



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN**

**DISEÑO DE UNA VÁLVULA ECONOMIZADORA
DE AGUA EMPLEANDO MATERIALES CON
MEMORIA DE FORMA**

**TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

RODRIGO LECHUGA TABOADA

ASESOR DE TESIS:

Dr. JACINTO CORTÉS PEREZ

CAMPUS ARAGÓN, MÉXICO, AGOSTO 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Jurado asignado:

Presidente: Dr. Daniel Aldama Avalos.

Vocal: M. en I. Alberto Reyes Solís.

Secretario: Dr. Jacinto Cortés Pérez

Suplente: M. en I. María De Lourdes Marín Emilio

Suplente: M. en I. José Antonio Souza Jiménez

AGRADECIMIENTOS

AGRADEZCO A MI MADRE GLORIA AURORA Y A MI PADRE JOSÉ RAYMUNDO POR TODO EL APOYO BRINDADO DURANTE TODOS ESTOS AÑOS, POR SUS ENSEÑANZAS, POR SU PACIENCIA, Y POR TODO AQUELLO QUE IMPLICA SU ESFUERZO PARA BRINDARME MEJORES OPORTUNIDADES DE DESARROLLO PROFESIONAL Y PERSONAL.

A MIS ABUELAS CONCEPCIÓN Y GLORIA AURORA PORQUE LA EDUCACIÓN, LAS ENSEÑANZAS Y EL APOYO QUE ME BRINDARON FUERON MUCHO MÁS ALLÁ DE LO QUE LA OBLIGACIÓN LO INDICA, PORQUE SIN USTEDES EL CAMINO HUBIERA SIDO MUCHO MÁS ABRUPTO. LO QUE ME DIERON ME ES INVALUABLE.

A ROSA ELENA POR LA PACIENCIA MOSTRADA CONMIGO ESTOS ÚLTIMOS CUATRO AÑOS, ASÍ COMO POR LA AYUDA, ASESORÍA Y CONSEJOS, LOS CUALES ME FUERON Y ME SIGUEN SIENDO DE GRAN UTILIDAD.

A MI HERMANO RAYMUNDO POR ENSEÑARME QUE DESEMPEÑAR UNA LABOR ES ALGO QUE DEBE HACERSE DÍA CON DÍA PARA PODER ALCANZAR UN BUEN NIVEL EN LO QUE SE HACE Y POR ENSEÑARME QUE HAY QUE TENER LA MENTALIDAD DE COMPETIR SIEMPRE.

A MI ASESOR JACINTO CORTÉS PÉREZ POR HABERME BRINDADO SU GUÍA, CONSEJO, APOYO, Y CONOCIMIENTO, LOS CUALES VAN MÁS ALLÁ DEL ÁMBITO DE INGENIERÍA.

A NÉSTOR, POR SU DESINTERESADA PACIENCIA, AYUDA, ASESORÍA Y CONSEJO SIN LOS CUALES, EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS SE VERÍA REDUCIDO EN CALIDAD Y CONTENIDO.

A MI TÍO JOSÉ TOMÁS POR HABER SIDO MI VENTANA HACIA LO QUE MÁS TARDE ELEGIRÍA COMO MI PROFESIÓN.

A MI PRIMO ISRAEL POR SU INVALUABLE AYUDA EN LA REALIZACIÓN DE MUCHOS DE LOS PROYECTOS A LO LARGO DE MI CARRERA, SIN DUDA SIN TU AYUDA HUBIERA SIDO MUCHO MÁS DIFÍCIL PARA MÍ HABERLA CONCLUIDO.

A JUAN, GLORIA, JUAN MANUEL, MARCO ANTONIO, ANDRÉS OMAR Y A LAURA ABIGAIL, POR SU GRAN AYUDA Y MUESTRA DE AMISTA EN LOS MOMENTOS MÁS DIFÍCILES, AUNQUE A VECES PAREZCA DISTANTE, NUNCA ME OLVIDO DE USTEDES.

A RODRIGO MAURICIO, GLORIA DEL SOCORRO Y MARÍA DEL CARMEN POR TODOS ESTOS AÑOS DE AMISTAD Y POR TODO SU APOYO.

A LUIS FERNANDO PORQUE FUISTE QUIEN ME ALENTÓ A LO LARGO DE ESTOS AÑOS A PODER TERMINAR UNA CARRERA Y POR TODO LO QUE HE APRENDIDO A TRAVÉS DE TI EN ESTOS TRECE AÑOS DE AMISTAD.

A ESTEBAN, ROBERTO, JAVIER, JAIME, FRANCISCO, JUAN PABLO, DANIEL, Y GERARDO POR TODA SU AYUDA A LO LARGO DE ESTOS ÚLTIMOS SEIS AÑOS, POR PERMITIRME COMPARTIR LOS BUENOS Y MALOS MOMENTOS QUE

SIGNIFICÓ CURSAR ESTA CARRERA Y PORQUE AL PASO DE LA MISMA ME DEMOSTRARON EN MÁS UNA OCASIÓN SU AMISTAD Y APOYO LOS CUALES ESPERO Y DESEO CONSERVAR.

A MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS ÁNGEL ROMERO, PARIS, FRANCISCO, ALEJANDRO, GUILLERMO, FELIPE, SERGIO, JESÚS Y SALVADOR, POR LA AYUDA BRINDADA EN LABORES REFERENTES A ESTE TRABAJO DE TESIS ASÍ COMO A CARLOS, ARTURO, PEPE, MARTÍN, ROGELIO, MAURICIO, RICARDO E IVÁN POR HACER POR SUS COMENTARIOS Y OBSERVACIONES.

A HEZKA POR TU ASESORÍA PARA MI PRESENTACIÓN.

AGRADEZCO AL PROGRAMA BECANET 2009 IMPARTIDO POR LA SEP POR EL APOYO ECONÓMICO BRINDADO PARA LA REALIZACIÓN DE ESTE TRABAJO DE TESIS, EL CUAL FUE DE UNA GRAN AYUDA.

AGRADEZCO AL PROGRAMA DE BECAS COMECYT-CONACYT 2009 POR EL VALIOSO APOYO ECONÓMICO BRINDADO GRACIAS AL CUAL PUDO CONCLUIRES ESTE TRABAJO DE TESIS.

AGRADEZCO AL PROGRAMA DE APOYO A PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (PAPIIT) POR EL APOYO ECONÓMICO BRINDADO Y GRACIAS AL CUAL ESTE TRABAJO DE TESIS FUE CONCLUIDO.



Índice

Introducción	i
Capítulo I. Aspectos generales de las aleaciones con memoria de forma	1
1.1.- Materiales con memoria de forma	2
1.1.1.- Introducción a las AMF	2
1.1.2.- Breve historia de los materiales con memoria de forma	3
1.1.3.- Transformación martensítica	5
1.1.4.- Tipos de transformación	8
1.1.4.1.- Transformación por difusión	9
1.1.4.2.- Transformación displaciva	10
1.1.5.- Comportamiento mecánico de las AMF	11
1.1.5.1.- Pseudoelasticidad y superelasticidad	13
1.1.5.2.- Anisotropía mecánica en las AMF	14
1.2.- Aleaciones con base Ni-Ti	20
1.2.1.- Diagrama de equilibrio del Ni-Ti	24
1.2.3.- Diagrama esfuerzo temperatura transformación del Ni-Ti	25
1.2.4.- Parámetros mecánicos de las AMF de Ni-Ti	26
1.3.- Aplicaciones utilizando MMF	28
Capítulo II. Problemática del abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana	32
2.1.- Demarcación de la Zona Metropolitana del Valle de México	33
2.2.- Características físicas e hidrológicas de la zona metropolitana del valle de México	35
2.3.- La sobreexplotación de los acuíferos de la ZMVM	38
2.4.- Los recursos hídricos de la ZMVM en la actualidad	43
2.5.- El futuro hídrico de la ZMVM	52
2.6.- Dispositivos mecánicos de ahorro de agua	54



Capítulo III. Diseño de una válvula reguladora de agua caliente utilizando MMF	60
3.1.- Introducción al diseño de un dispositivo a base de de MMF	61
3.2.- Diseño de una válvula reguladora de agua caliente empleando un alambre de Ni-Ti con memoria de forma	63
3.2.1.- Principio de operación	63
3.2.2.- Diseño del prototipo que utiliza alambre de NI-Ti	74
3.2.3.- Descripción del ensamble de los componentes	75
3.2.4.- Descripción del funcionamiento del sistema	79
3.3.- Diseño de una válvula economizadora de agua utilizando resortes de Ni-Ti	80
3.3.1.- Componentes y ensamblaje del prototipo alterno	81
3.3.2.- Descripción del funcionamiento del sistema	88
Capítulo IV. Resultados y discusión	90
4.1.- Modelo matemático	91
4.2.- Criterios utilizados para el diseño que utiliza alambre de Ni-Ti	94
4.3.- Criterios utilizados para el diseño que utiliza resortes de Ni-Ti	107
Conclusiones	117
Apéndices	
Apéndice I. Planos y explosivo de la válvula reguladora a base de alambre de Ni-Ti	119
Apéndice II. Planos y explosivo de la válvula reguladora a base de resortes de Ni-Ti	128
Referencias bibliográficas	145



INTRODUCCIÓN



Introducción

Actualmente, en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) existe una serie de problemas urbanos asociados a la gran cantidad de personas que ahí viven, así como las condiciones geográficas propias del territorio. Entre dichos problemas, quizá los más evidentes son los de vialidad y de abasto/desalojo de agua.

El problema de abastecimiento de agua es uno de los más críticos debido a que se sabe que las fuentes que originalmente dotaban a la ciudad de agua potable se han reducido considerablemente, y por ello, es necesario traerla de sitios lejanos como el Río Cutzamala.

Considerando la problemática del suministro de agua en la ZMVM se vuelve muy importante no sólo cuidar que el consumo sea racional, sino disminuir todo lo posible su desperdicio. En este sentido, se han generado una serie de medidas que tienen como fin concientizar a la gente de las dificultades para traer el agua a la ciudad y las motivan a evitar desperdiciarla. Es claro que además de las campañas de concientización, es preciso desarrollar tecnología que contribuya al ahorro de agua.

Una de las fuentes de desperdicio de agua que aparentemente no representa un problema grave pero que en suma se vuelve considerable, es la que ocurre en las regaderas tanto domésticas como industriales. En el