2.3. Terminología para un engrane[19]

Paso circular P_c : Es la distancia medida sobre el círculo de paso que va desde un punto sobre uno de los dientes hasta un punto correspondiente sobre un diente adyacente.

Paso diametral P : Es el número de dientes por pulgada de diámetro de paso. Las unidades de paso diametral son el recíproco en pulgadas.

Modulo m : Es la razón del diámetro de paso al número de dientes. La unidad acostumbrada para m son los milímetros.

Tren de engranes: Es un sistema con más de un par de ruedas dentadas o engranes. Uno de los principales objetivos es la transmisión de movimiento de un lugar a otro, modificando por lo regular el movimiento durante la transmisión. La necesidad de

utilizar más de un engranaje puede quedar justificada por los siguientes motivos[22, 23]:

- Obtención de una relación de transmisión imposible de conseguir con un solo par de ruedas. Es el caso de un reductor 1/20 de ejes paralelos, relación de transmisión fuera del rango aconsejable con un único engranaje.
- Poder disponer de una gama de relaciones de transmisión. Es el caso de una caja de cambios de un vehículo.
- Limitaciones del espacio disponible. Por ejemplo, si se ha de transmitir el movimiento entre dos ejes paralelos muy alejados, con solo dos ruedas dentadas, estas tendrían un tamaño excesivo. Es el caso de un vehículo con motor transversal y tracción total. La transmisión a las ruedas posteriores se efectúa mediante un eje intermedio longitudinal y engranajes cónicos.
- Transmisión del movimiento de un eje a diversos, simultáneamente. Por ejemplo, el motor paso a paso de un reloj mecánico ha de accionar simultáneamente las tres agujas que señalan los segundos, los minutos y las horas.
- Obtención de mecanismos con más de un grado de libertad. Es el caso del diferencial empleado en los automóviles.

En los mecanismos de cuatro barras se trabaja con velocidades angulares (ω), para los engranes es más conveniente trabajar con la velocidad y por lo tanto se emplea la letra n para describir la velocidad en revoluciones por minuto (*rpm*)[19]

$$e = \frac{n_L}{n_F} \quad (2.1)$$

En donde n_L es la velocidad del último engrane de un tren y n_F el primer engrane del mismo tren. e recibe el nombre de razón de velocidades o razón de tren.

Si se tiene un piñón 2 que impulsa aun engrane 3 la velocidad del engrane impulsado esta dada por:

$$n_3 = \frac{N_2}{N_3} n_2 = \frac{d_2}{d_3} n_2 \quad (2.2)$$

En donde N es el número de dientes, d es el diámetro de paso y n es la velocidad en rpm o número total de vueltas. En un tren cómo el mostrado en la Figura 2.4 el cual se compone de 5 engranes si aplicamos la ecuación 2.2 para encontrar la velocidad del engrane 6 obtenemos:

$$n_6 = \frac{N_2}{N_3} \frac{N_4}{N_5} \frac{N_5}{N_6} n_2 \quad (2.3)$$

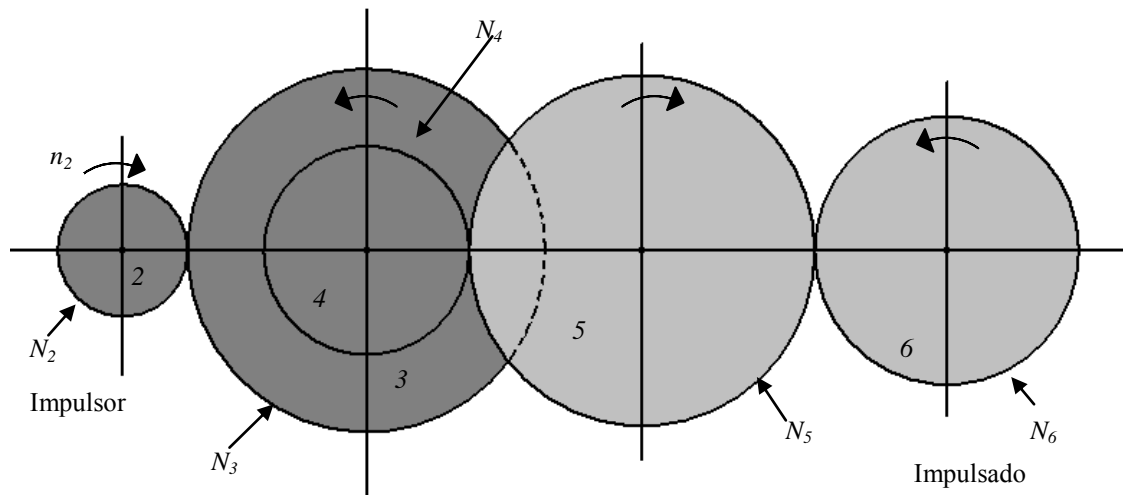


Figura 2.4. Tren de 5 engranes

En la figura anterior se puede notar que los engranes 2, 4, 5 son impulsores, mientras que los 3, 5 y 6 son impulsados; por lo que la ecuación 2.4 la podemos expresar como [19, 23]:

$$e = \frac{\text{productos de los } N_{\text{impulsores}}}{\text{productos de los } N_{\text{impulsados}}} \quad (2.4)$$

Para designar la convención de los signos se usa el siguiente criterio:

Si el último engrane gira en sentido del primero el signo de e es positivo, y si el giro del último engrane es diferente al primero e es negativo. [19]

Ejemplos de tren de engranes

Tren de engranes ordinario: Los centros de cada engrane están pivotados a tierra mediante cojinetes. Los ejes de todos los engranes están fijos respecto a tierra.

- **Tren de engranes simple:** Se llama simple ya que tiene un solo engrane en por cada eje.
- **Tren de engranes compuesto:** Cuenta con dos o más engranes en uno o más ejes.

Tren de engranes invertido: Es aquel en el que el primero y último engrane están sobre el mismo eje. Esta configuración es usada con frecuencia en relojes.

Tren de engranes planetarios o epicíclico: Este tipo de arreglos ofrecen dos grados de libertad a comparación de los ordinarios que solo tienen un grado de libertad. La Figura 2.5 b) se muestra que el engrane 3 su centro se libera en B por lo que el eslabón 4 gira en B, en cambio en la Figura 2.5 a) el eslabón 4 está fijo a tierra en A y B por lo que los engranes 2 y 3 giran en sus centros fijos. [23]

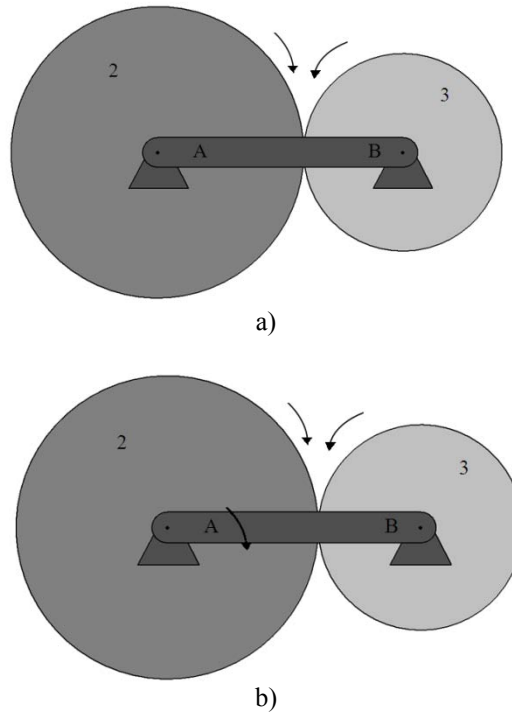


Figura 2.5 Tipo de tren de engranes a) ordinario y b) planetario

Si un tren de engranes planetario conserva sus dos grados de libertad se le llama *diferencial*.

La razón de velocidad e para un tren planetario está dada por la ecuación [19]

$$e = \frac{n_L - n_A}{n_F - n_A} \quad (2.5)$$

en donde:

n_F es la velocidad del primer tren de engranes del primer engrane del tren en *rpm*.

n_L es la velocidad del último tren de engranes del primer engrane del tren en *rpm*.

n_A es la velocidad del último brazo o eslabón en *rpm*.

2.2.2.- Tipos de engranes

Existen numerosas aplicaciones en las que una razón angular de velocidad constante se debe transmitir de un eje a otro. Gracias a la diversidad de tipos de engranes disponibles mostrados en la Figura 2.6, los ejes de entrada y salida no tienen que estar forzosamente alineados ni paralelos.

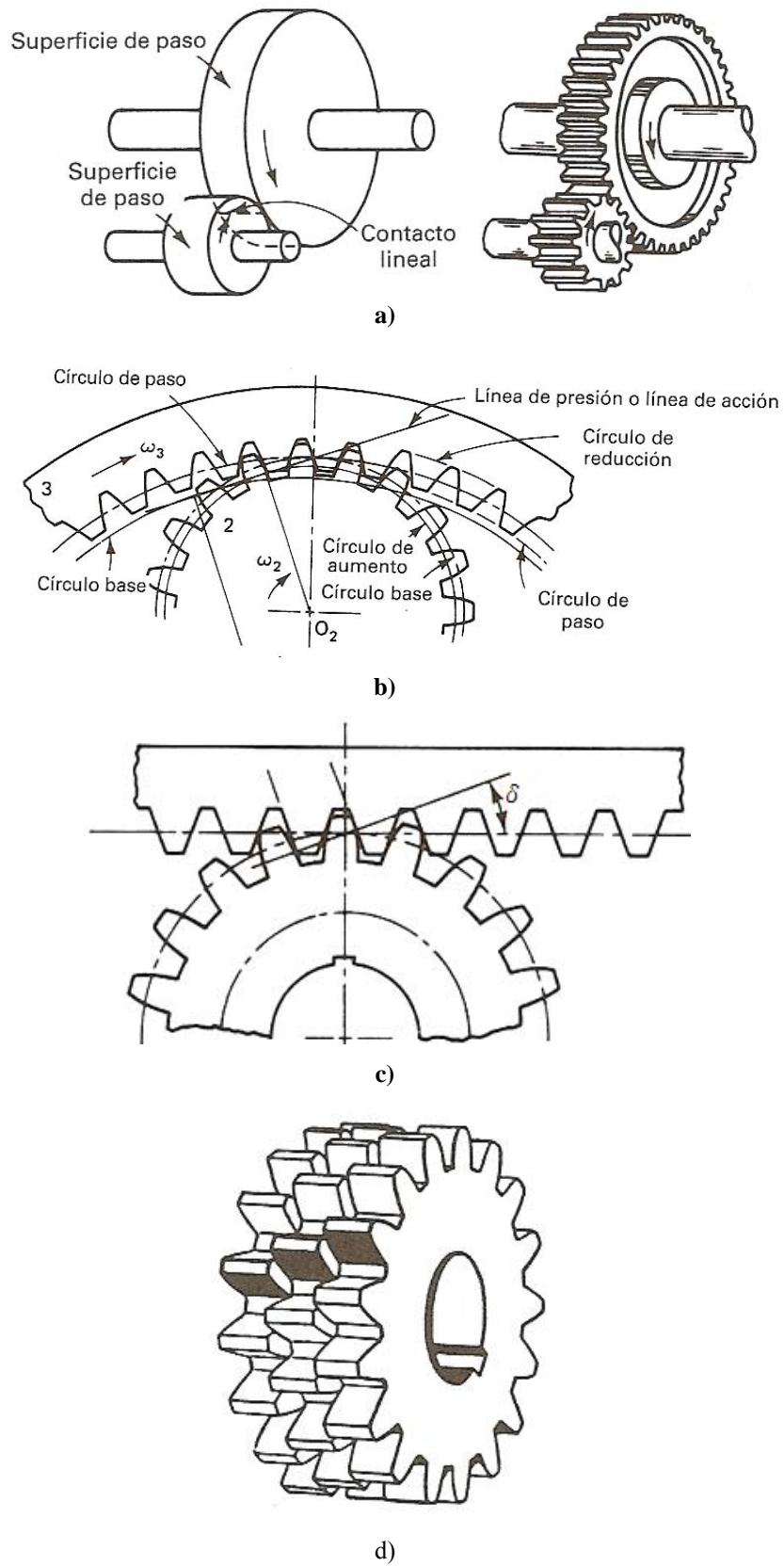


Figura 2.6 Tipos de engranes estándar a) rectos, b) engrane anular interno y piñón, c) piñón y cremallera envolvente y d) engranes escalonados.[23]

Engranés rectos: Sirven para transmitir movimiento entre ejes paralelos, por lo regular son cilíndricos y los dientes son rectos y paralelos al eje de rotación.

Engrane anular interno y piñón: Engrane de anillo interno o anular es un engrane recto, el piñón sigue una circunferencia como trayectoria.

Piñón y cremallera de envolvente: El piñón sigue la trayectoria de un engrane recto con diámetro de paso infinitamente largo.

Engranés escalonados: consiste en dos o más engranes sujetos entre sí. Estos engranes tienen una acción más silenciosa y suave que los engranes rectos convencionales.

Engranés helicoidales paralelos: Puede verse como engranes escalonados y su funcionamiento es muy silencioso (Figura 2.7(a)).

Engranés helicoidales cruzados: sirven para transmitir potencia entre ejes no paralelos que no se intersecan. (Figura 2.7 (b))

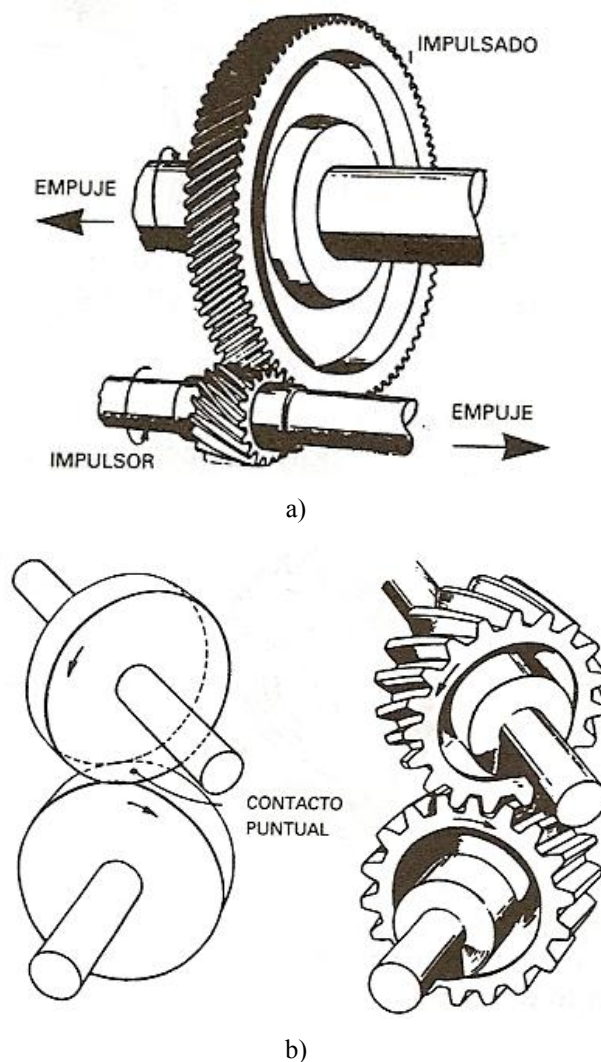


Figura 2.7 Engranés tipo helicoidales: a) helicoidales de ejes rectos y b) helicoidales cruzados.[23]

Engranés cónicos recto: Se usan para transmitir potencia entre ejes que se intersecan, usualmente son usados en ejes cuyo ángulo es de 90° aunque pueden producir casi para cualquier ángulo.

Engranés cónicos sesgados: Sirven para conectar árboles cuyos ejes no se intersecan. Los dientes son líneas rectas y hay una acción deslizante a lo largo del elemento de diente así como perpendicularmente al elemento de diente.

Engranés hipoides: Con gran similitud con los cónicos sesgados con diferencia de que las superficies de paso de estos engranes son hiperboloides. Empleados en las transmisiones de eje trasero de un automóvil.

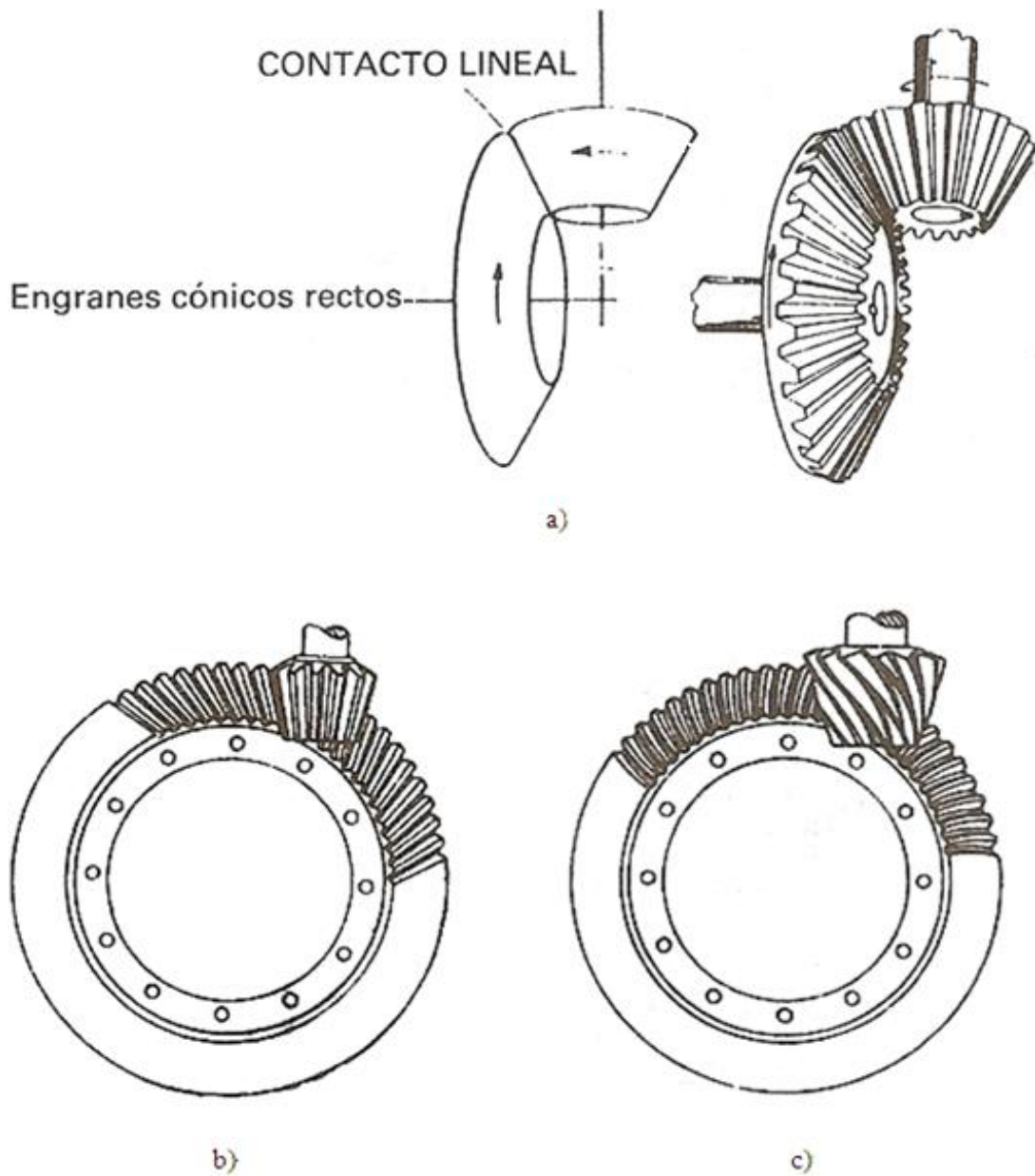


Figura 2.8 Engranés tipo cónicos: a) cónico rectos, b) cónico sesgado y c) hipoides.[23]

Tornillo sin fin: Transmite el movimiento entre ejes que están en ángulo recto. Se compone de un tornillo cilíndrico o hiperbólico y un engrane como muestra la Figura 2.9. Cada vez que el tornillo sin fin da una vuelta completa, el engranaje avanza un diente.

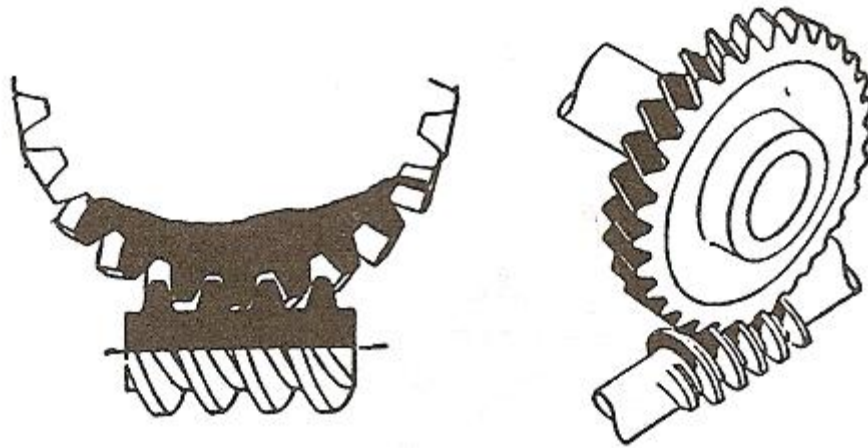


Figura 2.9. Tornillo sin fin[23]

2.2.3.-Engranés rectos

Los engranes cilíndricos rectos son ruedas dentadas cuyos dientes son rectos y paralelos a su eje correspondiente. Sirven para transmitir movimiento y potencia entre ejes paralelos [19, 21]. Se utilizan generalmente para velocidades pequeñas y medias; a grandes velocidades. Debido a las características mencionadas, este tipo de engranes son los usados en el diseño de las persianas inteligentes, por lo que a continuación se analizan a mayor detalle.

2.2.3.1- Análisis cinemático de engranes

Como se vio con anterioridad el análisis cinemático es el estudio de la relación de la configuración del engrane la velocidad y la aceleración del mismo.

Juego entre dientes: Es la cantidad en la que la anchura de un espacio entre dientes excede al espesor del diente acoplado sobre los círculos de paso.

Para un mejor entendimiento debemos tener en cuenta las siguientes ecuaciones[19, 21, 23]:

$$P = \frac{N}{D} \quad m = \frac{D}{N} \quad (2.6)$$

en donde

P = paso diametral, dientes por pulgada

N = número de dientes

D =diámetro de paso, pulg o mm

m =modulo, mm

$$P_c = \frac{\pi D}{N} = \pi m \quad (2.7)$$

en donde P_c es el paso circular en pulgadas o milímetros

$$P_c P = \pi \quad (2.8)$$

Angulo de acción: Es el ángulo que gira el engrane desde que entra en contacto con otros dientes hasta que termina su contacto.

Angulo de aproximación: Es el ángulo en que gira un engrane desde el instante en que entra en contacto entre los dientes de una rueda con el diente correspondiente a otra, hasta el momento en que ambos dientes quedan en contacto con el punto primitivo.

Angulo de alejamiento: Es el ángulo en el que el engrane esta en el punto primitivo hasta el instante que termina el contacto entre ambos dientes.

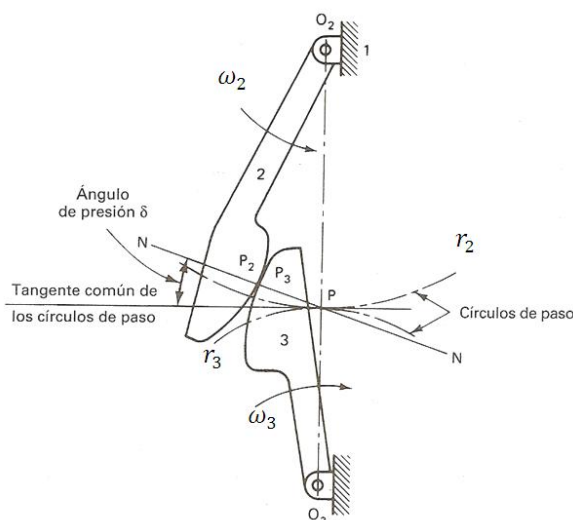
Cabe mencionar que la suma del ángulo de aproximación y el ángulo de alejamiento es igual al ángulo de acción.

Relación de velocidad m_ω : Es el cociente de la velocidad angular del engrane motor y el engrane conducido. En engranes cilíndricos esta razón es inversa a los números de dientes, asignándosele los subíndices 1 y 2 a los engranes motor y conducidos respectivamente.

$$m_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (2.9)$$

Relación de engrane m_y : es el número de dientes de la rueda dividido entre el número de dientes del piñón. Si el piñón es motor se puede deducir que $m_y = m_\omega$. [21]

Ley fundamental del engranaje: Para una razón de velocidad constante, la normal común del flanco de los dientes en contacto siempre debe pasar por el punto de paso P .



2.10. Ley fundamental del engranaje. [23]

Perfiles conjugados: En la Figura 2.10 se muestran dos perfiles que embonan y satisfacen la ley del engranaje por lo tanto sus superficies son conjugadas. Donde la relación de transmisión se define por la ecuación [19, 22, 23]

$$\frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{r_3}{r_2} \quad (2.10)$$

Angulo de presión δ : Angulo que forman la línea de acción de las fuerzas entre dientes embonantes con una perpendicularidad a la línea de centros de los engranes que pasa por el punto de paso.

Línea de presión: Es la línea definida por el ángulo de presión y la tangente a ambos círculos base de un conjunto de engranes acoplados. Por lo que el contacto, el movimiento y la transferencia de potencia, se dan a lo largo de esta línea.

Línea de acción ℓ : Es la porción de la línea de presión a lo largo de la cual ocurre el contacto de los dientes de los engranes. El contacto se inicia cuando el diente impulsado es empujado por el flanco del diente impulsor.

Longitud de acción Z : Es la longitud del segmento de la línea de acción comprendida entre los puntos inicial y final de contacto y esta expresada por la siguiente ecuación [21]:

$$Z = (r_{a2}^2 - r_{b2}^2)^{1/2} + (r_{a1}^2 - r_{b1}^2)^{1/2} - C \sin \delta \quad (2.11)$$

Donde:

r_{a1} y r_{a2} son los radios de las circunferencias addendum.

r_{b1} y r_{b2} son los radios de las circunferencias base.

C distancia entre centros.

Relación de contacto m_c : Se puede definir como la razón de longitud de acción al paso base, o como la reacción del arco de acción al paso circular. Puede ser calculada mediante la ecuación [21]:

$$m_c = \frac{Z}{P_b} = \frac{Z}{P_c \cos \delta} \quad (2.12)$$

Paso de base P_b : es la distancia a lo largo del arco del círculo base entre perfiles correspondientes de dientes adyacentes.

$$P_b = P_c \cos \delta \quad (2.13)$$

$$PT = \omega \quad (2.14)$$

$$T = Fr_b \quad (2.15)$$

donde:

P es la potencia (hp)

ω es la velocidad angular (r/s)

T es el par transmitido (N·m)

F es la fuerza (N)

r_b es el radio (m)

Si P y ω son constantes, también lo será T y por tanto también F . Lo que si varía es el punto de contacto, y por tanto el efecto de esta fuerza sobre el diente será diferente según esté situada por ejemplo en el extremo de la cara o en el flanco.

Resistencia de los dientes de engranes

En ausencia de rozamiento, la fuerza resultante W actúa sobre el diente de engrane, está situada sobre la línea de presión en un engranaje de evolvente y su línea de aplicación se desplaza desde la parte superior del diente hasta la parte inferior del mismo; en la Figura 2.13 W , F , N están distribuidas uniformemente en toda la longitud del diente[21]. Considerando este como una viga en cantiléver el esfuerzo es máximo cuando un diente soporta toda la carga en su extremo superior o punta, como en la figura 2.13a. Sin embargo si la relación de contacto es mayor que la unidad y si los dientes son geoméricamente exactos, en la transmisión de fuerza o potencia participa otro diente cuando la parte superior del primero está en contacto. Mientras el diente de la figura 2.13a se mueve dentro de su ángulo de acción, el punto de aplicación de W desciende en el perfil. En alguna fase de este movimiento, con una relación de contacto menor que dos, el diente soportara la carga total como en la figura 2.13b.

En el punto en que la línea de acción de W corta a la línea central del diente, la fuerza W se reemplaza por sus componentes radial y tangencial, N y F . La fuerza N produce un esfuerzo uniforme de compresión sobre cualquier sección del diente, por ejemplo, en VE . La componente F produce un esfuerzo flector: tracción en E y compresión en V . La compresión uniforme en E se resta de la tracción por flexión en E produciendo en este punto un menor esfuerzo neto, que por consiguiente es más segura. La compresión uniforme en V se suma a la compresión debida a la flexión en V originando un esfuerzo total de compresión más elevado. Si el material es más resistente en compresión que en tracción como el hierro fundido el efecto del esfuerzo de compresión debido a N es un reforzamiento del diente. Como el esfuerzo uniforme de compresión es pequeño comparado con el esfuerzo de flexión su efecto sobre la resistencia del diente se suele omitir en los cálculos.

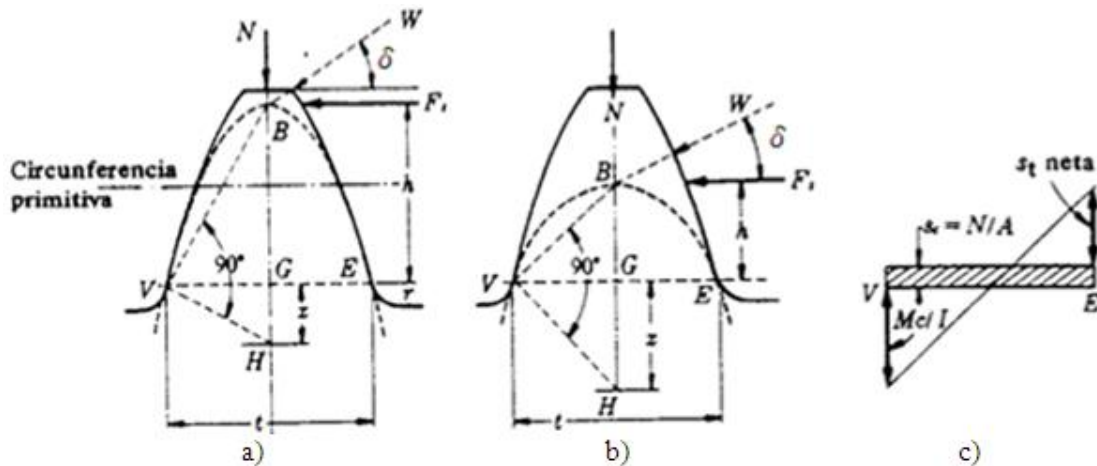


Figura 2.13 fuerzas que actúan sobre un diente[21].

Actuando F sobre B con un brazo de palanca h , el momento flector en la sección VE es $M=Fh$. Con la anchura de la cara b el modulo de flexión de la sección rectangular en VE es $Z = \frac{bt^2}{6}$. Siendo $M=sZ$ [21].

$$Fh = s \frac{bt^2}{6} \quad (2.16)$$

Las dimensiones h y t se pueden reemplazar utilizando la proporción $\frac{2x}{t} = \frac{t}{2h}$ por los triángulos semejantes BVG y GVH de lados correspondientes perpendiculares en donde se obtiene $h = \frac{t^2}{4x}$, por lo que reemplazando h en la ecuación 2.13 se obtiene:

$$F = sb \frac{2x}{3} \quad (2.17)$$

Al multiplicar y dividir el la ecuación anterior por el paso diametral (P) se llega a la ecuación 2.15:

$$F = \frac{sb}{P} \left(\frac{2xP}{3} \right) \quad (2.18)$$

El parámetro $\left(\frac{2xP}{3} \right)$ depende de la forma del diente y del punto de aplicación de la carga. Se denomina factor de forma de Lewis y se le designa por Y por lo que $Y = \left(\frac{2xP}{3} \right)$ sustituyendo a Y en la ecuación 2.15 se obtiene la ecuación de Lewis.

$$F = \frac{sbY}{P} \quad (2.19)$$

$$F = sbp_c y$$

Si consideramos que $P = \frac{\pi}{p_c}$ [19, 21], $Y = \pi y$, y es el factor de forma utilizado con el paso circular. En la tabla 2.3 se muestran los valores de Y ya que los dientes tallados tienen un paso diametral normalizado.

Tabla 2.3 Valores del factor de forma Y en la ecuación de Lewis [21].

Núm. de dientes	Carga en la punta			Carga cerca del centro		Núm. de dientes	Carga en la punta			Carga cerca del centro	
	14.5° FD	20° FD	20° Corto	14.5° FD	20° FD		14.5° FD	20° FD	20° Corto	14.5° FD	20° FD
10	0.176	0.201	0.261			32	0.322	0.364	0.443	0.547	0.617
11	0.192	0.226	0.289			33	0.324	0.367	0.445	0.55	0.623
12	0.21	0.245	0.311	0.355	0.415	35	0.327	0.373	0.449	0.556	0.633
13	0.223	0.264	0.324	0.377	0.443	37	0.33	0.38	0.454	0.563	0.645
14	0.236	0.276	0.339	0.399	0.468	39	0.335	0.386	0.457	0.568	0.655
15	0.245	0.289	0.49	0.415	0.49	40	0.336	0.389	0.459	0.57	0.659
16	0.255	0.295	0.36	0.43	0.503	45	0.34	0.399	0.468	0.579	0.678
17	0.264	0.302	0.368	0.446	0.512	50	0.346	0.408	0.474	0.588	0.694
18	0.27	0.308	0.377	0.459	0.522	55	0.352	0.415	0.48	0.596	0.704
19	0.277	0.314	0.386	0.471	0.534	60	0.355	0.421	0.484	0.603	0.713
20	0.283	0.32	0.393	0.481	0.544	65	0.358	0.425	0.488	0.607	0.721
21	0.289	0.326	0.399	0.49	0.553	70	0.36	0.429	0.493	0.61	0.728
22	0.292	0.33	0.404	0.496	0.559	75	0.361	0.433	0.496	0.613	0.735
23	0.296	0.333	0.408	0.502	0.565	80	0.363	0.436	0.499	0.615	0.739
24	0.302	0.337	0.411	0.509	0.572	90	0.366	0.442	0.503	0.619	0.747
25	0.305	0.34	0.416	0.515	0.58	100	0.368	0.446	0.506	0.622	0.755
26	0.308	0.344	0.421	0.522	0.588	150	0.75	0.458	0.518	0.635	0.779
27	0.311	0.348	0.426	0.528	0.592	200	0.378	0.463	0.524	0.64	0.787
28	0.314	0.352	0.43	0.534	0.597	300	0.382	0.471	0.534	0.65	0.801
29	0.316	0.355	0.434	0.537	0.602	crema- llera	0.39	0.484	0.55	0.66	0.823
30	0.318	0.358	0.437	0.54	0.606						

FD= altura completa

Para trabajar con las ecuaciones anteriores se deben considerar las siguientes unidades: F , libras; s , libras por pulgada cuadrada (psi); b , pulgadas; P , pulgadas, Y e y sin dimensión.

Si desea trabajar con unidades métricas la ecuación de Lewis queda expresada [21]:

$$F = sbYM \tag{2.20}$$

$$F = sbp_c y$$

Donde $M = \frac{p_c}{\pi}$ e $Y = \pi y$, debiendo considerar las siguientes unidades en estas ecuaciones: F , kilogramos; s , kg/cm²; b , M , p_c , en centímetros.

Concentración de esfuerzos

Ya que hay un ángulo entrante en el fondo de los dientes, donde el perfil se une a la parte inferior de los mismos existe una concentración de esfuerzos, los cuales no se toman en cuenta en la ecuación original de Lewis. El valor de coeficiente teórico de

concentración de esfuerzos K depende de la posición del punto de contacto como se muestra en la Figura 2.14[21].



Figura 2.14 Concentración de esfuerzos en dientes de engranes[21].

Por medio de técnicas fotoelásticas, se halló que $1.345 < K < 1.47$ en el lado de tracción y hasta $K = 1.61$ en el lado de compresión [21]. Cabe mencionar que los coeficientes que se usan son estimaciones de los valores verdaderos.

Las ecuaciones 2.18 se basan en los modelos propuestos por Dolan y Brogamer de acuerdo con sus estudios fotoelásticos[21]:

$$K = 0.22 + \left(\frac{t}{r}\right)^{0.2} \left(\frac{t}{h}\right)^{0.4} \quad \text{para } 14\frac{1}{2}^\circ \quad (2.21)$$

$$K = 0.18 + \left(\frac{t}{r}\right)^{0.2} \left(\frac{t}{h}\right)^{0.4} \quad \text{para } 20^\circ$$

donde:

r es el radio mínimo de la concavidad de enlace.

h es la altura de actuación de la carga sobre la sección VE .

t es espesor del diente en la sección VE .

Si agregamos el coeficiente K en la ecuación de Lewis se convierte en[21]:

Para unidades métricas:

$$F = \frac{sbYM}{K} \quad (2.22)$$

Para unidades inglesas:

$$F = \frac{sbY}{KP}$$

Cuando la carga actúa sobre la punta del diente no es necesario coeficiente K alguno, cuando el valor de Y se elige para carga en la parte central del diente debe ser incluido K . Cabe mencionar que si dos engranes son del mismo material el diente del piñón más débil $Y_{\text{piñon}} < Y_{\text{engrane}}$.

Capítulo 3. Diseño de Persianas Inteligentes empleando materiales con memoria de forma (MMF).

3.1.-Diseño conceptual.

En la actualidad la innovación de materiales así como el mejoramiento de los ya existentes desempeñan un papel muy importante en la creación o en la renovación de diseños. Es por esta razón que hay una constante búsqueda de nuevos materiales que tengan mejores propiedades que los comúnmente empleados hasta ahora. Dentro de estos nuevos materiales se encuentran los MMF o “materiales inteligentes” que tienen características únicas que pueden ser aprovechadas en muchas aplicaciones; sin embargo son pocas las áreas en donde los resultados de dichos diseños son rentables, debido principalmente a que estas aleaciones presentan alta anisotropía mecánica y son dependientes de la temperatura. Dentro de las aplicaciones más frecuentemente usadas se encuentran actuadores y dispositivos del área medico dental.

Esta necesidad de encontrar diseños rentables y diferentes fue la que llevo al Laboratorio de Mecánica Aplicada del Centro Tecnológico Aragón a realizar diferentes diseños. Dentro de ellos se encuentra el diseño funcional denominado “Persianas inteligentes”.

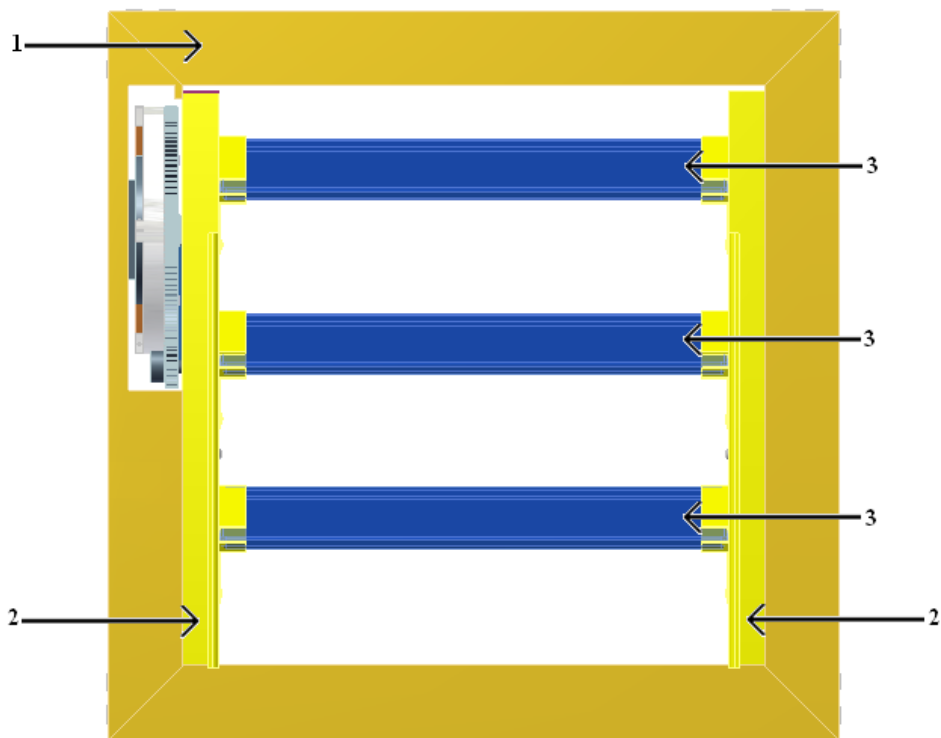
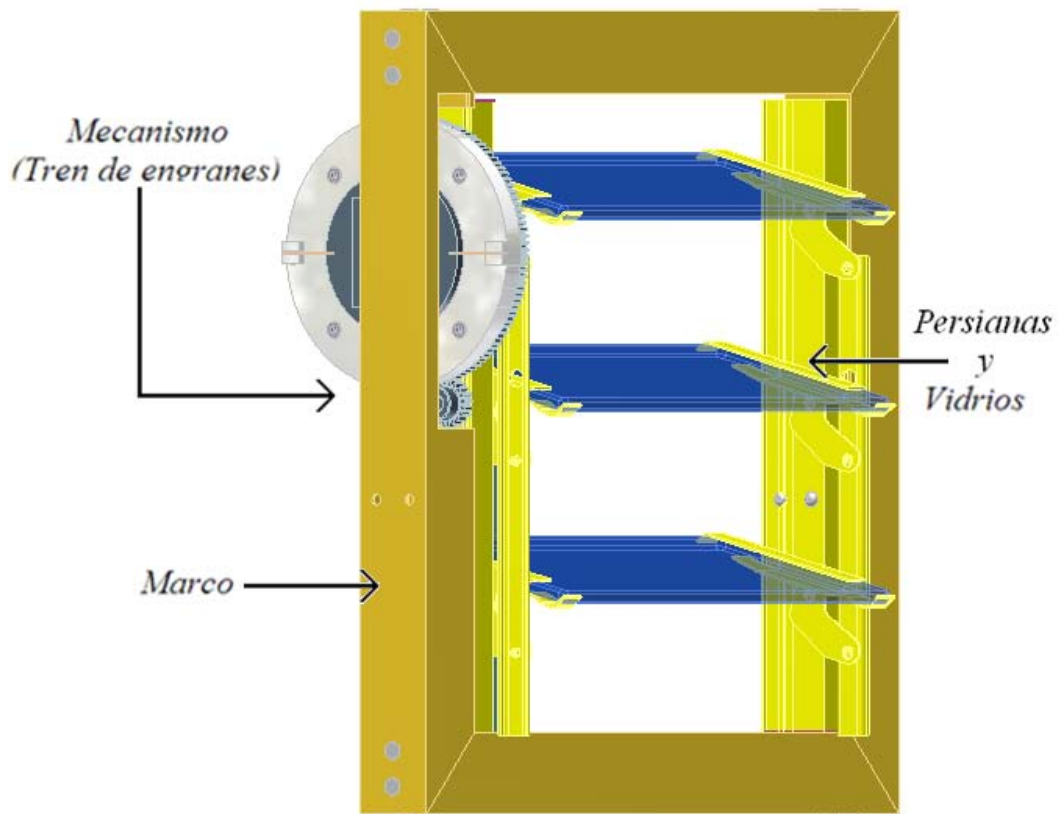
Las llamadas persianas inteligentes son dispositivos que a diferencia de las persianas convencionales realiza la operación de apertura y cierre de manera automática cuando la temperatura del ambiente alcanza ciertos valores críticos.

Desde luego existen muchas formas de construir persianas que presenten el comportamiento que se acaba de mencionar. Quizá, la forma más común consiste en diseñar un sistema compuesto por un sensor de temperatura acoplado a una tarjeta de control que acciona un motor que realiza las acciones de apertura y cierre a dos temperaturas preestablecidas. Dicho método corresponde con un sistema de control automatizado clásico, compuesto por un elemento sensor, una etapa de procesamiento de la señal y un elemento actuador.

En el caso de las persianas inteligentes que se propone en el presente trabajo, las etapas de la automatización se realizan empleando un elemento mecánico fabricado con un material con memoria de forma el cual trabaja como sensor y actuador a la vez.

La Figura 3.1 a) se presenta de manera general el arreglo propuesto para persianas inteligentes, con dos vistas de su mecanismo de transmisión mostrada en la Figura 3.1 b), posteriormente en la tabla 3.1 se presenta un listado de los componentes fundamentales que constituyen las “Persianas Inteligentes”.

Las dimensiones de cada una de las piezas así como los sub-ensambles y el ensamble completo del diseño se encuentran en el apéndice I.



a)

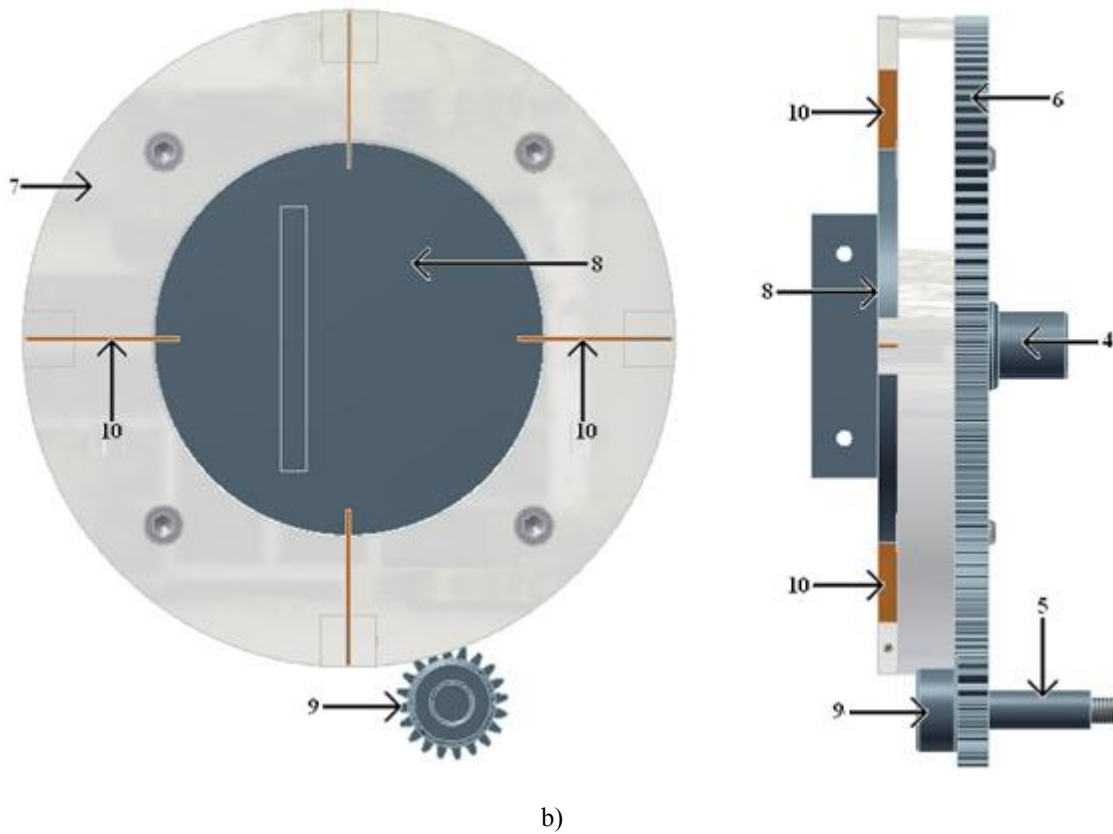


Figura 3.1.- a) Diagrama general de persianas inteligentes y b) el mecanismo de transmisión.

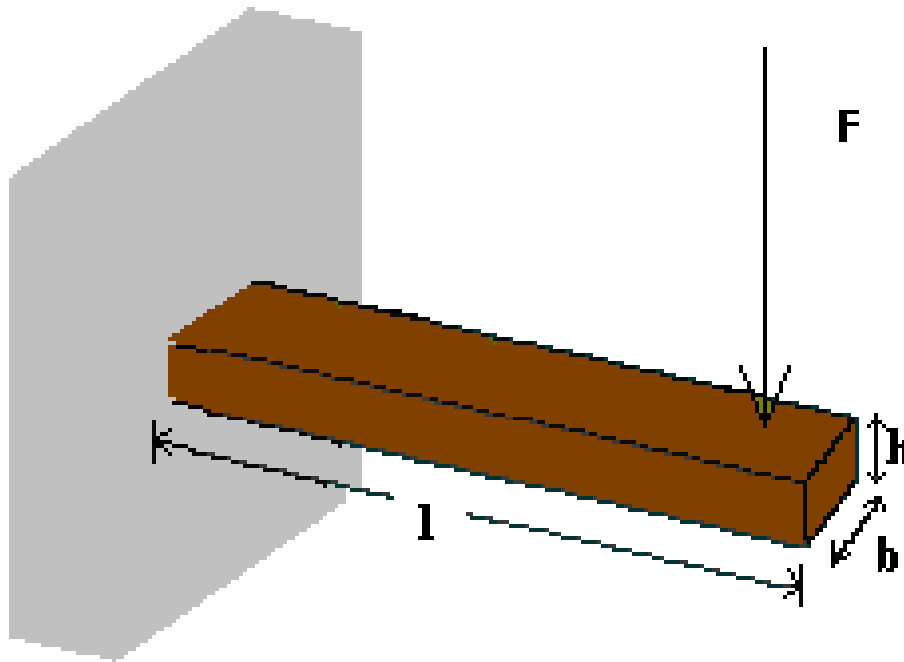
Tabla 3.1.- Listado de componentes de las persianas inteligentes.

Componentes		
Numero de parte	Descripción	Cantidad
Mecanismo de las Persianas		
1	Marco	1
2	Mecanismo para Persianas	1
3	Vidrios	3
Mecanismo de Transmisión		
4	Eje de empotramiento	1
5	Eje rotacional (eslabón de transferencia)	1
6	Engrane (de la carcasa)	1
7	Carcasa	1
8	Porta laminas	1
9	Piñón (engrane del eslabón de transferencia)	1
10	Laminas de MMF (Cu-Al-Be)	4

3.1.1.- Descripción del funcionamiento de las Persianas Inteligentes.

El diseño de las persianas inteligentes consta de tres partes medulares: El mecanismo de las persianas, el mecanismo de transmisión y el elemento con memoria de forma (MMF). Las cuales son configurados para un su funcionamiento.

El elemento inteligente es básicamente 4 placas de un material con memoria de forma en un arreglo de viga en cantiléver sujeta a una carga en su extremo libre, como se muestra en la figura 3.2.



3.2.- Viga en cantiléver sujeta a flexión.

La principal variante del diseño de persianas propuesto, respecto a las convencionales, es el mecanismo transmisión añadido al marco, formado por las partes 4, 5, 6, 7, 8 y 9 que se muestra en detalle en la figura 3.1(b), pero los elementos 5, 6, 7, y 9 son los componentes del mecanismo que transfiere el peso de los vidrios a las placas de SMA (10).

El piñón se junta al eje rotatorio de los vidrios a través del eslabón de transferencia y el engrane a una carcasa móvil con un rodamiento el cual le permite el giro en el eje de empotramiento, ambos engranes están directamente conectados mediante un tren de engranes. En la figura 3.3 se muestra de forma general como se acopla dicho mecanismo al marco.

Otra variante del diseño original fue la inversión de la dirección del giro de los vidrios lo cual permite obtener la carga que se requiere aplicar a las placas con memoria de forma.

Sin embargo el sistema resultante es considerablemente más simple que el que se emplearía en un sistema de automatización convencional.

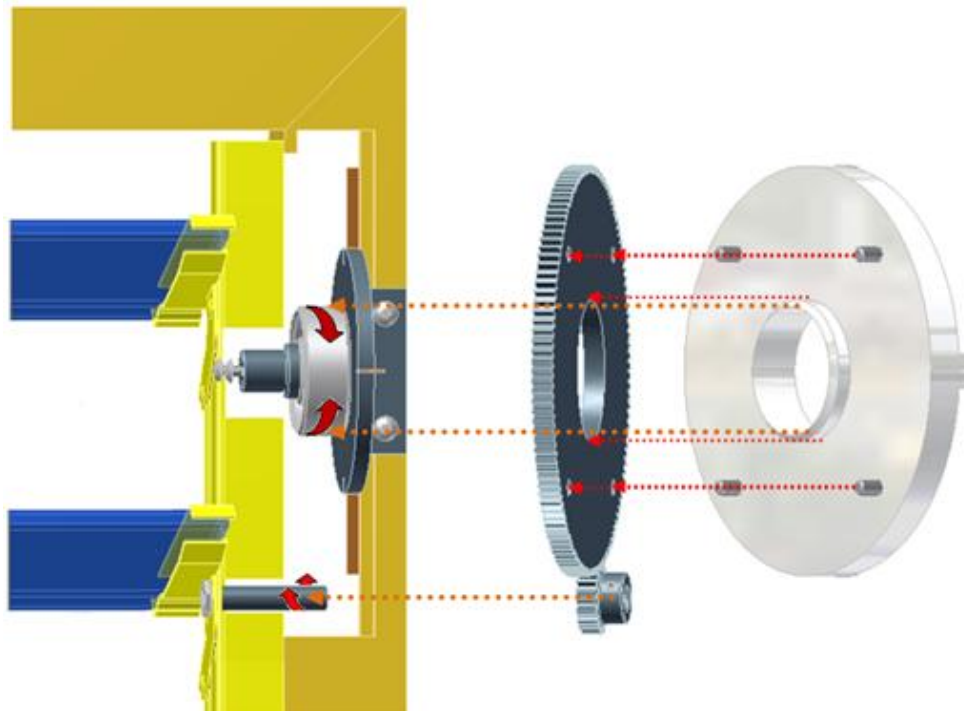


Figura 3.3.- Acoplamiento general del mecanismo de transmisión de las persianas inteligentes

El funcionamiento de las persianas inteligentes se demuestra la figura 3.4 y trabaja de la siguiente manera:

El peso de los vidrios genera un momento que se aplica en el eje de rotacional (5) y al engrane de transferencia (piñón). El momento, es transferido por el piñón (9) al engrane mayor (6) acoplado al eje de empotramiento (4) que se sostiene a la cáscara (7). Finalmente, el momento transmitido induce una carga que se aplica a las placas de SMA (10) ocasionando una deflexión en ellas. Un aspecto importante es que el esfuerzo máximo aplicado a las láminas, debe ser menor a 100Mpa ya que el esfuerzo de cedencia del material en fase martensítica es de ese orden, según se reporta en la literatura [27]. Cabe mencionar que, la magnitud de la carga aplicada sobre las láminas no es constante ya que varía con la posición de los vidrios. Durante el calentamiento, al inicio de la apertura de los vidrios, se presenta la carga mínima mientras e incrementa conforme progresa la apertura.

Es claro que la operación de las persianas consiste en la apertura y/o cierre de los vidrios al enfriar y/o calentar las láminas respectivamente, aprovechando el efecto superelástico de los materiales con memoria de forma.

Cuando la temperatura del ambiente se encuentra por debajo de la temperatura crítica M_s , las laminas de MMF se encuentra en fase martensítica y el desplazamiento debido a la carga es suficiente para es suficiente para mantener cerrada las persianas (figura 3.4a).

Cuando la temperatura incrementa por encima de la temperatura crítica del material A_f , la deflexión de las placas se restituirá debido a una transformación que ocurre en las láminas de MMF (martensita→austenita). Como resultado de la transformación austenítica, esto lleva un aumento de la rigidez del material arrastrando la carga aplicada produciendo en las placas un desplazamiento, considerablemente menor a la que presentaba entrando en fase martensítica que produce el efecto de mantener abiertas las persianas como se muestra en la figura 3.4b.

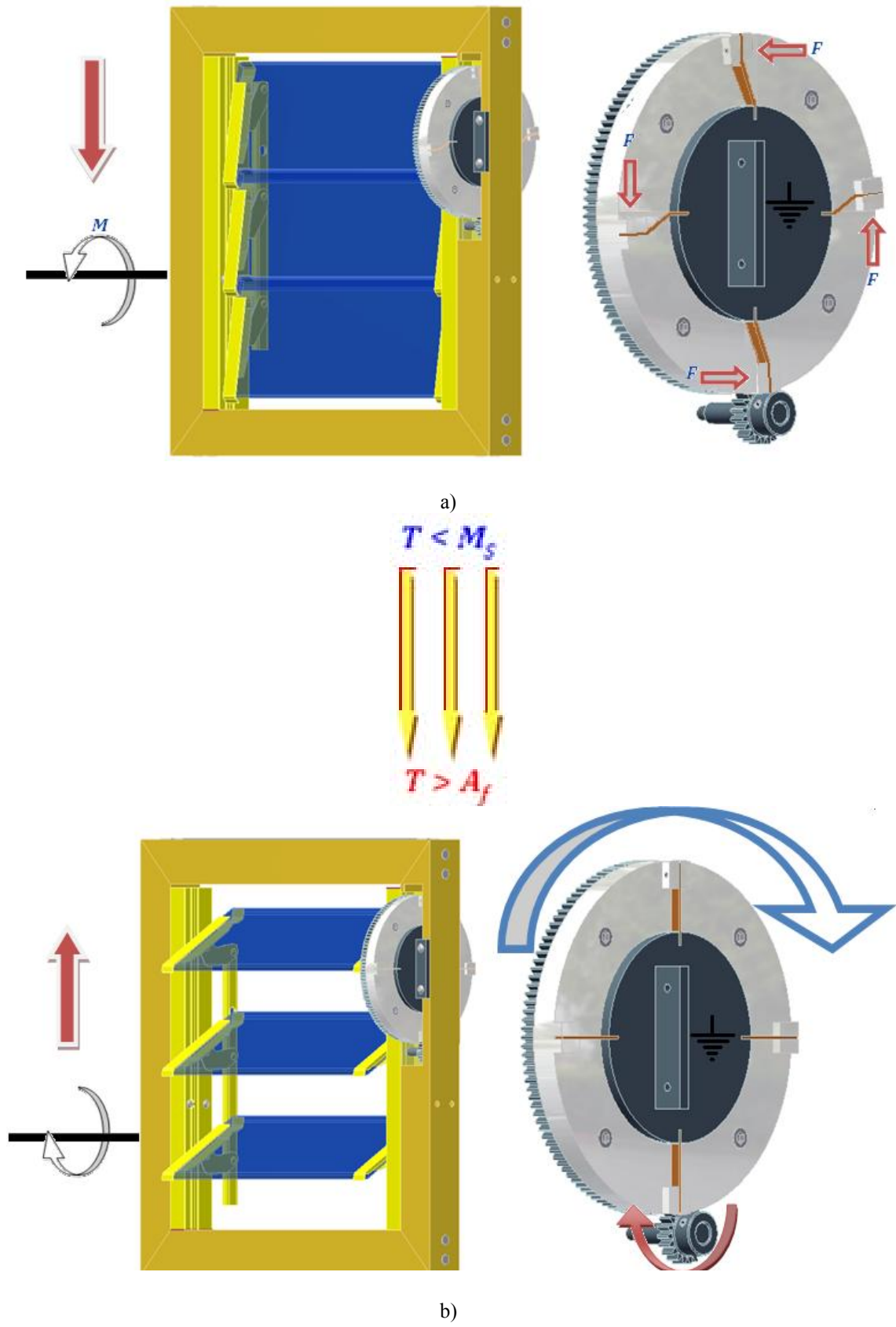


Figura 3.4.- Esquema general del funcionamiento de las Persianas Inteligentes.

A continuación se presenta una descripción detallada de cada una de los componentes las que forman las partes medulares del diseño mostradas en la tabla 3.1 así como la función de cada uno de ellos.

3.1.2- Mecanismo de las Persianas

Marco

El marco cumple la función de sostener y mantener con firmeza las persianas tratando de simular un empotramiento, así mismo soporta y fija el mecanismo de transmisión.

Se tomó en cuenta un marco pequeño debido a que es un prototipo para la realización de pruebas y sus dimensiones se ajustaron a las medidas de los mecanismos utilizados en persianas convencionales. Consta de un perfil cuadrado aluminio de 1½ pulgadas ya que es de gran facilidad encontrarlo en el mercado.

La geometría del marco y sus dimensiones se muestran en la figura 3.5.

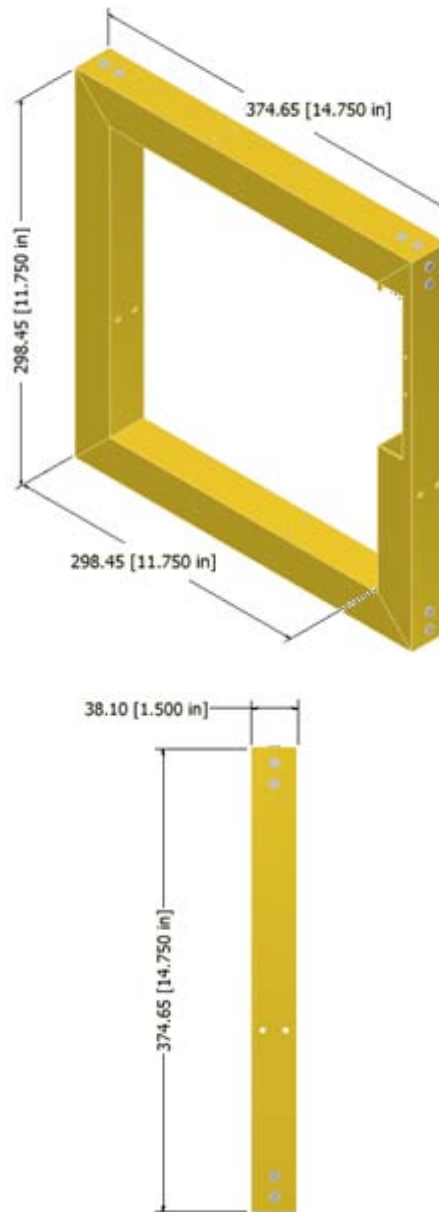


Figura 3.5.- Marco

Mecanismo de Persiana

El mecanismo de la persiana es un equipo común que se puede encontrar en cualquier casa o edificio cuyo objetivo principal es controlar la ventilación.

Una variante del diseño original de las persianas fue la inversión de la dirección del giro de los vidrios lo cual permite obtener la carga que se requiere aplicar a las placas con memoria de forma.

Consta de un par de soportes de persianas, 3 pares de porta persianas para tres vidrios y dos guías. La distancia entre soportes es para un cristal de aproximadamente 10.5 pulgadas de longitud. En la figura 3.6 se muestran las principales partes de este mecanismo.

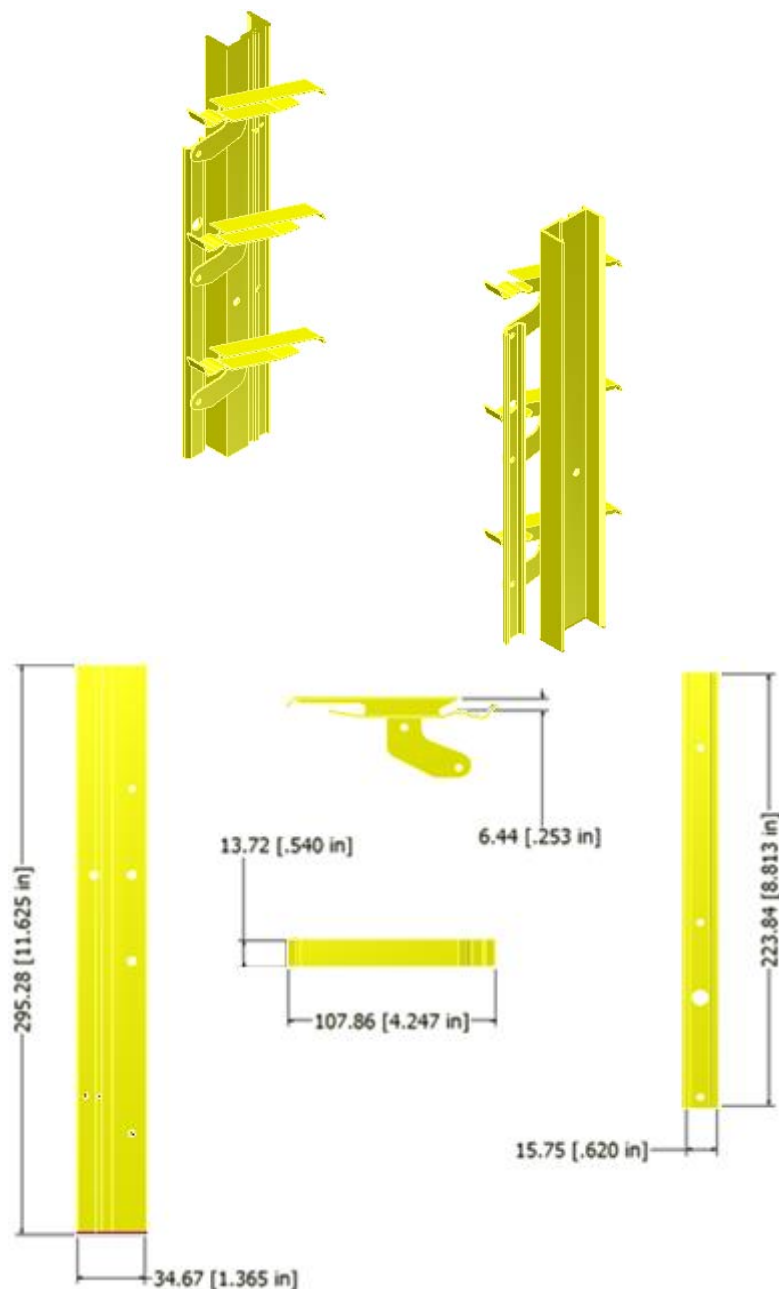


Figura 3.6.- Mecanismo de persiana

Cristal

En este diseño a comparación de las persianas tradicionales los cristales además de permitir la ventilación cumplen una función muy importante ya que el peso de los mismos es trasladado a través del mecanismo de transmisión a las láminas de MMF aplicando una carga en ellas.

Consta de 3 vidrios rectangulares para persianas con medidas de 10.23 pulgadas de largo x de 4 pulgadas ancho y 0,25 pulgadas de espesor. Con una masa de aproximadamente 0.813 libras. En la figura 3.7 se muestra la geometría y las dimensiones del cristal.

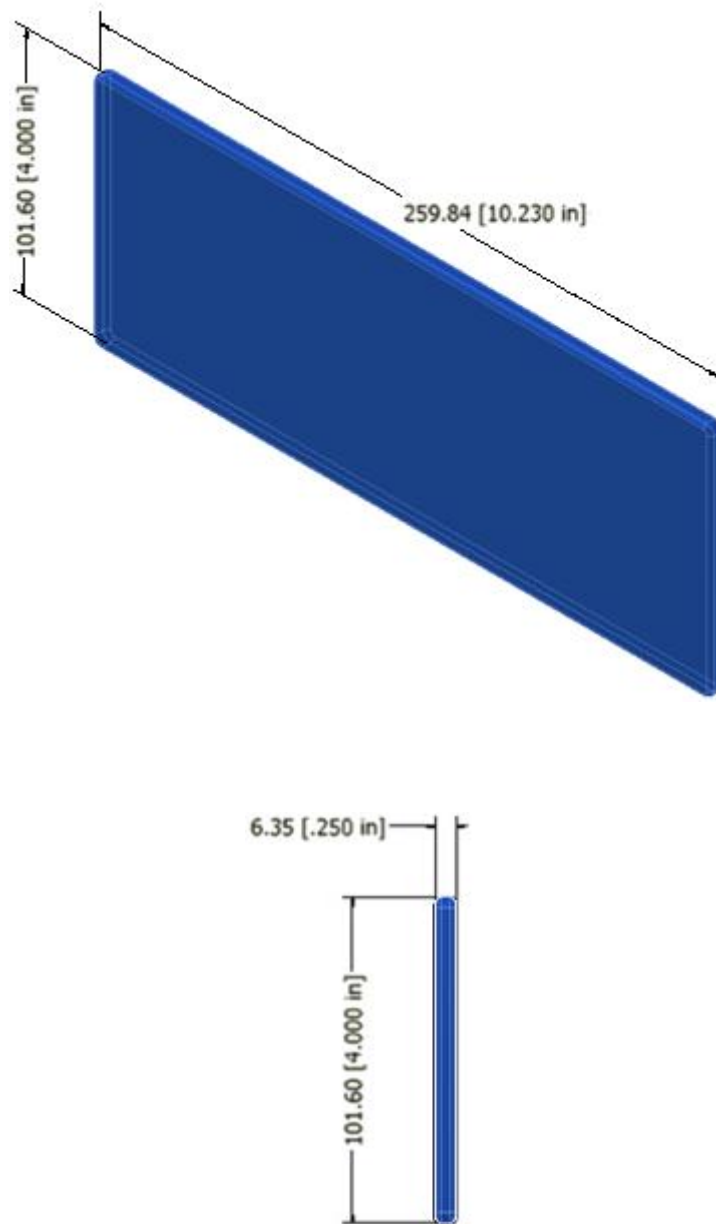


Figura 3.7.- Cristal

3.1.3.- Mecanismo de transmisión

A continuación se describe de una forma más detallada cada uno de los elementos que conforman este mecanismo.

Eje de empotramiento

En este eje se acopla un rodamiento en el que se monta la carcasa con el engrane mayor, y el porta laminas se encuentra de manera fija ya que está unida a este eje, su función es básicamente la de sostener el rodamiento el cual le va a permitir girar al engrane con la carcasa, el porta laminas al estar montado en el eje directamente, no tiene movimiento ya que el eje fija al marco dejándolo de esta manera inmóvil. En la figura 3.8 se presenta el eje de empotramiento.



Figura 3.8.- Eje de empotramiento

Eje rotacional

El eje rotacional o eslabón de transferencia, es un eje de acero 1018; su función es la de conectar el mecanismo de las persianas con el mecanismo de transmisión, ya que está sujeto de un extremo a un porta persianas y del extremo contrario se encuentra el piñón. Por medio de de este eje se transmite el giro ocasionado por el peso de los vidrios el cual hace girar el piñón transmitiendo así el movimiento y la carga al engrane y la carcasa.

En la figura 3.9 se muestra el eje rotacional y el tamaño de dicho eslabón.

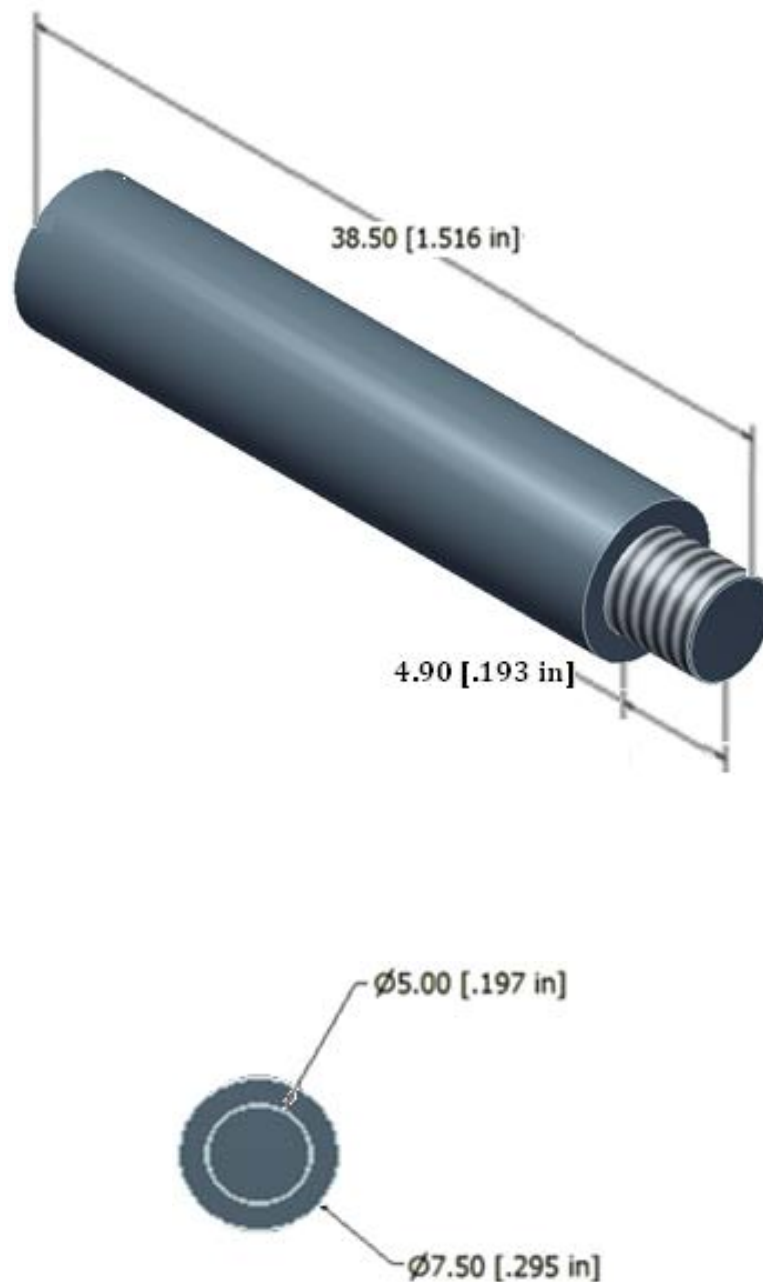


Figura 3.9.- Eslabón de transferencia

Carcasa

Este elemento está sujeto al engrane mayor, a su vez esta acoplada en el rodamiento situado en el eje de empotramiento; al estar acoplada al engrane de manera fija forma parte del tren de engranes, recibiendo así la transmisión de movimiento y carga tiene la función principal de flexionar las laminas de MMF.

En la figura 3.10 muestra la carcasa sus medidas el tamaño de su geometría.

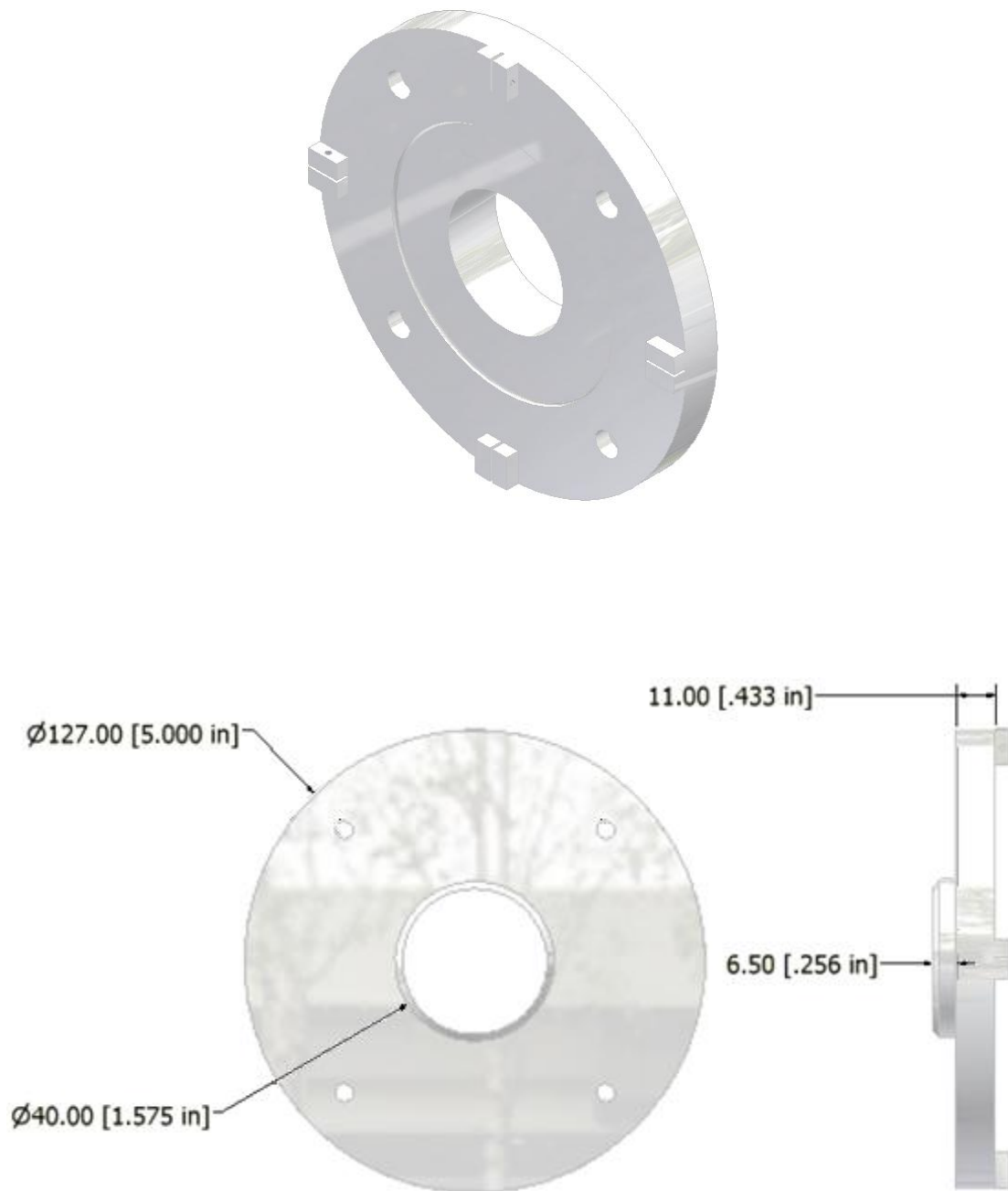


Figura 3.10.- Carcasa

Porta laminas

La función de este elemento es la de sostener de forma fija a las cuatro laminas de MMF, va unida de forma fija el extremo eje de empotramiento.

La figura 3.11 muestra de forma clara la posición del portaláminas dentro del eje de empotramiento.

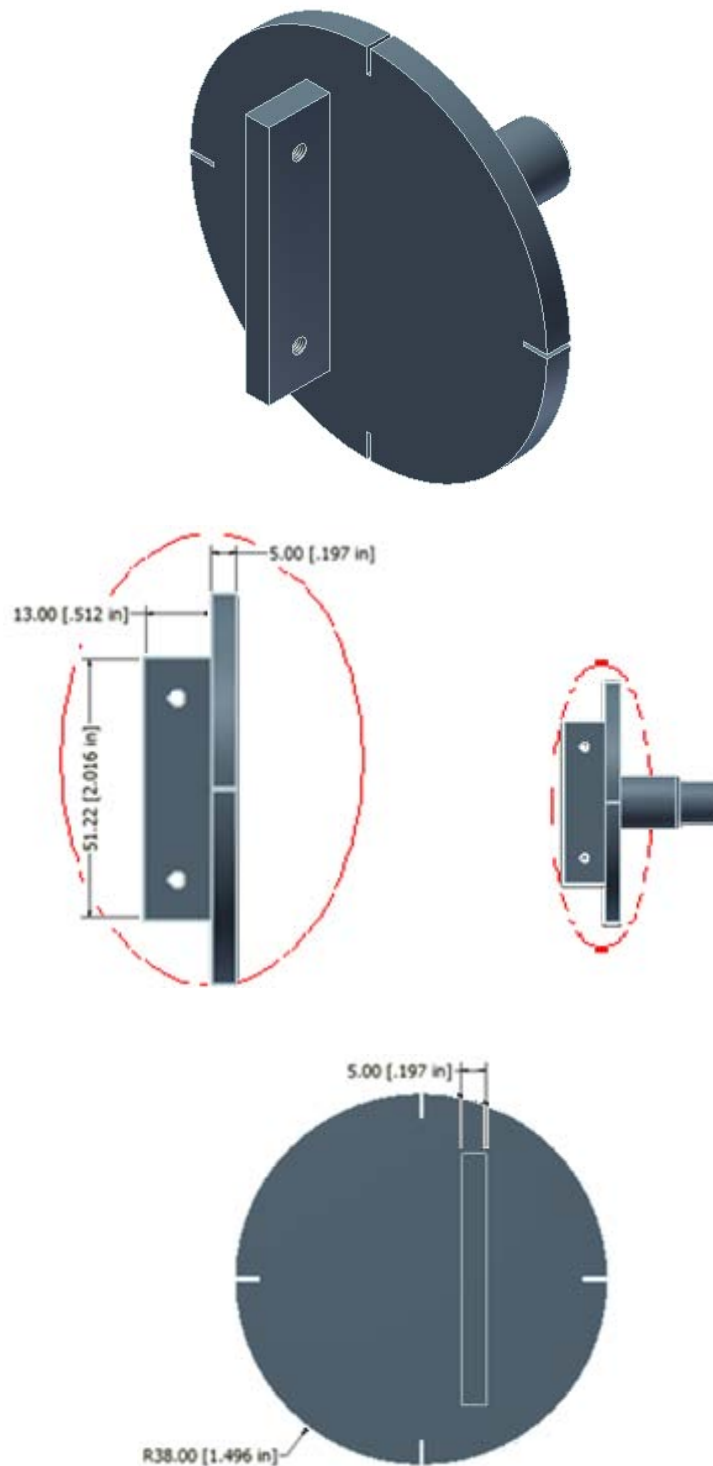


Figura 3.11.- Porta láminas y su posición en el eje de empotramiento

Engrane

Se utilizó un engrane de acero 1018, del tipo de engranes rectos, ya que de acuerdo con las características de los engranes situadas en el capítulo 2, el engrane recto es el que se adapta más a las necesidades del diseño pues se está trabajando con ejes paralelos.

El engrane de la carcasa es el mayor en el mecanismo de transmisión; en él se acopla la carcasa. Por medio de este se transmite la carga que flexiona a las laminas de MMF, ya que al estar la carcasa acoplada al rodamiento permite la transmisión de carga y movimiento convirtiéndose en un tren de engranes.

En la figura 3.12 se presenta el engrane y sus dimensiones de forma general.

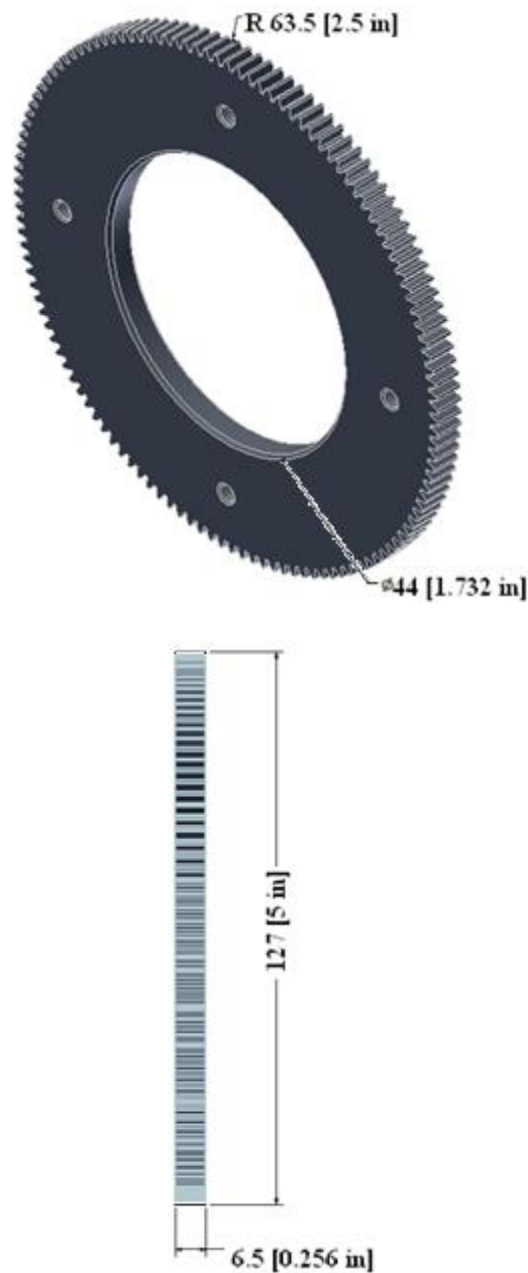


Figura 3.12.- Engrane mayor

Piñón

El piñón es el engrane menor en el mecanismo de transmisión; se trabaja con un engrane recto de acero 1018, ubicado en el eje rotacional.

Por medio del giro del eslabón de transferencia el piñón se encarga de transmitir la carga y el movimiento al engrane y la carcasa para lograr una flexión en las laminas de MMF.

En la figura 3.13 se muestra la forma del piñón, así como sus dimensiones de forma general.

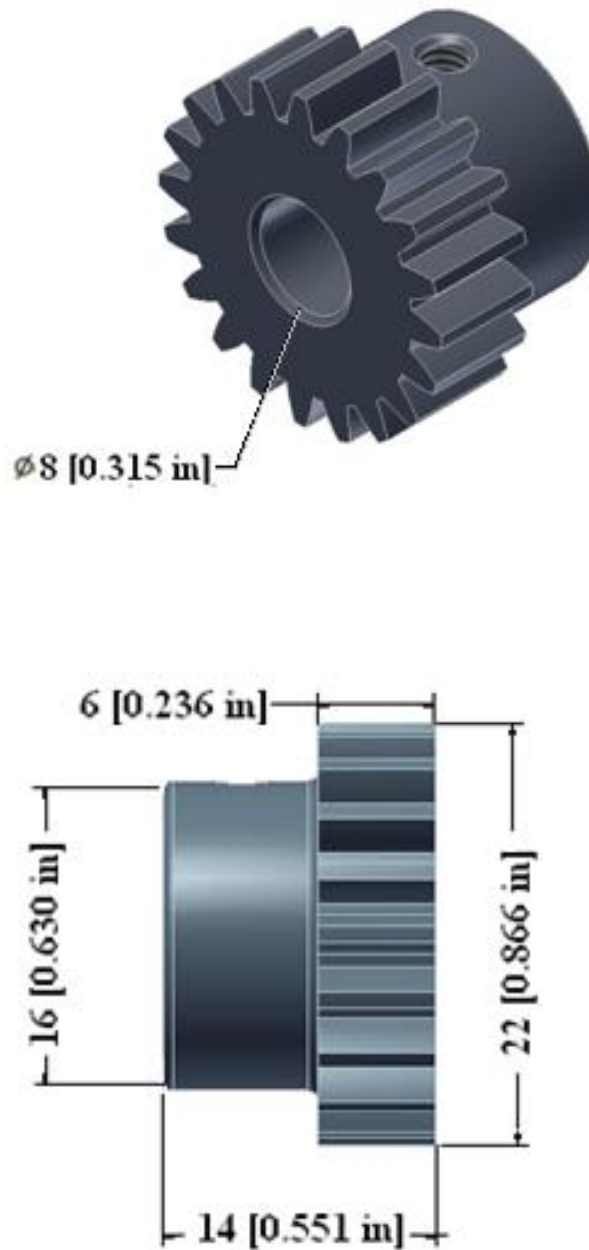


Figura 3.13.- Engrane y arreglo engrane-piñón.

3.1.4.- Láminas de MMF.

En la configuración que se propone en el presente trabajo, los elementos con memoria de forma son básicamente cuatro placas rectangulares de Cu-Al-Be en un arreglo tipo viga cantiléver sujeto a una carga en su extremo libre, en la figura 3.14 se muestra las dimensiones de dicha lámina así como el arreglo de las 4 placas de MMF ubicadas en el porta láminas y enseguida se presenta una tabla con sus medidas y propiedades.

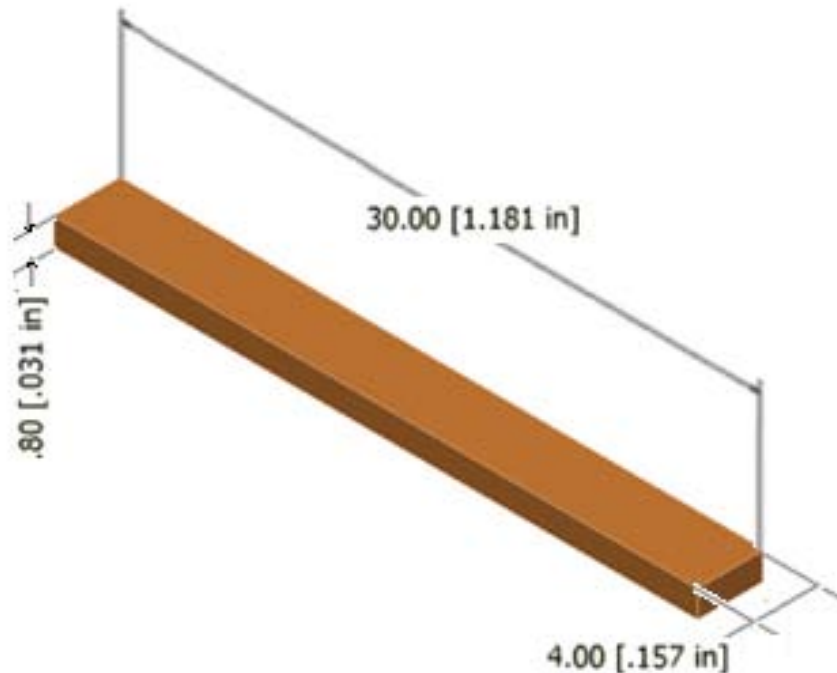


Figura 3.14.- Arreglo de una viga en cantiléver sujeta a flexión.

Tabla 3.2.- Características de las láminas de MMF

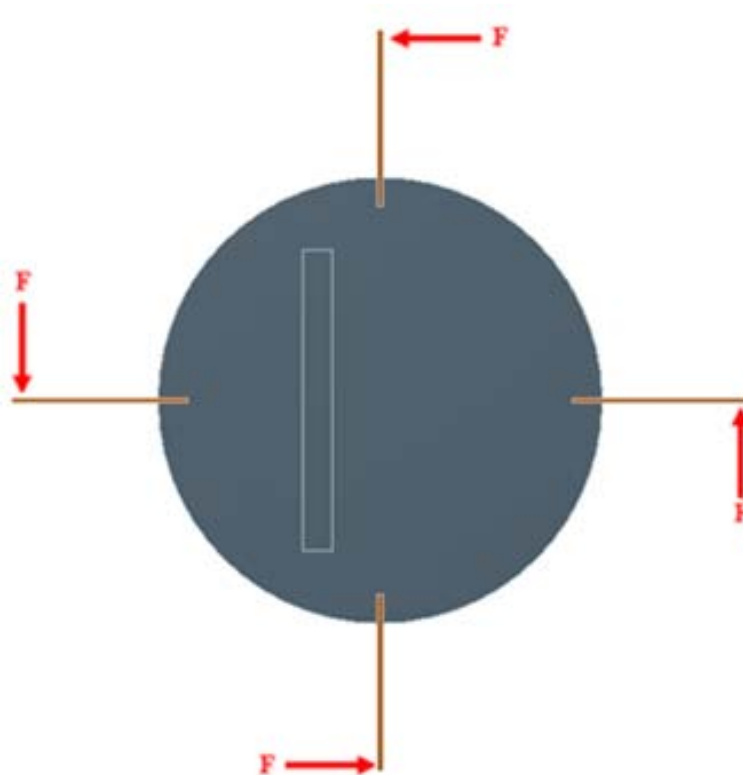
Aleación de memoria de forma	Cu-Al-Be	
No. de laminas	4	
Porcentajes	Cu (%)	87.5
	Al (%)	12
	Be (%)	0.5
Dimensiones	b (m)	0.004
	h (m)	0.0008
	l (m)	0.03
Modulo elástico	E_A (Gpa)	9.5
	E_M (Gpa)	4
Temperatura de transformación	A_S (°C)	90

Capítulo 4. Prototipo de las Persianas Inteligentes.

4.1 Modelo matemático.

Es claro que las persianas inteligentes diseñadas en el presente trabajo tienen como parte principal el arreglo en cantiléver en el que se encuentran las placas de MMF, ya que estas al ser sometidas a carga debida al peso de los vidrios por medio del mecanismo permite el movimiento al aplicar calentamiento. Es fácil ver que el desplazamiento es proporcional a la rotación de los vidrios, por tanto, el efecto de apertura-cierre de las persianas lo es también. Es por ello que la predicción del comportamiento mecánico de este arreglo es la parte medular del diseño; es decir fue necesario encontrar una relación matemática para calcular el desplazamiento de las placas.

En la figura 4.1 se aprecia el empotramiento de las cuatro láminas de MMF utilizadas en el diseño.



4.1.- Arreglo de placas de MMF en el portaláminas.

Primeramente se emplea la “ecuación de la elástica típica” modificada para una mezcla propiedades elásticas que representa la transformación de la martensita y la variación de la deflexión de las placas. Este método para calcular la deflexión de las placas de MMF

en una viga en cantiléver con una carga puntual fue propuesto por Cortes [26, 28, 31, 32] en un trabajo previo, pero para una carga constante. En este caso la carga aplicada no es constante debido a la componente tangencial de los vidrios, el peso genera un momento en el eje. Como se puede ver en la figura 4.1 de la carga aplicada en las placas de MMF es dependiente el desplazamiento. Entonces la típica “ecuación de la elástica” para a una viga en cantiléver con una carga puntual, corregida para un material con características elásticas mezcladas, puede ser escrita como sigue:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{IE(x)} = \frac{F(v)(l-x)}{I[f_A(E_A - E_M) + E_M]} \quad (1.9)$$

Donde E_A y E_M son la primera y segunda pendientes la curva esfuerzo-deformación de una prueba de tensión simple empleando un MMF; $I = \frac{bh^3}{12}$ es el momento de inercia en las placas de MMF en su sección transversal.

$F(v)$ es la fuerza aplicada a las láminas la cual es función del desplazamiento; b , h , l y x son parámetros de las láminas mostrados en la figura 4.2.

f_A es la fracción volumétrica de austenita, como se vio anteriormente podemos expresarla:

$$f_A = \frac{V_A}{V} = \frac{b^2 h^3 \sigma_c}{6Fbh(l-x)} \quad (1.8)$$

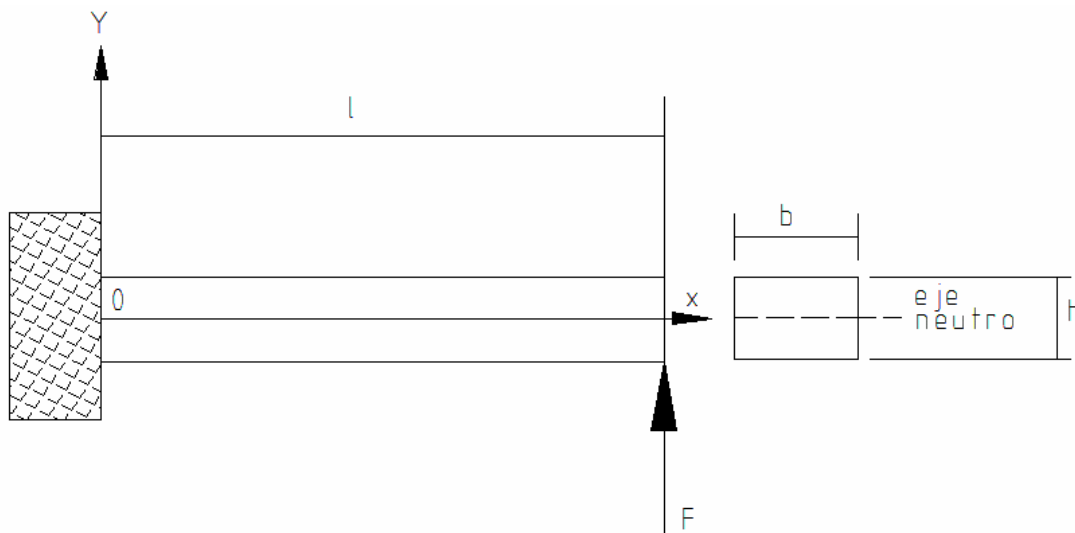


Figura 4.2 Parámetros geométricos de las laminas de MMF.

En un trabajo previo [31] fue explicado que la ecuación 1.9, se considera que el crecimiento de la fase de la martensita en la viga donde el esfuerzo normal σ_x es igual al esfuerzo crítico σ_C obtenido en una prueba de tensión simple la cual es dependiente de la temperatura se representa como sigue:

$$y = \frac{\sigma_c l}{F_s(l-x)} = \frac{bh^3 \sigma_c}{12F_s(l-x)} \quad (1.7)$$

Donde:

$$\sigma_c = R(T - M_s) \quad (4.1)$$

R es un parámetro de esfuerzo reportado en la literatura para varios MMF [1].

Por otro lado, teniendo en cuenta la variación de la carga aplicada debido a la rotación de los vidrios θ_1 , la relación de diámetro de los engranajes, las dimensiones de la carcasa y la geometría de las láminas de MMF, el parámetro cinemático puede ser expresado de la siguiente manera:

$$M_1 = W \cos(\theta_1) d_1 \quad (4.2)$$

$$\theta_1 = \frac{r_2}{r_1} \theta_2 \quad M_2 = \frac{r_2}{r_1} M_1 = F_A r_2 \quad \theta_2 = \frac{v}{l} \quad (4.3)$$

Dónde: M_1 es el momento debido al componente de peso de los vidrios, W es el peso de los vidrios, F_A es la carga aplicada en las láminas de MMF. $\theta_1, \theta_2, r_1, r_2, d_1$ son los parámetros geométricos que muestra en la figura 4.3.

Teniendo en cuenta la ecuación 1.8 y el enfoque a la función de Coseno (que es mostrado en la figura 4.3) de la siguiente manera:

$$\cos(\theta_1) = \cos\left[\frac{r_2}{lr_1} v\right] = -\frac{2r_2}{\pi lr_1} v + 1 \quad (4.4)$$

La fuerza $F(v)$ aplicada en las láminas de MMF es:

$$F(v) = F_A = \frac{1}{r_1} W \left(1 - \frac{2r_2}{\pi lr_1} v\right) d_1 \quad (4.5)$$

Entonces introduciendo la ecuación 1.8 y 4.5 en la ecuación 1.9 puede ser escrita de la siguiente manera:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{6(wd_1)^2 (l-x)^2 (\pi lr_1 - 2r_2 v)^2}{I \pi n l r_1^2 [6d_1 w (\pi lr_1 - 2r_2 v) (l-x) E_M + \pi n l r_1^2 \sigma_c b h^2 (E_A - E_M)]} \quad (4.6)$$

Donde:

n es el número de láminas de MMF utilizadas.

σ_c es el esfuerzo crítico para una prueba de tensión sencilla. Los otros parámetros se pueden ver en las figuras 4.2 y 4.3.

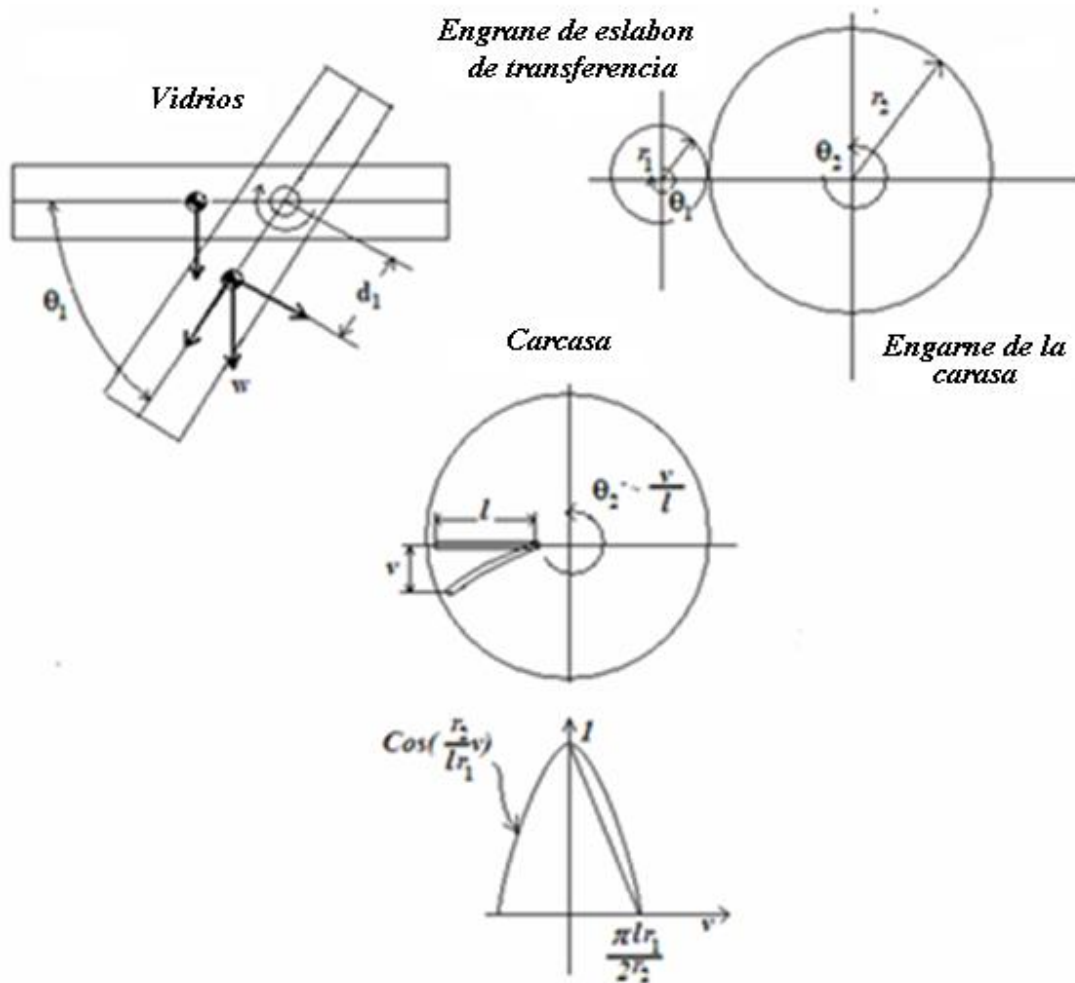


Figura 4.3.- Configuración física de las persianas inteligentes.

Es claro que la ecuación 4.6 no es lineal pero se puede solucionar por el uso de un método numérico típico como Runge Kutta.

Las ecuaciones 1.8 y 4.1 demuestran que la región donde el material transforma a la fase martensítica aumenta cuando la temperatura disminuye por lo tanto la ecuación 4.6 es válida para un intervalo: $0 \leq x \leq x_0$ donde x_0 es:

$$x_0 = l - \frac{2\sigma_c l}{hF_s} = l - \frac{bh^2\sigma_c}{6F} \quad (1.11)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, la ecuación 4.6 debe ser resuelta para dos intervalos:

- a) $0 \leq x \leq x_0$ tomando a $E_A \neq E_M$.
- b) $x_0 \leq x \leq l$ tomando a $E_A = E_M$.

De hecho, la ecuación 4.6 se debe solucionar para el punto $x=l$ para un intervalo de temperaturas de $T < M_S$ hasta $T > A_f$ de tal manera que se obtiene la relación apertura y cierre, deslizamiento-temperatura (θ_l-T). Este comportamiento es una relación apropiada de apertura-cierre que rige la operación de "Persianas Inteligentes".

Está claro que los parámetros de diseño son: las temperaturas de activación, el peso de los vidrios, las dimensiones y el número de placas de MMF para inducir a una apropiada tensión y al cociente r_1/r_2 para obtener una abertura apropiada de los vidrios y el transmitir de la carga en las placas de MMF.

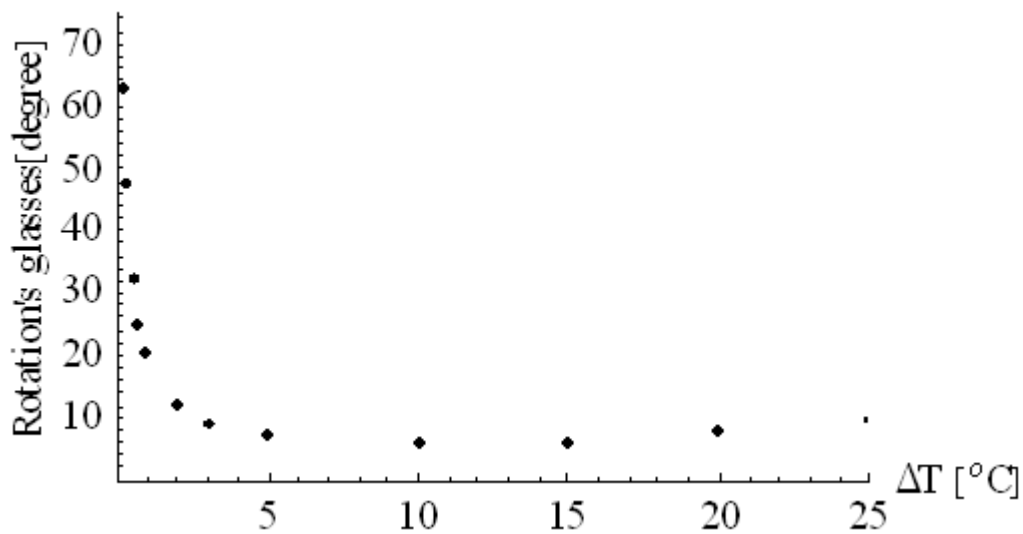


Figura 4.4.- Curva rotación de los vidrios- Temperatura obtenida por la ecuación (4.5), tomando los parámetros del diseño.

4.2 Diseño de detalle.

Una vez determinado el desplazamiento que se requiere se procede a determinar un arreglo de engranes como los mostrados en la figura 4.5, es decir el número y sus diámetros, que proporcione la amplificación requerida y que pueda ser instalado en un espacio disponible del marco.

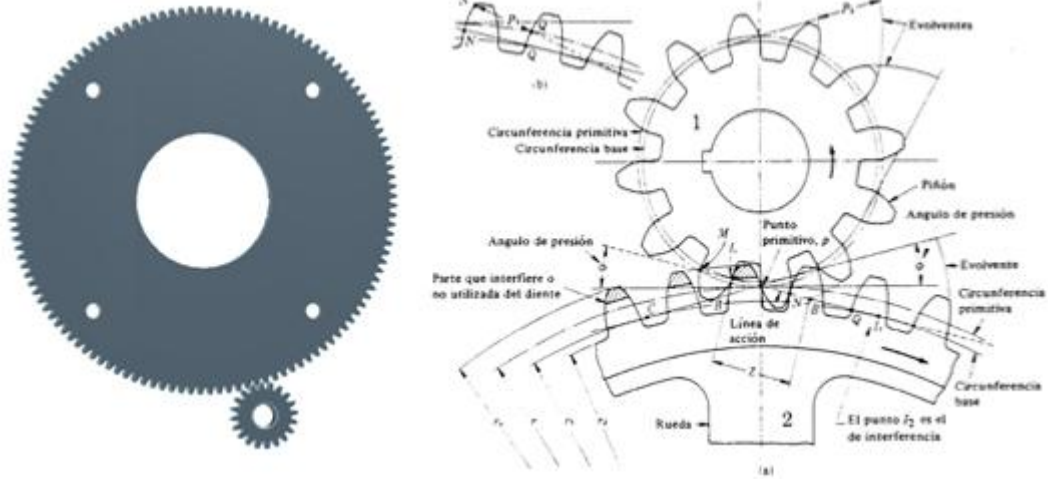


Figura 4.5.- Arreglo de engranes.

A continuación se definen las medias o características de los engranes utilizando las ecuaciones en el capítulo 2, tales como el diámetro de paso D del engrane y el piñón respectivamente:

$$D = Nm \quad (4.7)$$

Donde:

N es el numero de dientes del engrane o piñón.

m es el modulo, ya que las medidas están en el sistema métrico decimal.

Por lo tanto utilizando la ecuación 4.7 con:

$N=125$ para el engrane.

$N=20$ para el piñón

$m=1\text{mm}$ para ambos engranes.

$$D = (125)(1\text{mm}) = 125\text{mm}$$

$$D = (20)(1\text{mm}) = 20\text{mm}$$

Sabiendo el diámetro de paso se puede conocer el paso circular P_c calculado a través de la ecuación 2.7:

$$P_c = \frac{\pi D}{N} \quad (2.7)$$

$$P_c = \frac{(125\text{mm})\pi}{125} = 3.14\text{mm}$$

$$P_c = \frac{(20\text{mm})\pi}{20} = 3.14\text{mm}$$

Para el caso de los engranes rectos se debe calcular el paso base P_b con la ecuación 2.13:

$$P_b = P_c \cos \delta \quad (2.13)$$

Donde:

δ es el ángulo de acción, para los engranes rectos de dientes de altura completa es de 20° lo cual corresponden a los engranes utilizados en el prototipo.

Ya que P_c y δ es igual en ambos engranes aplicado a la ecuación 2.13, entonces P_b es igual en el engrane y el piñón:

$$P_b = (3.14mm) \cos 20 = 2.9506mm$$

Para cálculos posteriores es necesario saber la medida de los diámetros o radios exterior e interior, por lo cual es indispensable calcular las medidas de addendum y dedendum, las cuales dependen del modulo m .

$$a = m \quad (4.8)$$

$$d = 1.25m \quad (4.9)$$

donde:

a es la medida de addendum y es igual al modulo m .

d es la medida de dedendum.

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} a &= 1mm \\ d &= 1.25(1mm) = 1.25mm \end{aligned}$$

Una vez determinada la medida de addendum y dedendum es posible calcular el radio exterior o radio addendum utilizando la siguiente ecuación:

$$r_a = \frac{D + 2a}{2} \quad (4.10)$$

Por lo que en el engrane el radio exterior es igual a:

$$r_a = \frac{125mm + 2(1mm)}{2} = 63.5mm$$

En el piñón el radio addendum es igual a:

$$r_a = \frac{20mm + 2(1mm)}{2} = 11mm$$

El diámetro interior o radio dedendum es menor al diámetro de paso D y esta dado por la ecuación 4.11:

$$r_d = \frac{D - 2d}{2} \quad (4.11)$$

Por lo que r_d para el engrane es:

$$r_d = \frac{125mm - 2(1.25mm)}{2} = 61.25mm$$

Entonces el radio interior para el piñón esta dado de la siguiente manera:

$$r_d = \frac{20mm - 2(1.25mm)}{2} = 8.75mm$$

Otro parámetro importante a conocer es el diámetro o radio base el cual está relacionado con el diámetro de paso y el ángulo de acción mencionados anteriormente y se calcula con la ecuación 4.12:

$$r_b = \frac{D \cos \delta}{2} \quad (4.12)$$

Teniendo todos las variables se procede a calcular r_b en el engrane y el piñón respectivamente.

$$r_b = \frac{(125mm) \cos 20}{2} = 58.73mm$$

$$r_b = \frac{(20mm) \cos 20}{2} = 9.396mm$$

Una vez determinados los principales parámetros tren de engranes es posible determinar la relación de engranaje tal como la distancia entre centros la cual está dada por la ecuación 4.13:

$$C = m \frac{N_1 + N_2}{2} \quad (4.13)$$

Donde:

N_1 y N_2 son el numero de dientes del engrane y el piñón respectivamente.

Por lo tanto:

$$C = (1mm) \frac{125 + 20}{2} = 72.5mm$$

Una vez determinada la distancia entre centros se calcula la línea de acción Z por medio de la siguiente ecuación:

$$Z = (r_{a2}^2 - r_{b2}^2)^{1/2} + (r_{a1}^2 - r_{b1}^2)^{1/2} - C \sin \delta \quad (2.11)$$

Donde:

r_1 y r_2 corresponde al radio addendum del engrane y el piñón respectivamente.

r_{b1} y r_{b2} son el radio base correspondientes al engrane y el piñón respectivamente.

Por lo que:

$$Z = (11^2 - 9.396^2)^{1/2} + (63.5^2 - 58.73^2)^{1/2} - 72.5 \sin 20 = 5.069mm$$

La razón de engrane m_y está dada por la división del número de dientes del engrane entre el número de dientes del piñón como lo indica la ecuación 2.9:

$$m_y = \frac{N_{Engrane}}{N_{Piñon}} \quad (2.9)$$

$$m_y = \frac{125}{20} = 6.25$$

Como la relación de velocidad m_ω está dada por $m_\omega = \frac{N_{conducido}}{N_{motor}}$, si en el prototipo el engrane motor es el piñón entonces podemos decir que $m_y = m_\omega$.

$$m_\omega = \frac{N_{conducido}}{N_{motor}} = \frac{N_{Engrane}}{N_{Piñon}} \quad (2.9)$$

$$m_\omega = m_y$$

$$m_\omega = \frac{125}{20} = 6.25$$

La razón de contacto m_c esta determinada por el cociente entre Z y P_b calculadas anteriormente por lo que:

$$m_c = \frac{Z}{P_c \cos \delta} = \frac{Z}{P_b} \quad (2.12)$$

$$m_c = \frac{5.069mm}{2.9506mm} = 1.7181$$

La tabla 4.1 muestra las propiedades del engrane y el piñón, así como su relación de engranaje.

Tabla 4.1 Resultados del tren de engranes

	<i>Símbolo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Engrane</i>	<i>Piñón</i>
<i>Numero de dientes</i>	N		125	20
<i>Altura del diente</i>	h	mm	2.25	2.25
<i>Anchura de la cara</i>	b	mm	6.5	6
<i>Diámetro de paso</i>	D	mm	125	20
<i>Paso circular</i>	P_c	mm	3.14	3.14
<i>Paso diametral</i>	P	mm	1	1
<i>Paso base</i>	P_b	mm	2.9506	2.9506
<i>Modulo</i>	m	mm	1	1
<i>Addendum</i>	a	mm	1	1
<i>Dedendum</i>	d	mm	1.25	1.25
<i>Radio addendum</i>	r_a	mm	63.5	11
<i>Radio dedendum</i>	r_d	mm	61.25	8.75
<i>Radio Base</i>	r_b	mm	58.73	9.396
<i>Angulo de acción</i>	δ	°	20	
<i>Relación de engranaje</i>				
<i>Distancia entre centros</i>	C	mm	72.5	
<i>Longitud de acción</i>	Z	mm	5.069	
<i>Razón de engrane</i>	m_y		6.25	
<i>Relación de velocidad</i>	m_ω		6.25	
<i>Relación de contacto</i>	m_c		1.7179	

4.3 Prototipo final y modificaciones.

En la figura 4.6 se muestra las fotografías del prototipo final de las persianas inteligentes desarrolladas en el presente trabajo. Estas presentaron el comportamiento esperado, de apertura y cierre al aplicar calentamiento. Por lo que se puede asegurar que es un dispositivo de los denominados inteligentes, ya que permite generar movimiento con un simple calentamiento. Sin embargo se pudo apreciar durante el funcionamiento algunos detalles que se pudieran cambiar para modificar su diseño. Dichas modificaciones surgieron de la idea de fabricar las persianas es serie, es decir, se tiene que tomar en cuenta la optimización de materiales.



Figura 4.6.- Fotos prototipo de las Persianas Inteligentes.

Es claro que los cambios fueron en el sentido de dejar menos robusto el diseño original, lo cual no solo optimiza el costo de su fabricación sino que también ayuda a mejorar el movimiento de apertura y cierre por ser más ligero. A continuación en la figura 4.7 se muestran unas fotografías del nuevo prototipo.



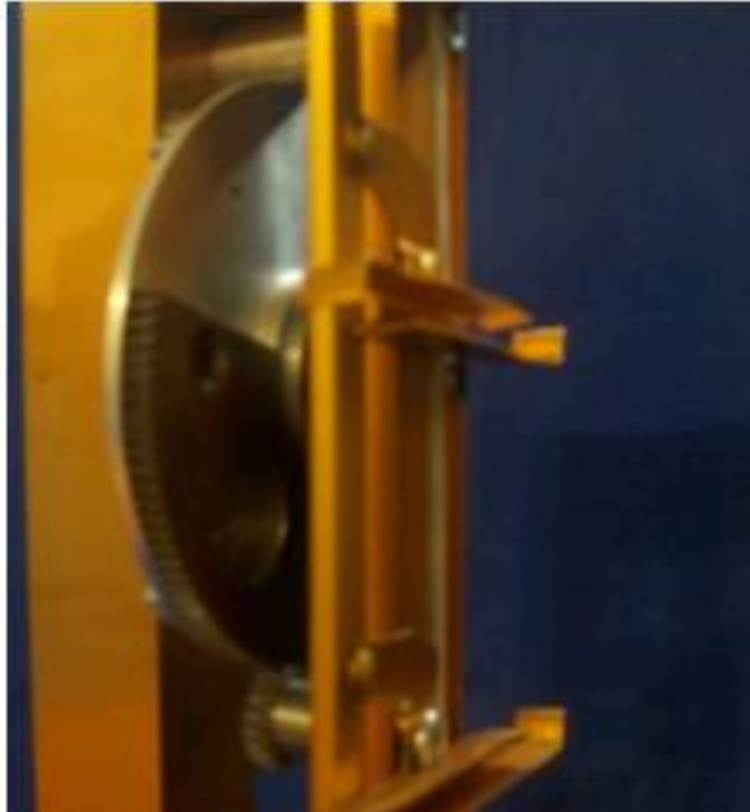
Figura 4.7.- Nuevo prototipo de PI.

Es evidente que al comparar ambos diseños se pueden apreciar los siguientes cambios en el mecanismo de transmisión:

- Se redujo el grosor de la carcasa de 11mm a 3mm. (Figura 4.8 a)
- Ya que el engrane el desplazamiento angular es corresponde 25:4, se redujo el tamaño del engrane mayor dejando solo $\frac{1}{4}$ parte, pero sin cambiar el diámetro de paso, por lo tanto el modulo y el numero de dientes tampoco cambiaron. (Figura 4.8 b)



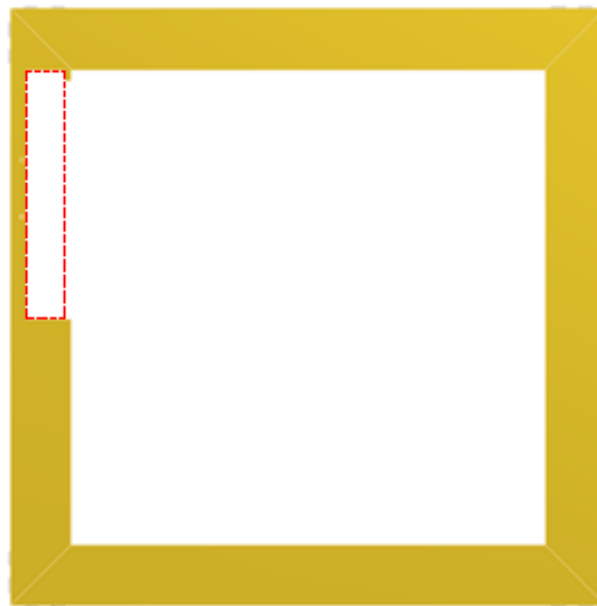
a)



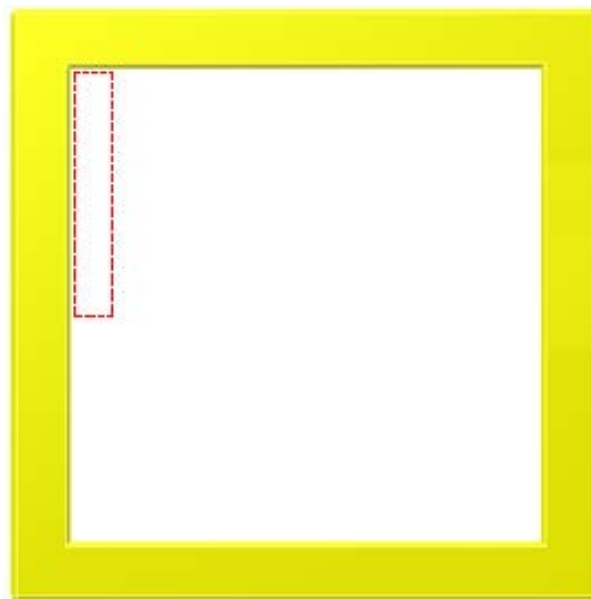
b)

Figura 4.8.- Comparativo de diseños:
Cambio en el grosor de la carcasa; b) Reducción de engrane a $\frac{1}{4}$ parte.


Debido a que estos cambios dieron como resultado un mecanismo más ligero la posición de este dentro del marco cambio, como se muestra en la figura anterior. En la figura 4.9 se aprecia la nueva posición de del mecanismo en el marco.



a)



b)

Figura 4.9.-  Posición del mecanismo de transmisión en el marco.
a) Marco primer prototipo, b) marco nuevo.

Una consecuencia de lo anterior es que debido a que el marco conserva sus medidas anteriores, es claro que debido a lo anterior la longitud de los vidrios se redujo levemente de 259.8mm a 225mm.

Conclusiones Generales

El desarrollo del presente trabajo nos permite llegar a las siguientes conclusiones:

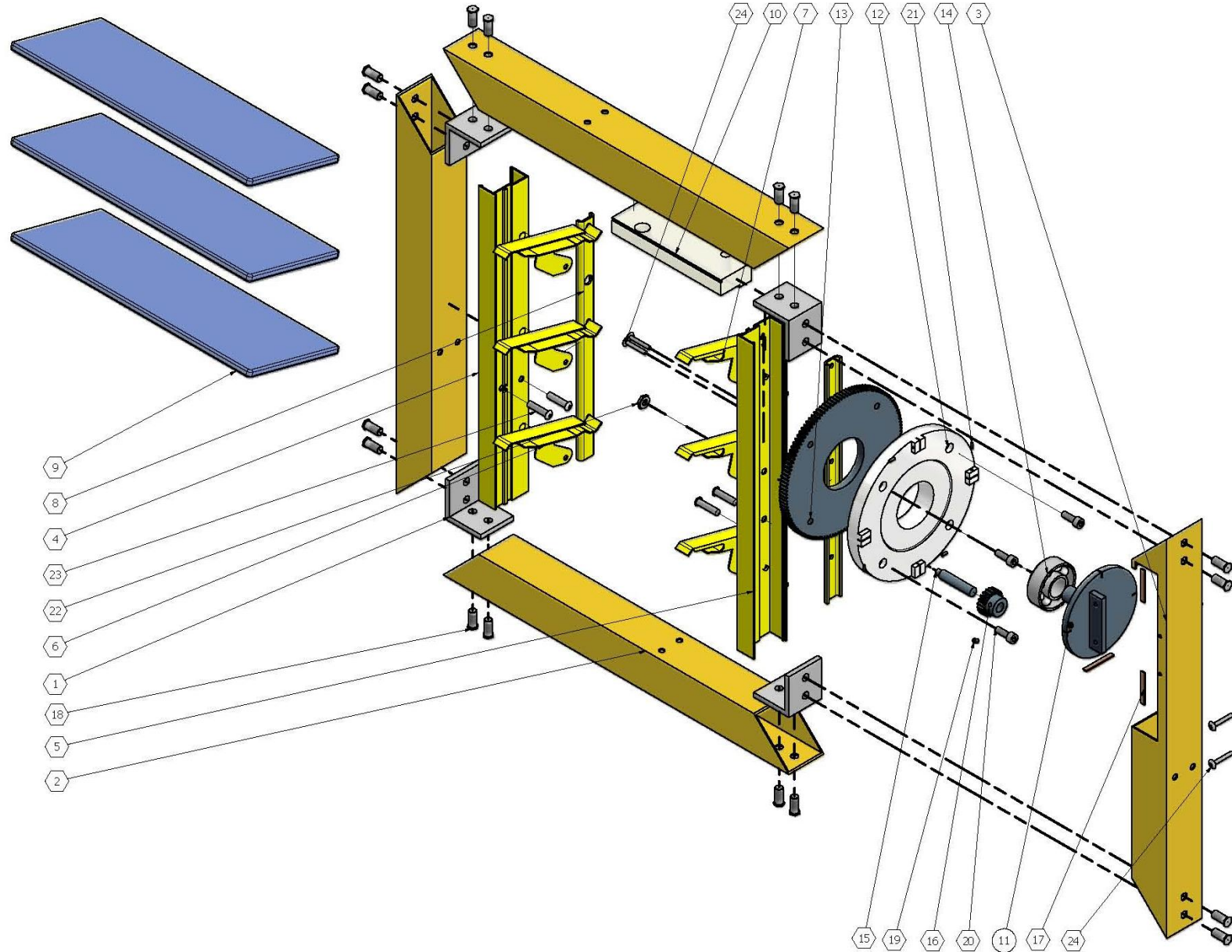
- Se diseñó y construyó un equipo tipo persiana la cual permite la apertura, así como el cierre de ellas al variar la temperatura del ambiente de manera automática utilizando MMF de Cu-Al-Be.
- En base a la forma de operar del equipo y ya que no fue necesario emplear componentes eléctricos típicos en los sistemas de control automático, se puede afirmar que el diseño se trata de un dispositivo de los denominados “inteligentes”.
- Su construcción es sencilla debido a que es posible aprovechar las persianas convencionales y adaptarles sin mayores modificaciones un mecanismo que transmite el peso de los vidrios al conjunto de placas de MMF de fácil instalación.
- Se empleó un modelo matemático que se basa en la mezcla de propiedades el cual no es lineal y se adaptó para obtener el desplazamiento en función del esfuerzo crítico, radios de los engranes del mecanismo, la geometría y número de láminas de MMF sujetas a una carga puntual variable en un arreglo en cantiléver.
- Se realizaron modificaciones al prototipo inicial. Lo cual permitió darle a las persianas mayor ligereza y economizar la fabricación en serie que se tiene contemplado realizar posteriormente

APÉNDICE I

PLANOS DE ENSAMBLE Y ELEMENTOS

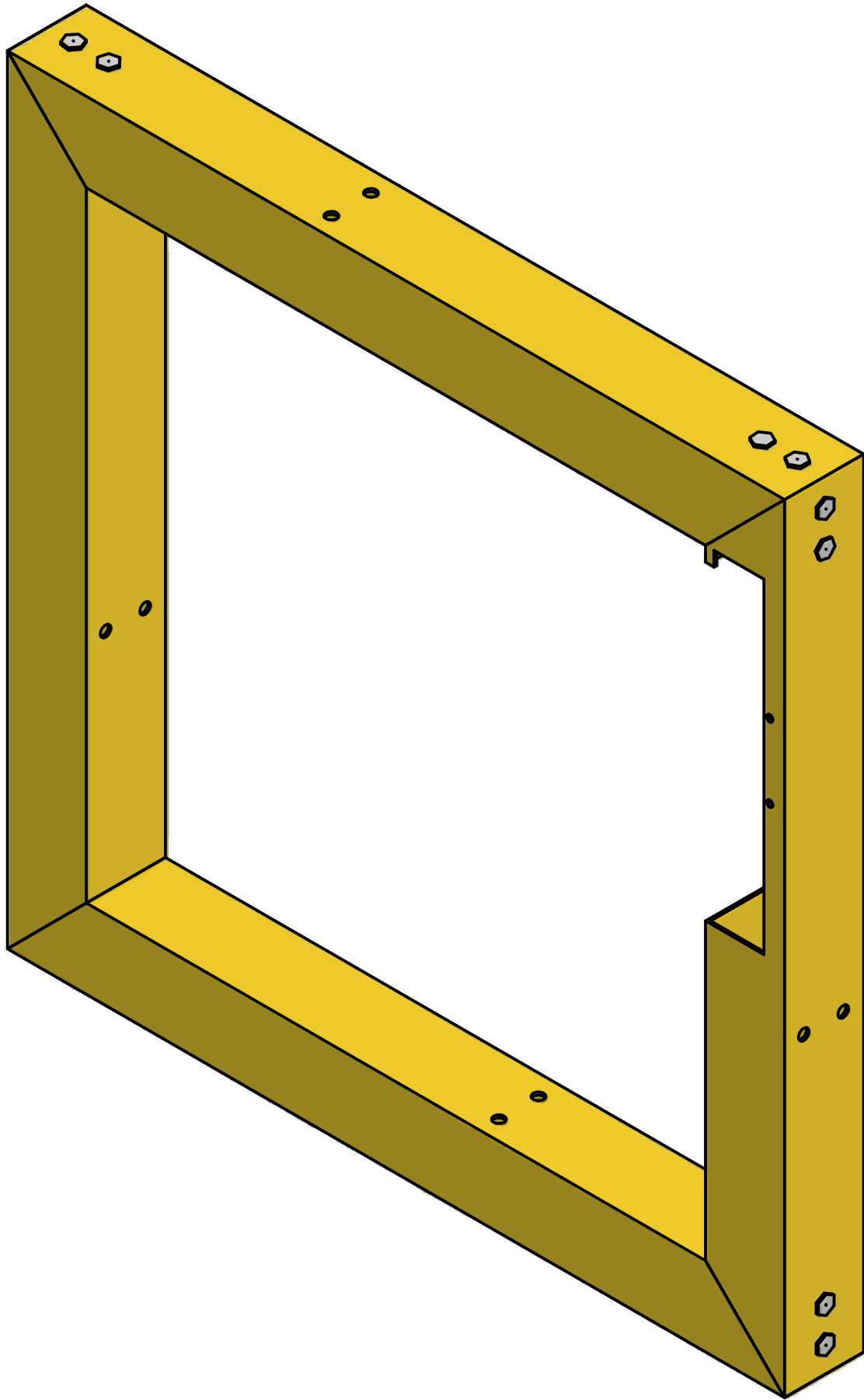
LISTA DE ENSAMBLES Y PARTES

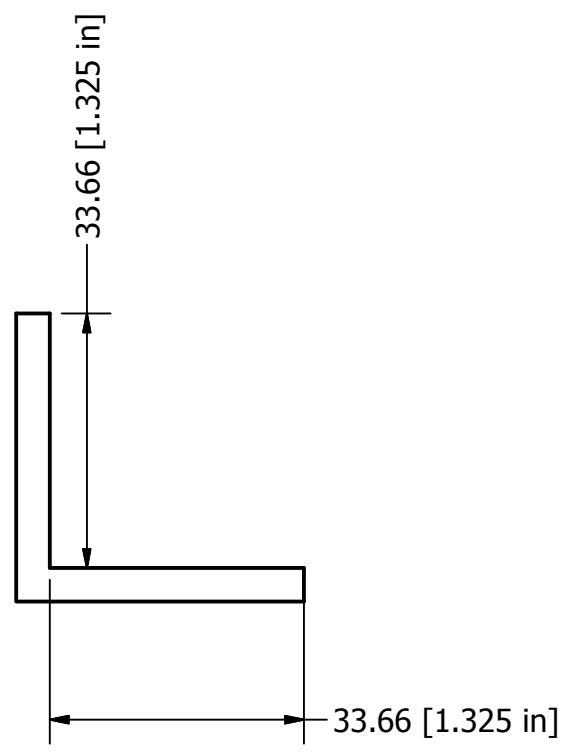
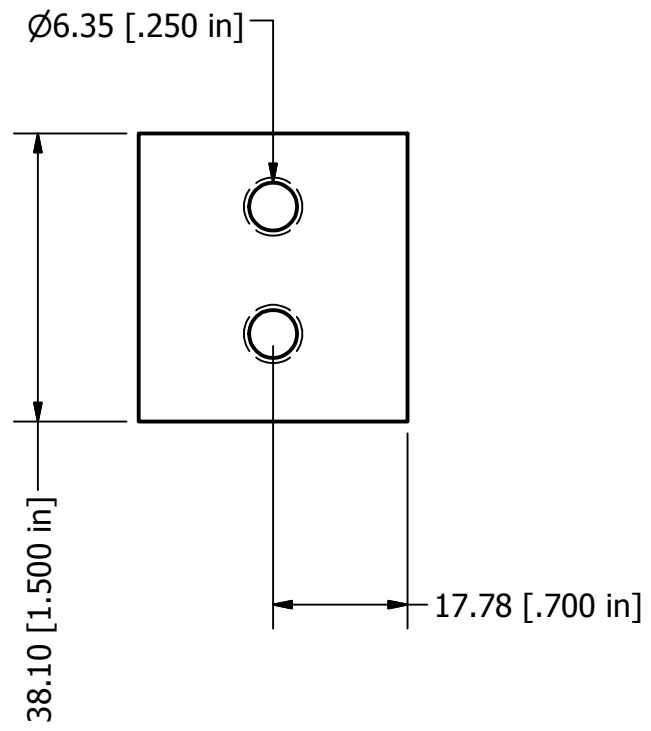
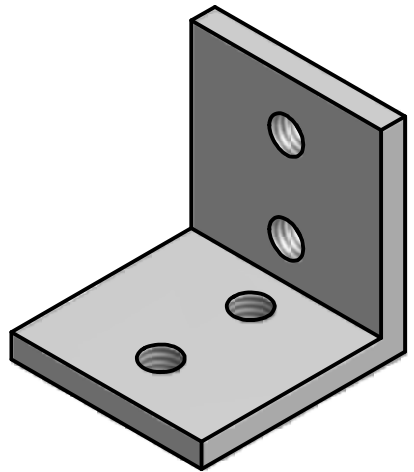
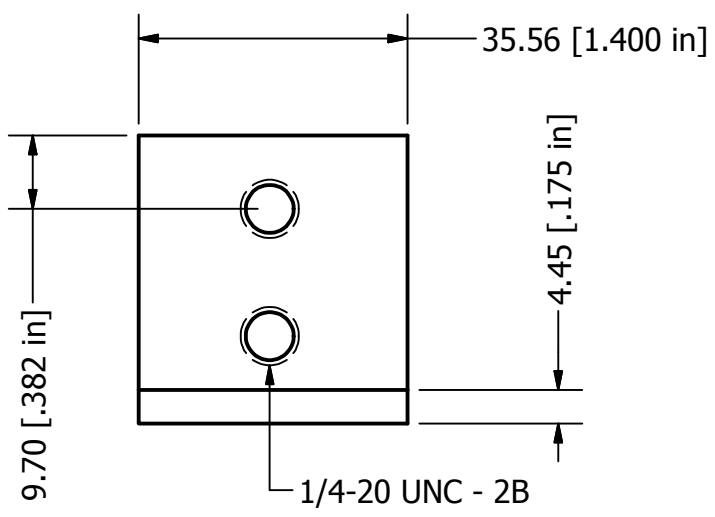
NUM	CANTIDAD	PIEZA	DESCRIPCION
1	4	Perfil cuadrado	Ensamble I: Marco
2	3	Perfil cuadrado_1	
3	1	Perfil cuadrado_2	
4	1	Marco de persianas	Ensamble II: Mecanismo de persianas
5	1	Marco de persianas_2	
6	3	Persiana_1	
7	3	Persiana_2	
8	2	Guía	
9	3	Cristal	
10	1	Sujetador de ejes	Ensamble III: Mecanismo de transmisión
11	1	Eje de empotramiento y porta lamina	
12	1	Carcasa	
13	1	Engrane	
14	1	Rodamiento	
15	1	Eje rotacional	
16	1	Piñón	
17	4	Lamina Cu-Al-Be	
18	16	Tornillo para maquinaria de cabeza hexagonal	Tornillería
19	1	Varillas roscadas con hexágono interior y punta	
20	4	Tornillos cilíndricos con hexágono interior allen	
21	4	Varillas roscadas con hexágono interior y punta	
22	1	Tuerca hexagonales baja y Arandela para tornillos y tuercas hexagonales	
23	4	Tornillo alomado, con hexágono interior allen	
24	4	Tornillo alomado, con hexágono interior allen	



ESCALA 2:1

ENSAMBLE I: MARCO

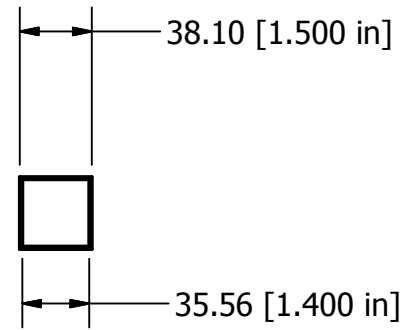
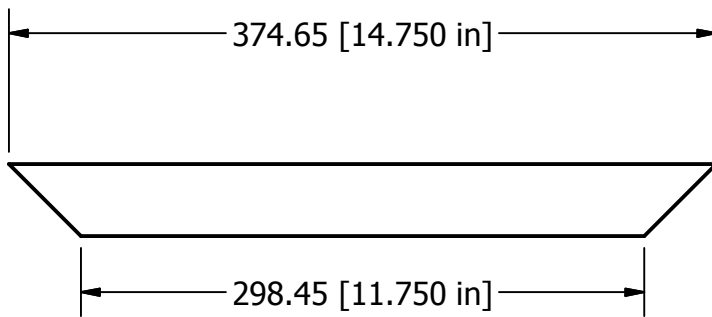
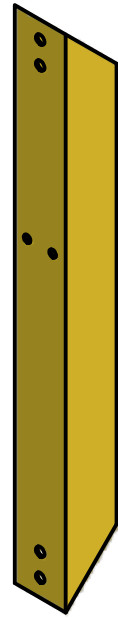
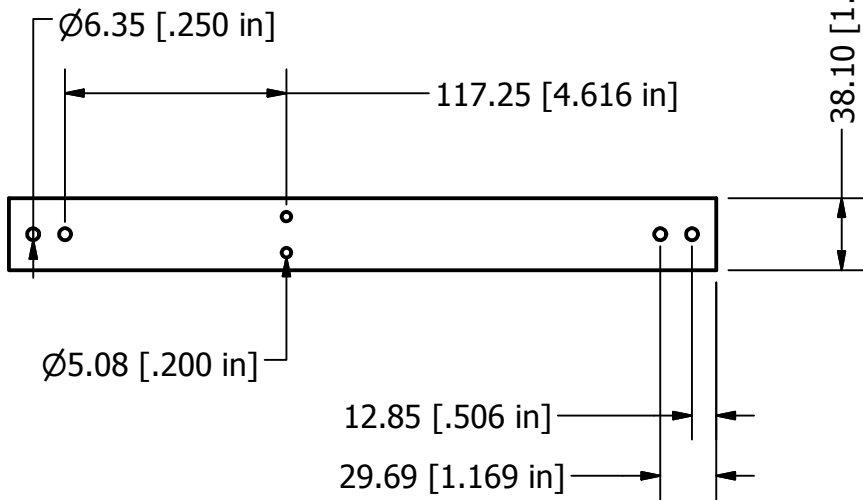




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.
 PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: PERFIL CUADRADO	MATERIAL: ACERO 1018	NÚM. DE PIEZAS: 4
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI		ESCALA: 1:1
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm
		FECHA:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: PERFIL CUADRADO_1

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 3

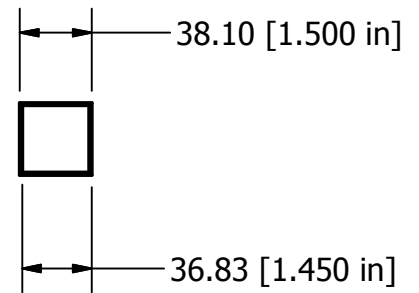
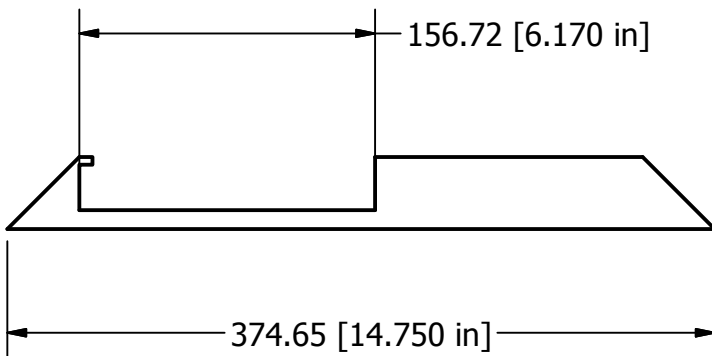
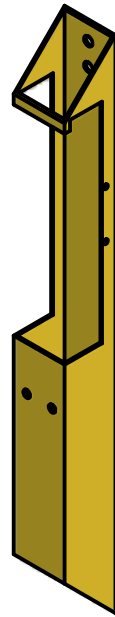
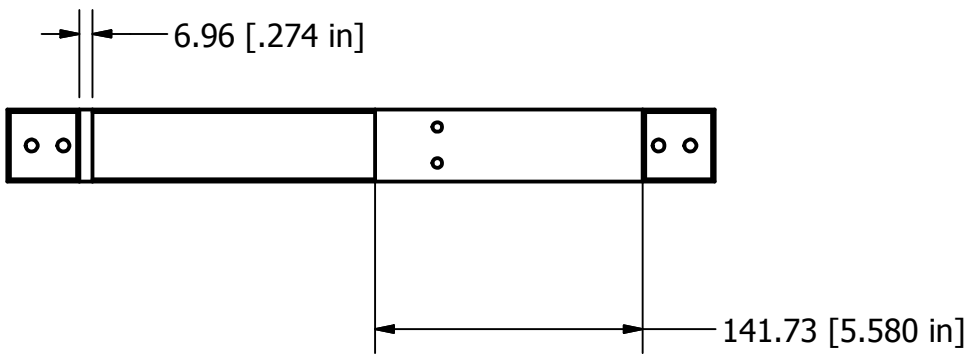
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

ESCALA: 1:4

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: PERFIL CUADRADO_2

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 1

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

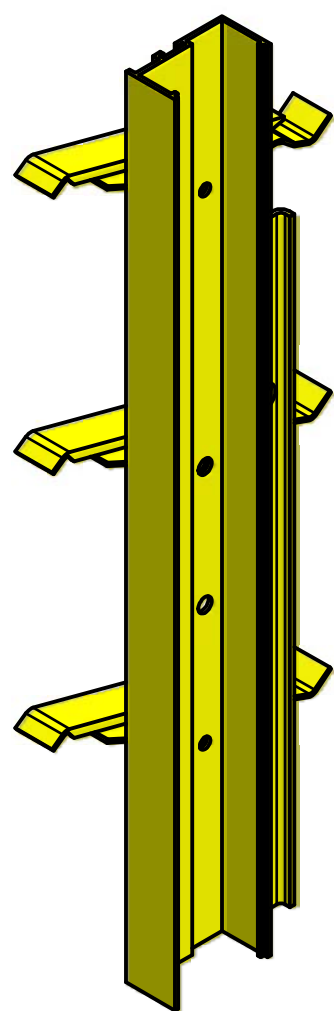
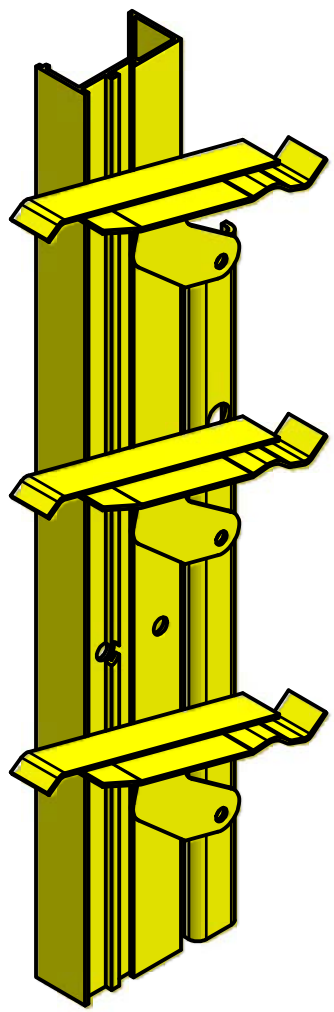
ESCALA: 1:4

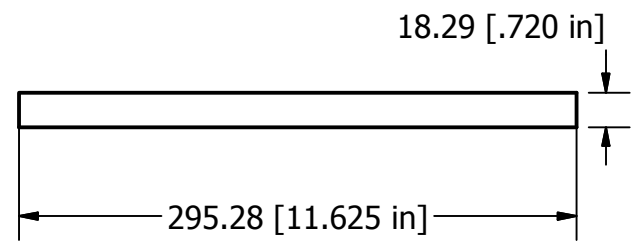
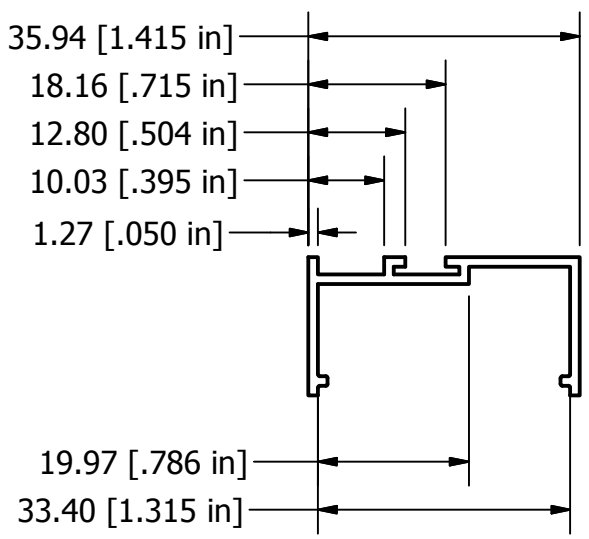
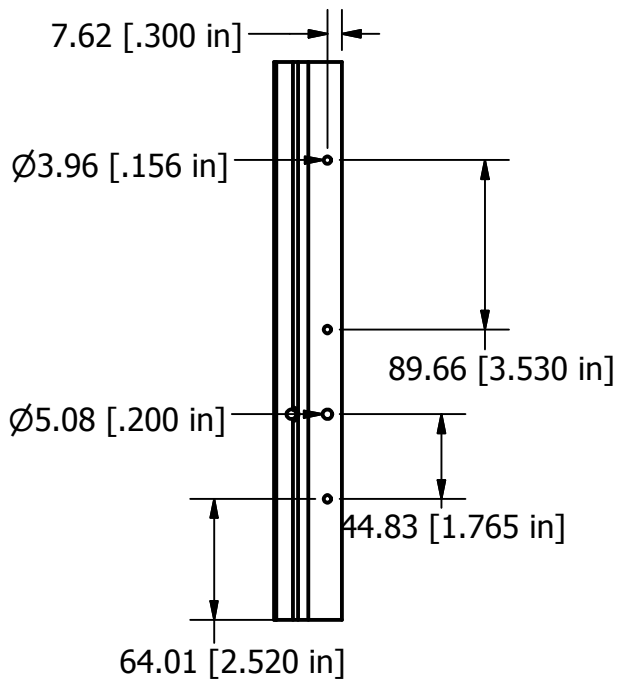
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:

ENSAMBLE II: MECANISMO DE PERSIANAS





ESCALA 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: MARCO DE PERSIANA_2

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 1

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

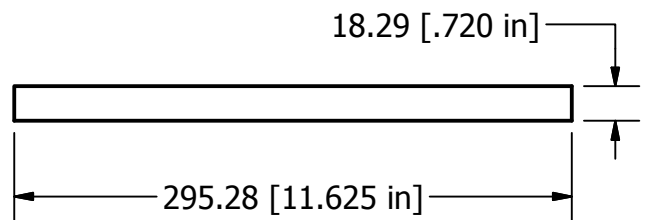
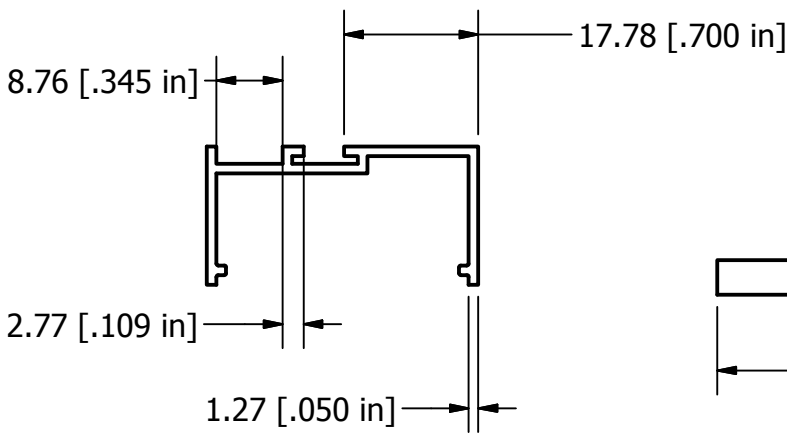
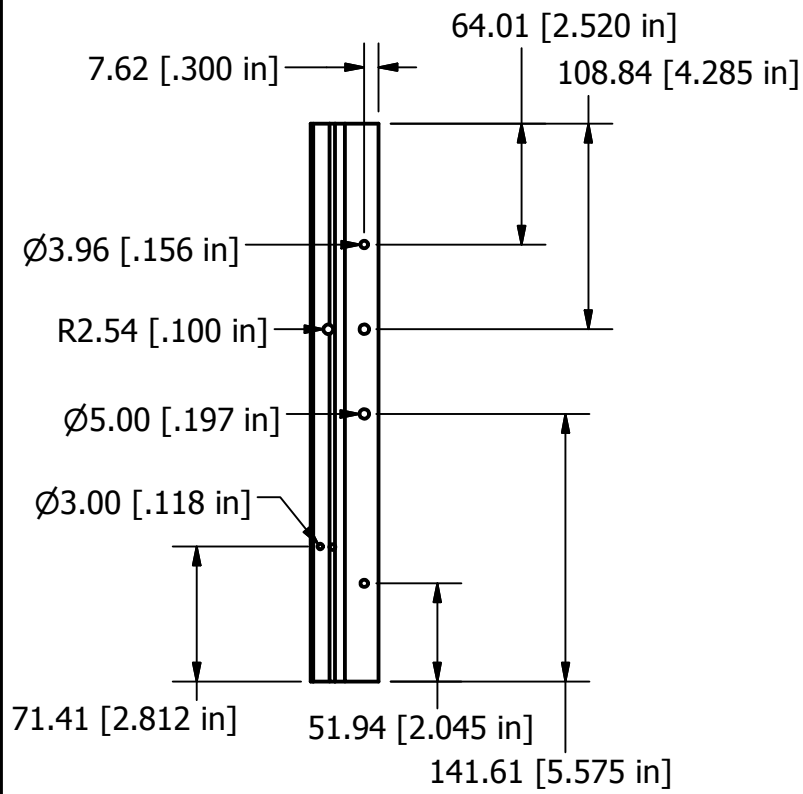
ESCALA: 1:4

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:





ESCALA: 1:1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: MARCO DE PERSIANAS_2

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 1

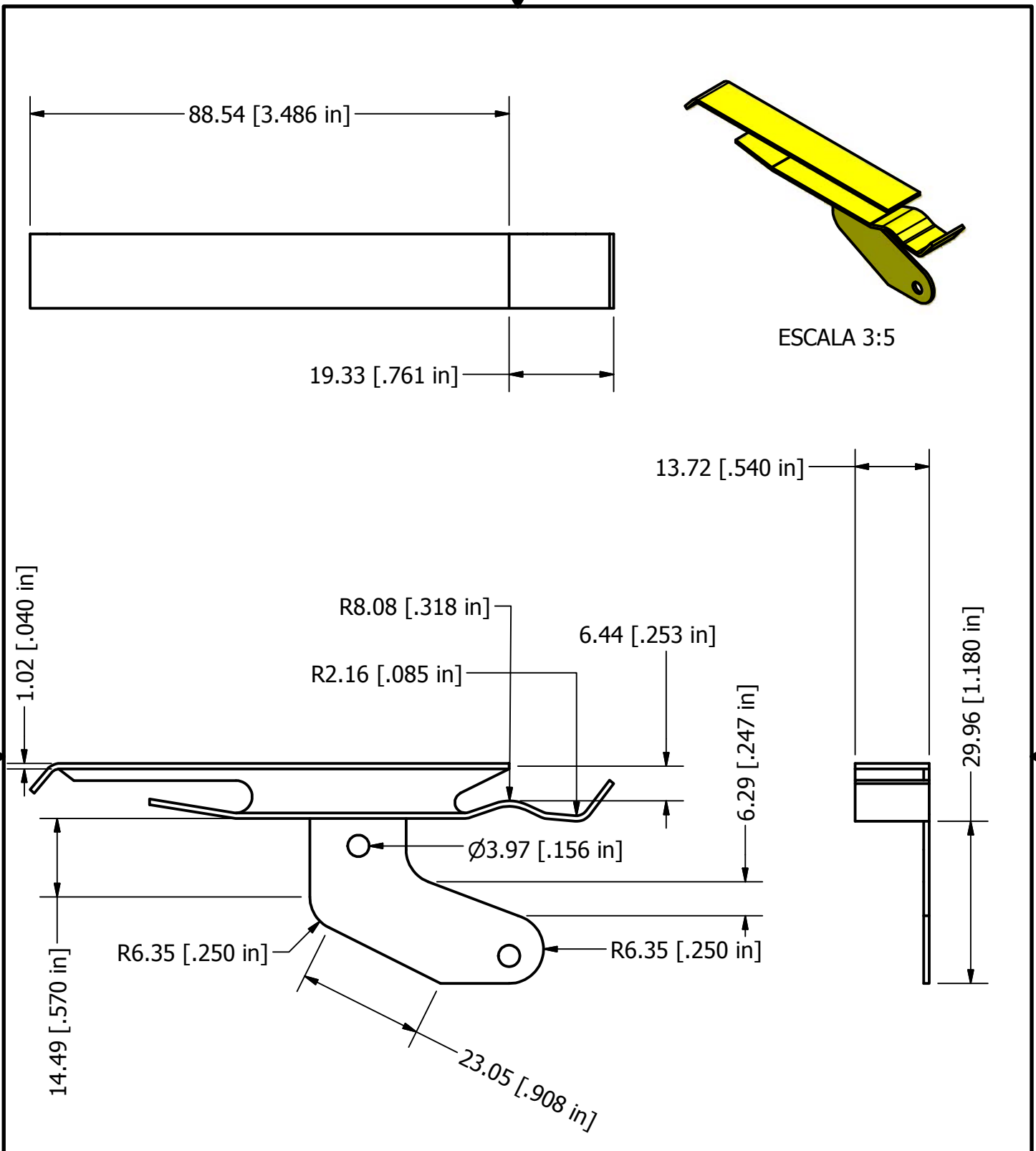
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

ESCALA: 1:4

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:



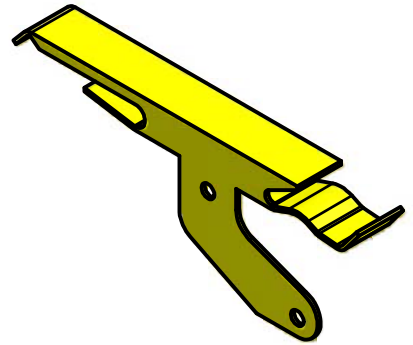
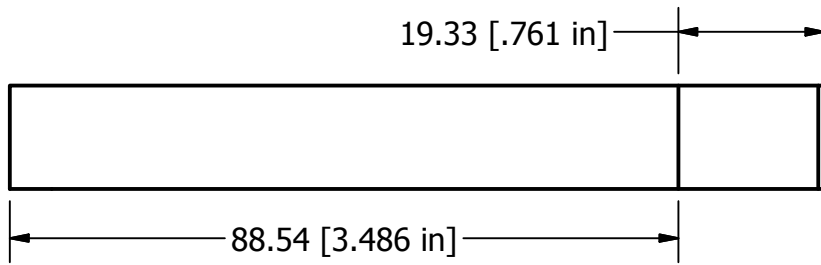
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

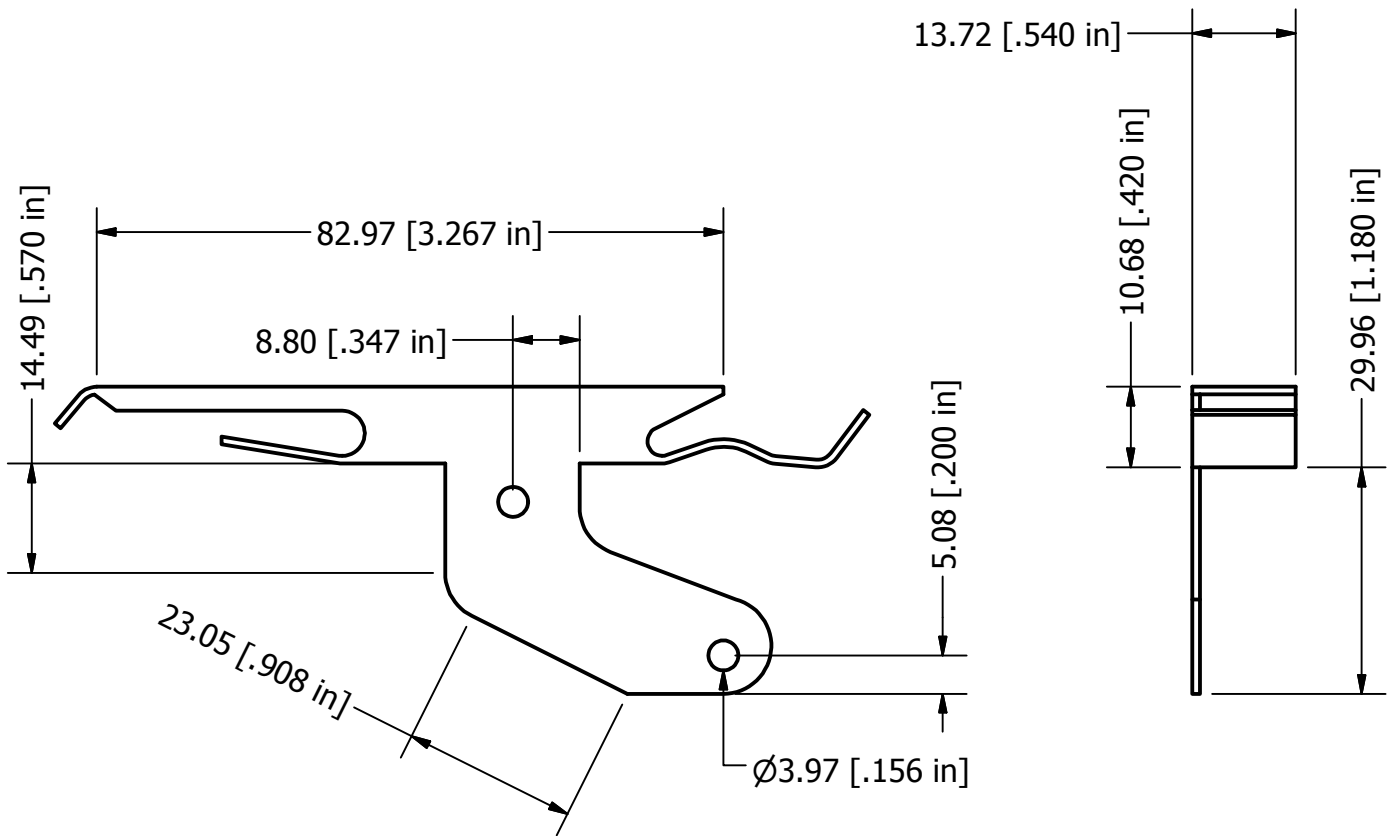
PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: PERSIANA_1	MATERIAL: ALUMINIO	NÚM. DE PIEZAS: 3
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI		ESCALA: 1:1
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm
		FECHA:



ESCALA 3:5



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: PERSIANA_2

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 3

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

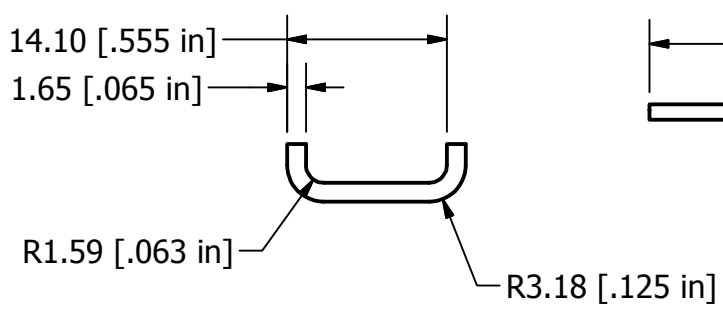
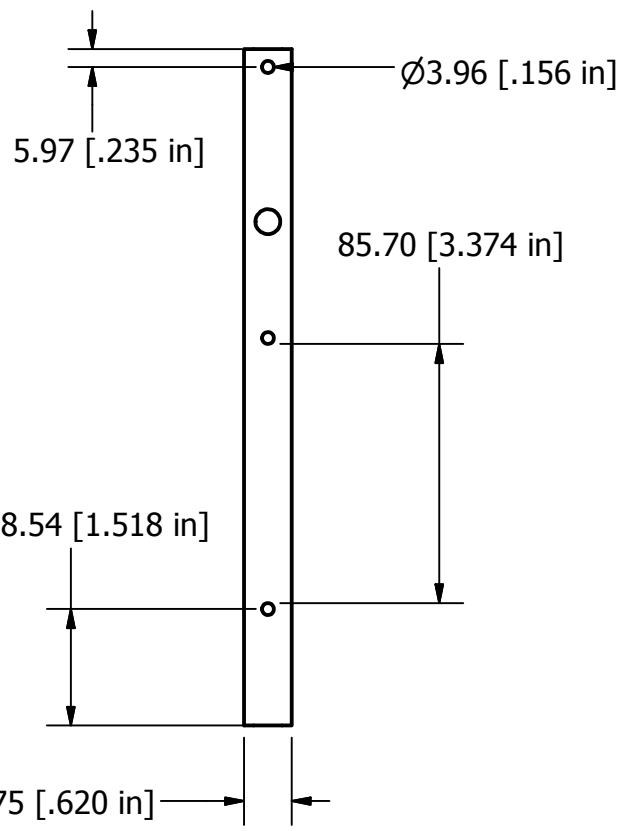
ESCALA: 1:1

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

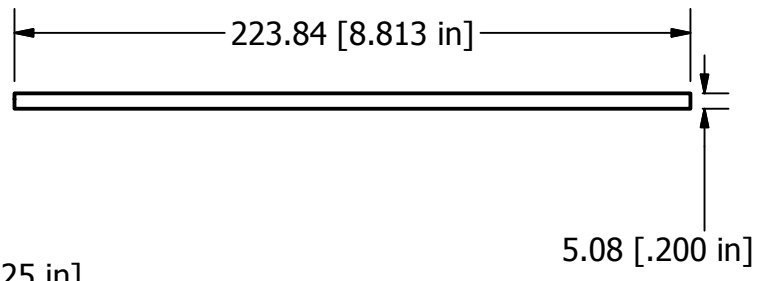
ACOTACIÓN: mm

FECHA:





ESCALA 3:2



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: GUIA

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 2

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

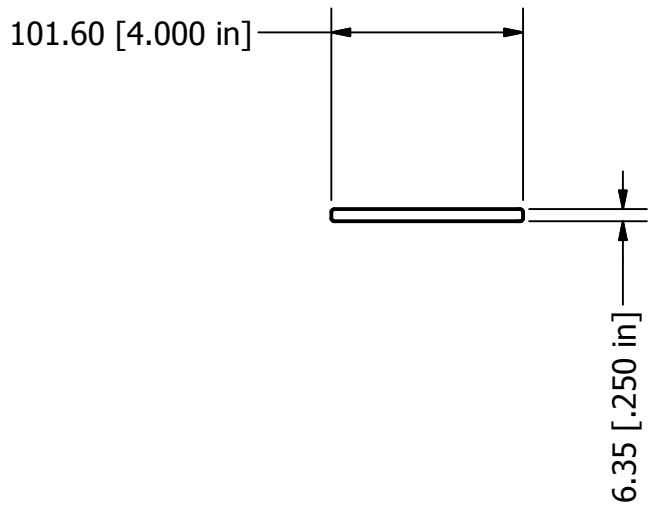
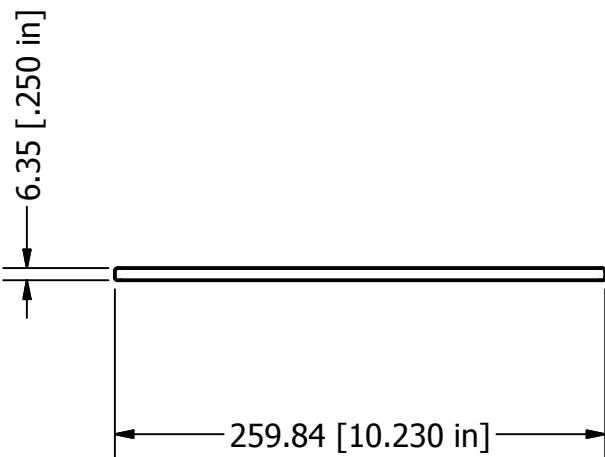
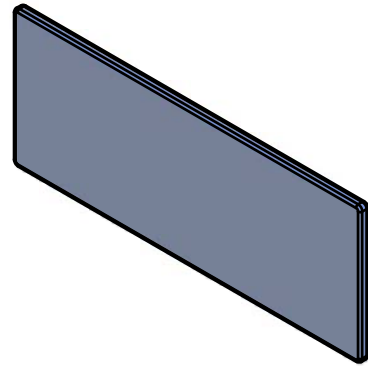
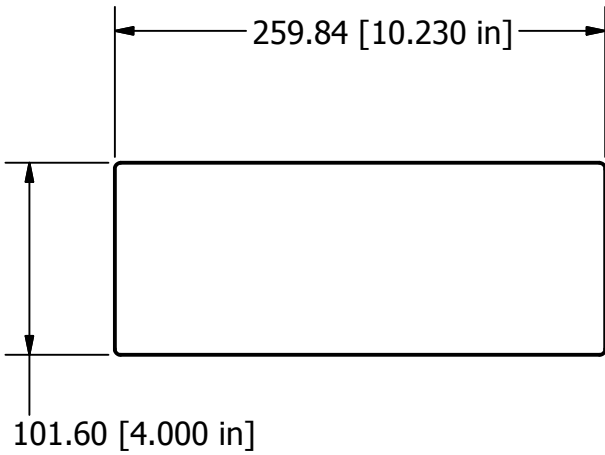
ESCALA: 1:2

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: CRISTAL

MATERIAL: VIDRIO

NÚM. DE PIEZAS: 3

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

ESCALA: 1:4

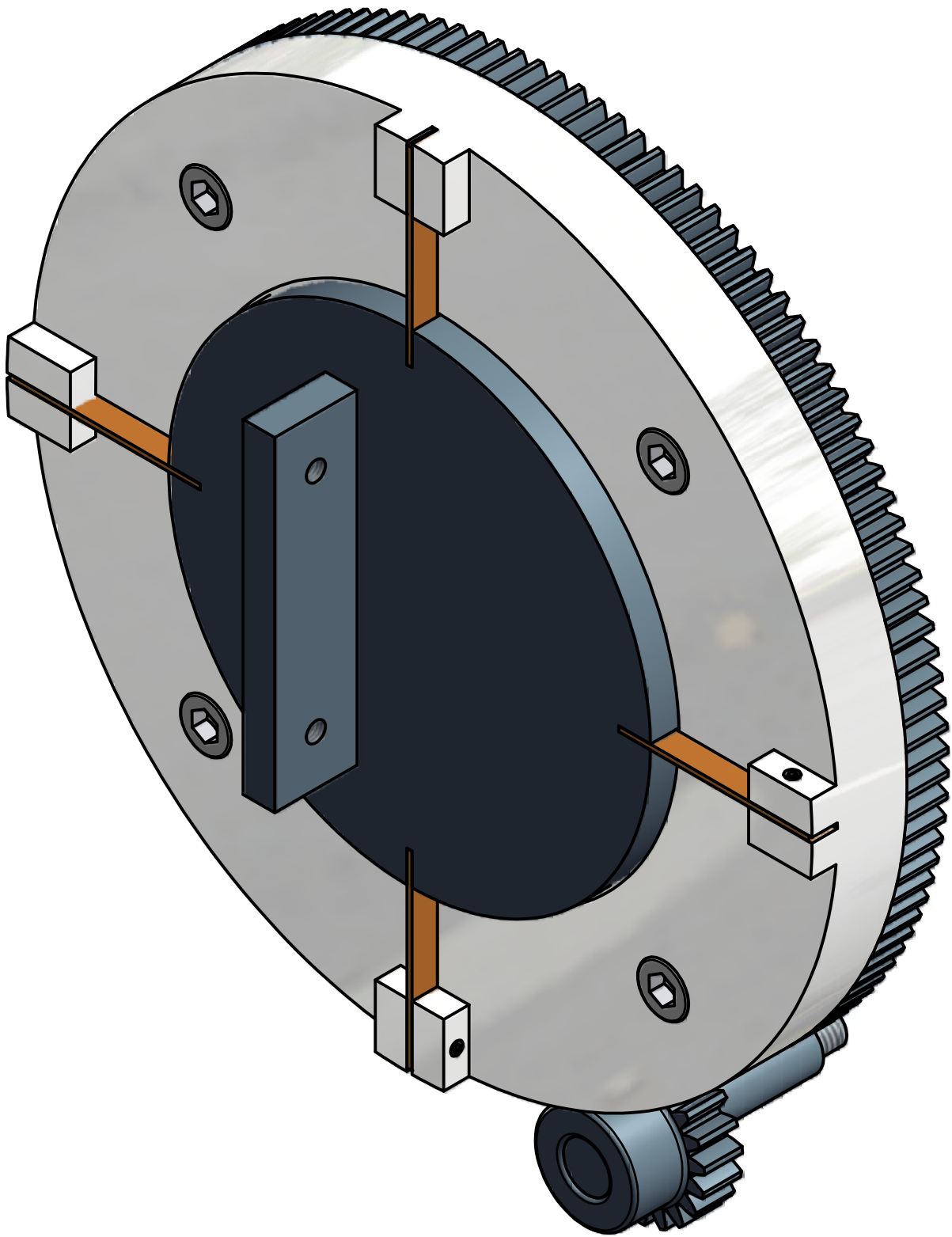
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

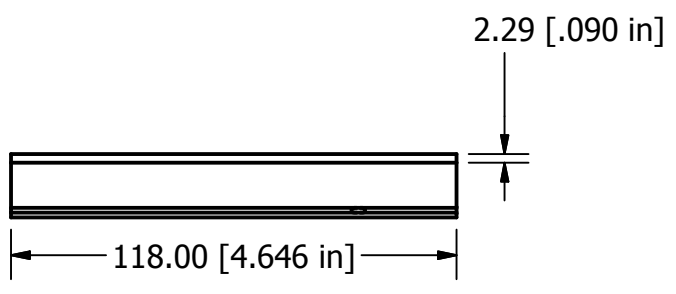
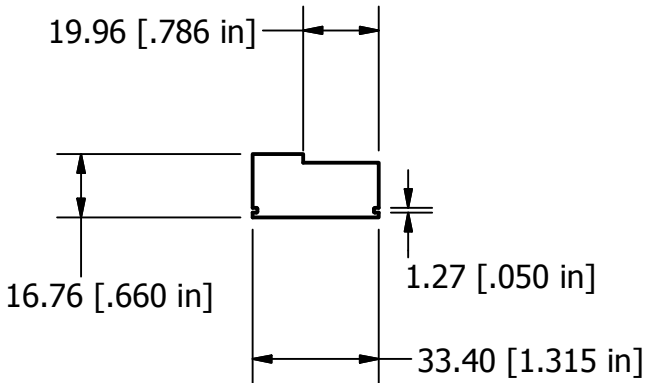
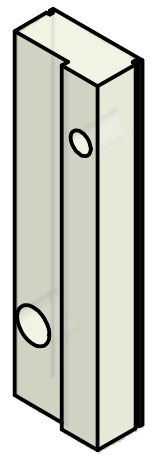
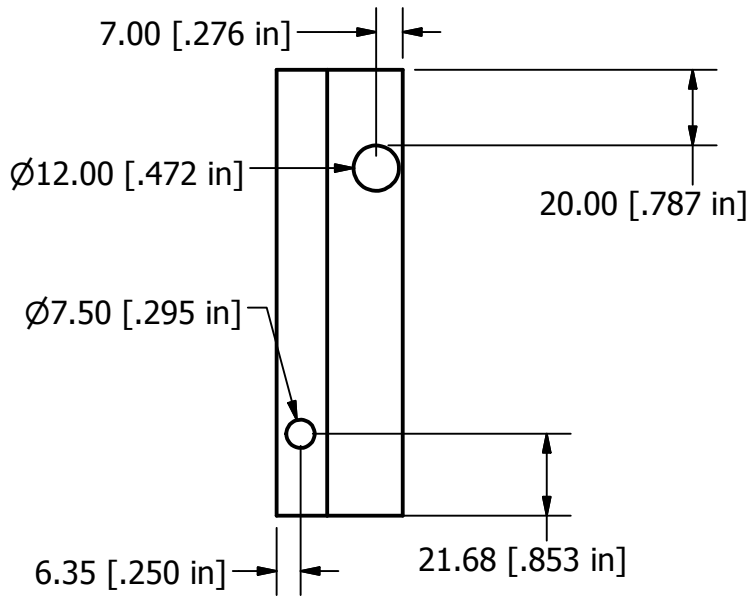
ACOTACIÓN: mm

FECHA:



ENSAMBLE III: MECANISMO DE TRANSMISION





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: SUJETADOR DE EJES

MATERIAL: ACRILICO

NÚM. DE PIEZAS: 1

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

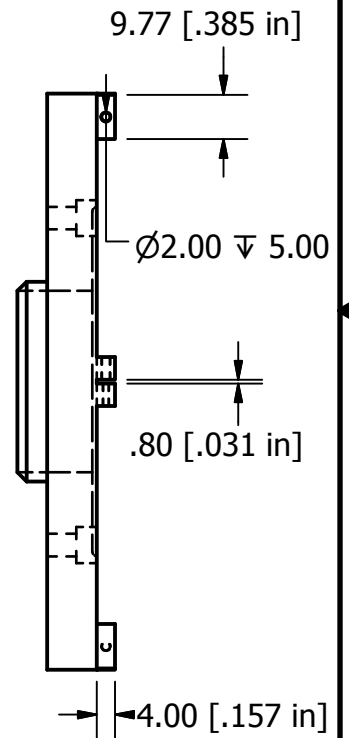
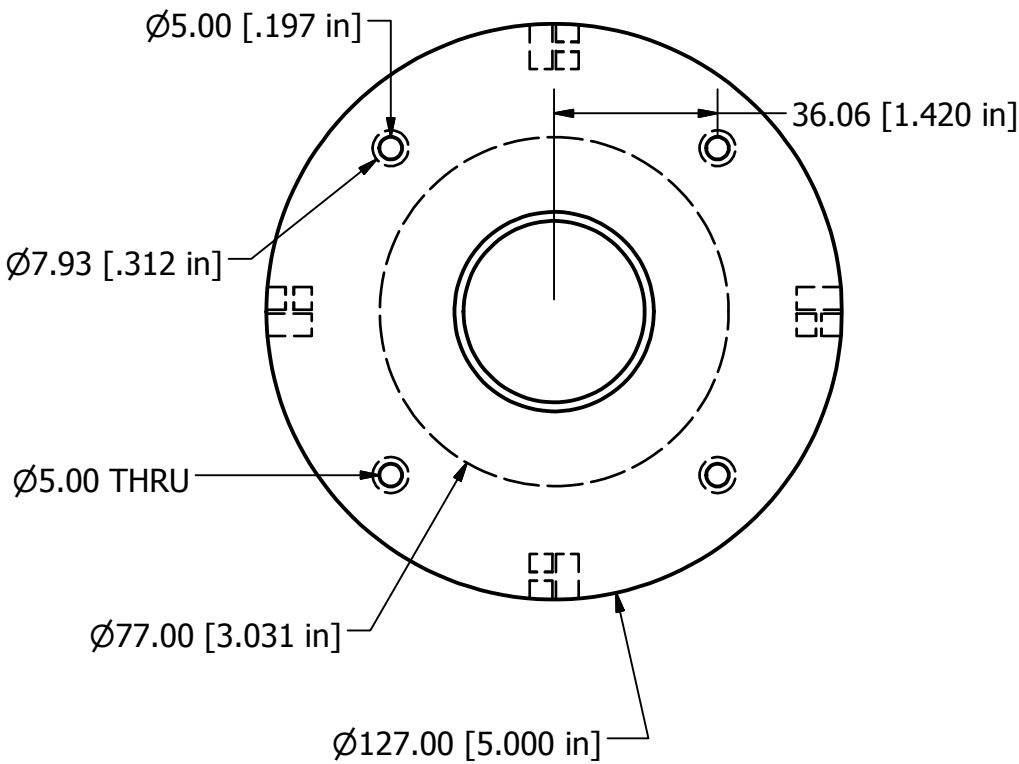
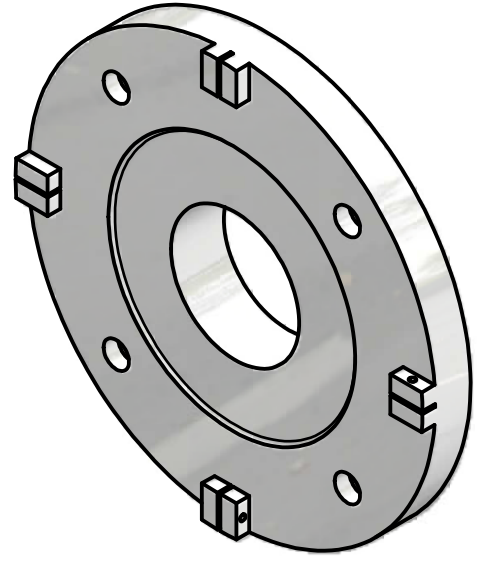
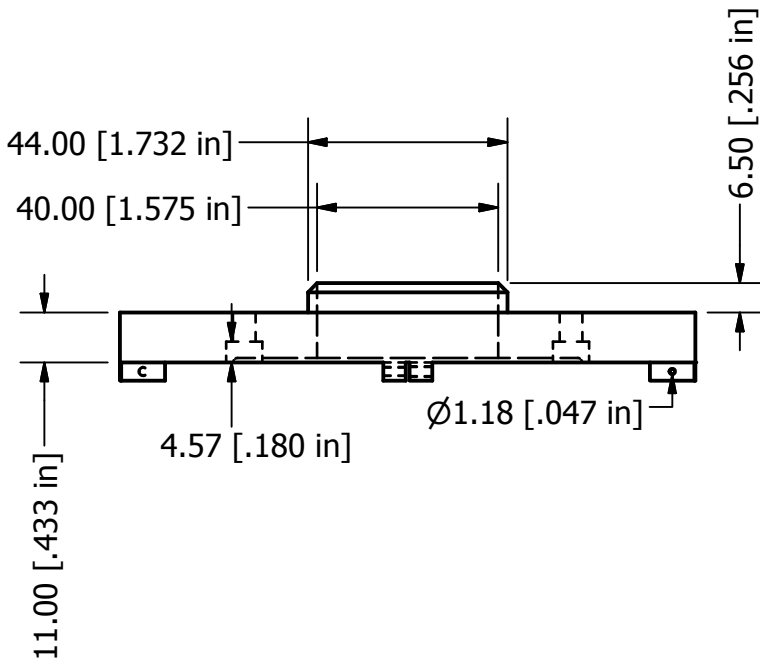
ESCALA: 2:1

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: CARCASA

MATERIAL: ALUMINIO

NÚM. DE PIEZAS: 1

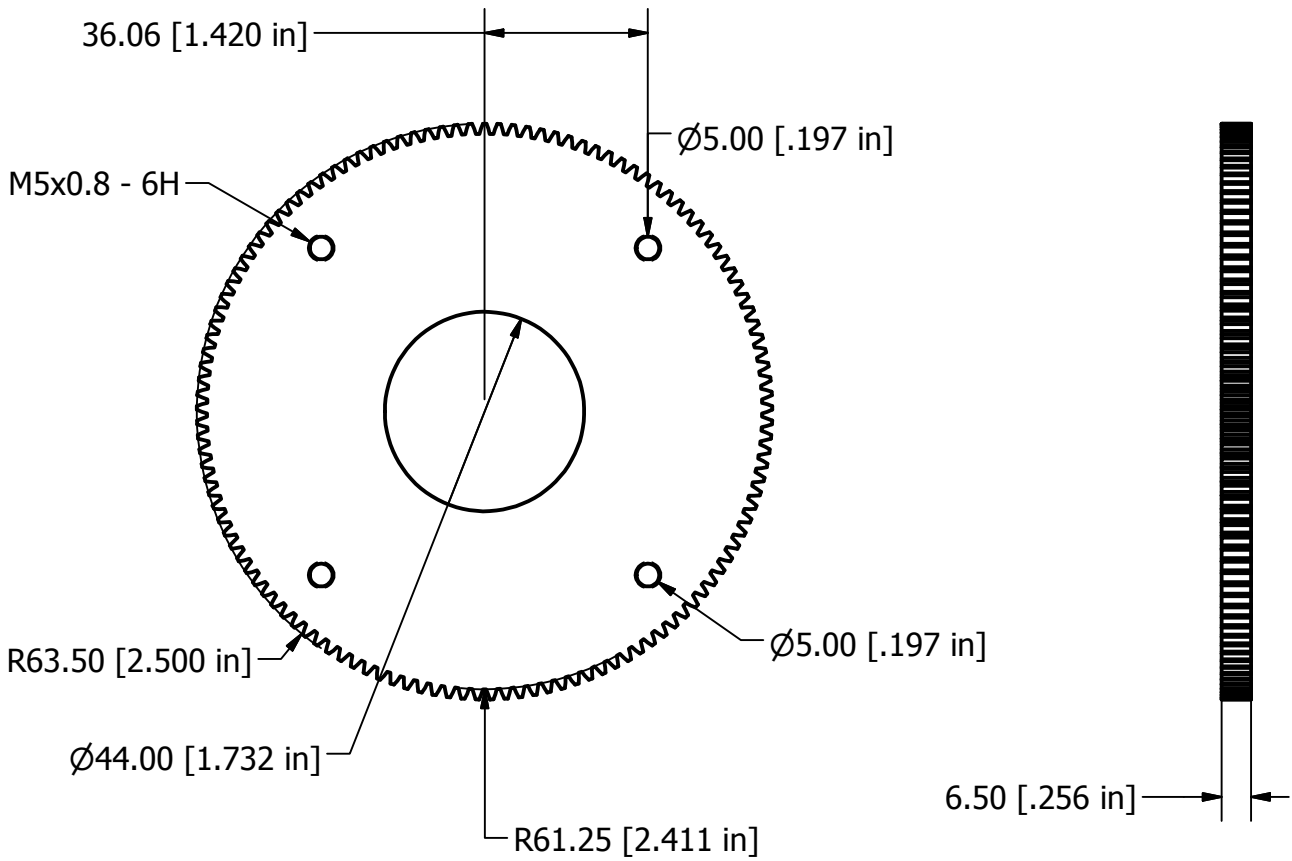
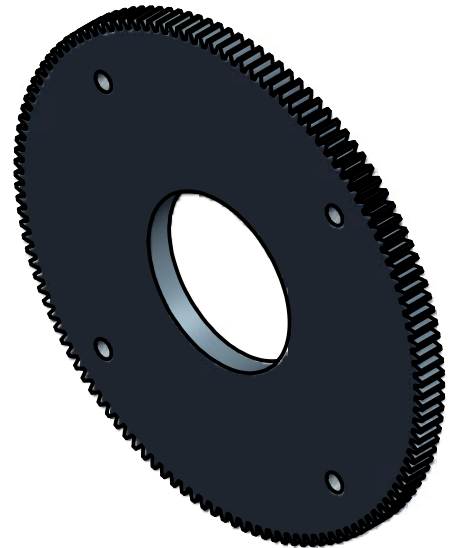
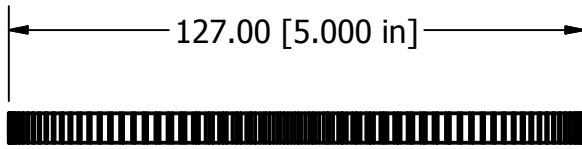
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

ESCALA: 3:5

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: ENGRANE

MATERIAL: ACERO 1018

NÚM. DE PIEZAS: 1

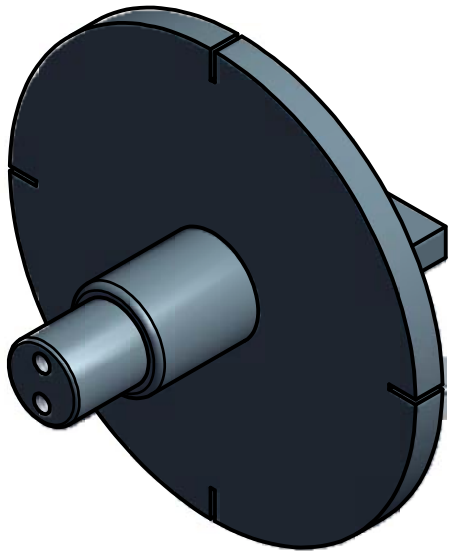
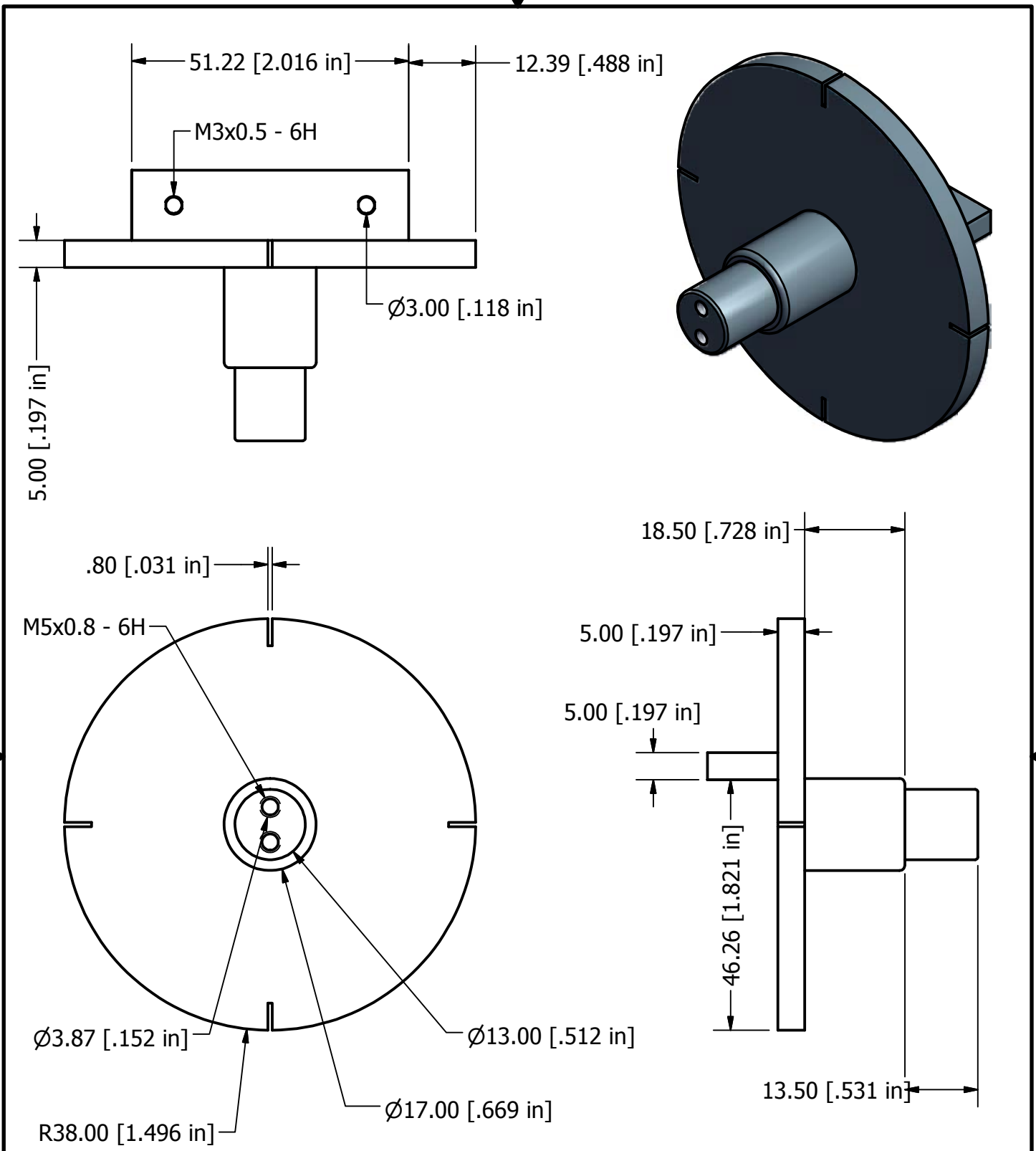
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI



ESCALA: 3:5

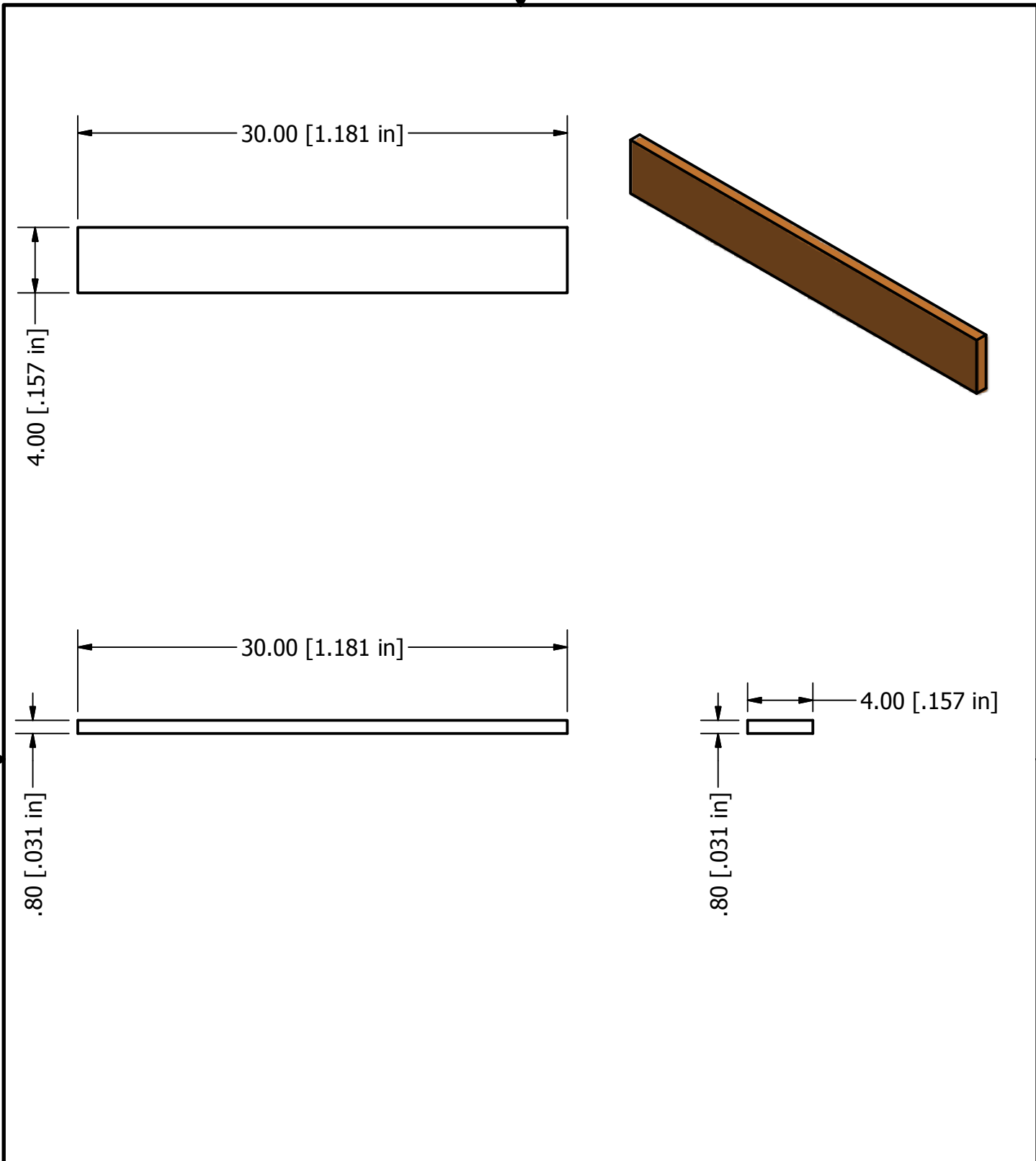
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:



	UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.		
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.		
	PERSIANAS INTELIGENTES		
PIEZA: EJE DE EMPOTRAMIENTO Y PORTA LAMINAS	MATERIAL: ACERO 1018	NÚM. DE PIEZAS: 1	
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI		ESCALA: 1:1	
REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.		ACOTACIÓN: mm	
		FECHA:	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: LAMINA MMF

MATERIAL: Cu-Al-Be

NÚM. DE PIEZAS: 4

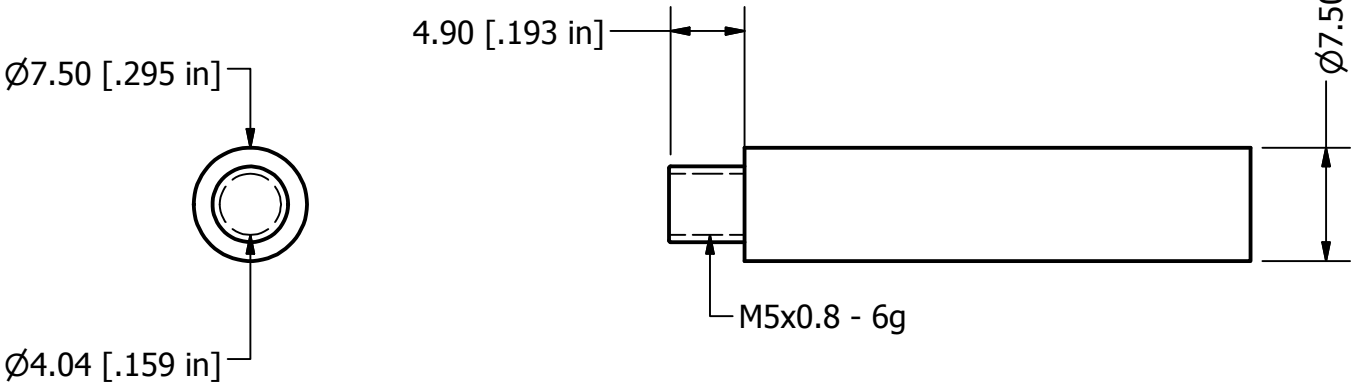
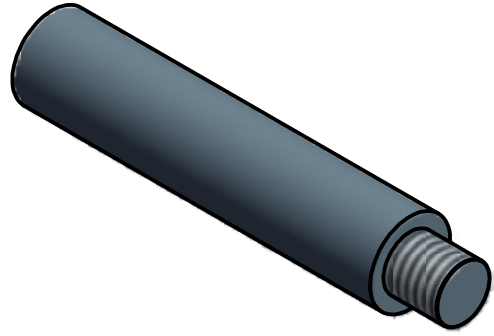
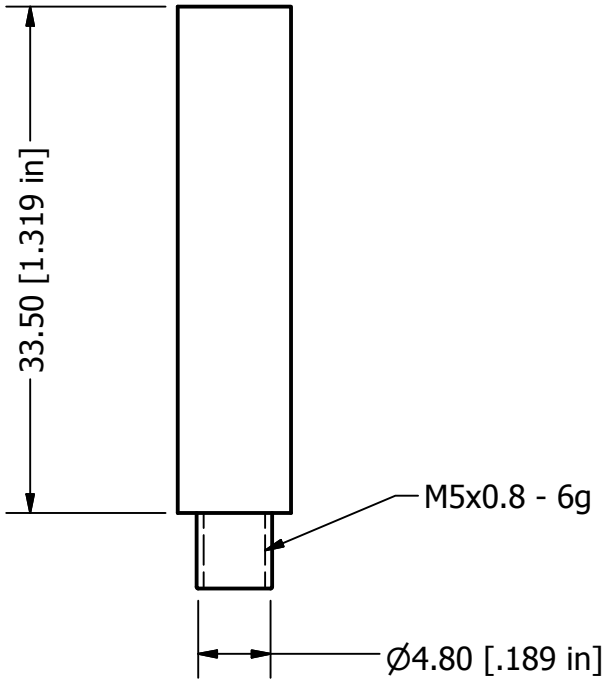
REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

ESCALA: 3:1

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: EJE ROTACIONAL

MATERIAL: ACERO 1018

NÚM. DE PIEZAS: 1

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

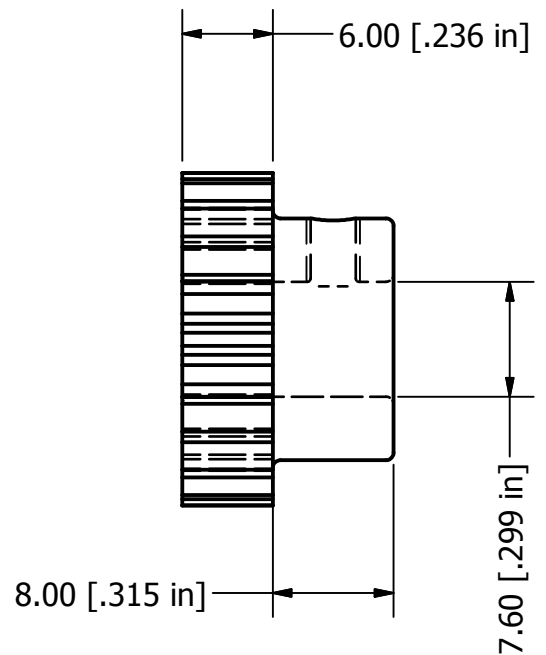
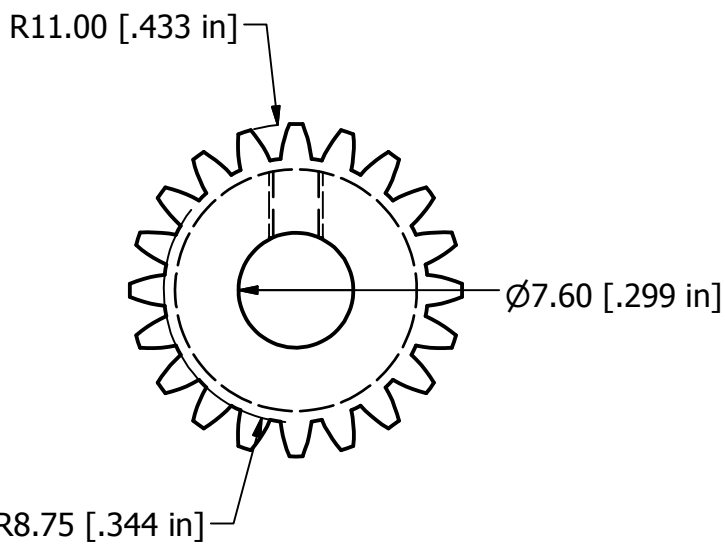
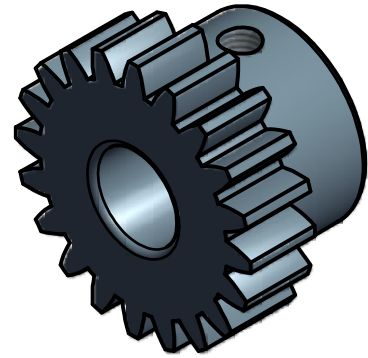
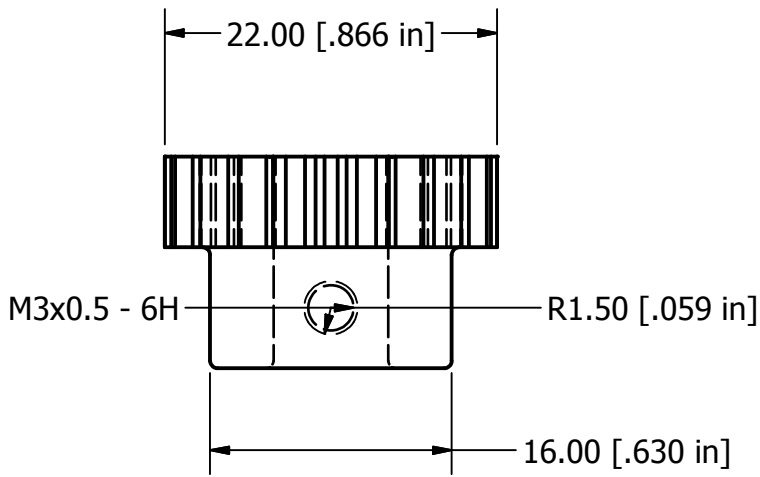
ESCALA: 2:1

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN.

PERSIANAS INTELIGENTES



PIEZA: PIÑÓN

MATERIAL: ACERO 1018

NÚM. DE PIEZAS: 1

REALIZÓ: GARCÍA SALMORÁN ISRAEL ARUBI

ESCALA: 2:1

REVISÓ: Dr. JACINTO CORTÉS PERÉZ.

ACOTACIÓN: mm

FECHA:

Referencias

1. K. Otsuka and C. M. Wayman. Introduction to Shape Memory Materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.1-27. (1998).
2. K. N. Melton. General applications of SMA's and smart materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. Pp.220-240. (1998).
3. M. Olson, G. B. Cohen, P. C. Clapp. On the classification of displacive phase transformations. Proceeding of the international conference on martensite transformation. ICOMAT 79, Cambridge-Massachussets, USA, 1979, pp. 1-11.
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. Duering. An Introduction to martensite and shape memory. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys. London: Butterworth-Heinemann, 1990, pp. 3-20.
8. A. Houtcoeur, 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 the III European Symposium on Martensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES a, (ed), J. de Physique Colloque C2, 459. (1994).
9. H. Flores. Stabilité thermodynamique de la phase beta et l'effet mémoire double sens d'un alliage à mémoire de forme du type Cu-Al-Be. Thèse de doctorat: Inst. Nat. Sc. Appl., Lyon., FRA 1993.
10. 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).
11. 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).
12. 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 Abril. Tecnomics Publishing. New York. (1992)
13. 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).
 14. 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).
 15. K. Otsuka and C. M. Wayman. Superelasticity Effects and Stress-Induced Martensitic Transformations in Cu-Al-Ni Alloys. *Acta metallurgica*, 24, 207-226, (1976).
 16. P. Delobelle and C. Lecomte. A Phenomenological three dimensional model for pseudoelastic behavior of Shape Memory Alloys. *J. de Physique IV.C-1*, pp.293-300. (1996).
 17. 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).
 18. 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).
 19. Joseph Edward Shigley y John Joseph Uicker Jr. *Teoría de maquinas y mecanismos*. MacGraw-Hill (1988).
 20. José Carlos Miranda. Notas de clase "Mecanismos". ITEC campus Toluca (2003)
 21. Virgil Moring Faires. *Diseño elementos de maquinas*. Edit. Limusa, pp 465-520 (2002)
 22. Salvador Cardona Foix y Daniel Clos Costa. *Teoría de maquinas*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. Primera edición: febrero de 2001.
 23. Arthur G. Erdman y George N. Sandor. *Diseño de mecanismos, análisis y síntesis*. 3ª Ed. Prentice Hall. México 1998.
 24. Y. Gillet, M., A. Meunier, V. Brailovski, F. Trochu, E. Patoor and M. Berveiller. Comparison of Thermomechanical Models for Shape Memory Alloy Spring. *J de Physique IV Colloque C8, supplement au Journal de Physique III, volumen 5*, p. 1165(1995).
 25. S. Lecterq, G. Bourbon and C. Lecomte. Plasticity Like Model of Martensite Phase in Shape Memory Alloys. *Proceedings of de III European Symposium on*

- Martensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES, (ed), J de Physique Colloque C-2, p. 513, (1994).
26. J. Cortés, H. Flores Zúñiga. Análisis teórico del Efecto superelástico en un elemento sujeto a flexión. Memorias de III Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingenieros Mecánicos. MORELIA, MÉXICO. pp4 15-420 (1997).
 27. H. Flores, J. Cortés. Superelasticity in Cu-Al-Be Shape Memory Alloys. Proceeding of the International Conference of Advanced Materials: ICAM-95, Simp. 24. CANCÚN, MEX., 1995.
 28. J. Cortés. Superelasticidad en aleaciones Cu-Al-Be con Memoria de Forma. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica. ENEP Aragón, UNAM, 1997.
 29. G. E. Dieter. Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. 2° Edition, Tkyo. pp. 72-149, (1976).
 30. E. Patoor, A Eberhardt an M. Berveiller. Micromechanical Modeling of Superelásticity in Shape Memory Alloys. Proceedings of de III European Symposium on Martensitic Transformations BARCELONA, SPAIN: PLANES, (ed), j de Physique Colloque C-2, pp. 501-506, (1994).
 31. J. Cortés P., J. Jiménez G., J. A. Gutiérrez M., F. M. Sánchez A., H. Flores Z. Análisis de la flexión en un elemento con Memoria de forma. Memorias del V Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica. México. pp. 154-161. (1999).
 32. J. Cortés P. Contribución al Estudio de la Pseudoelasticidad en Aleaciones con Memoria de Forma. Tesis de Maestría. DEPMI, UNAM. (1998).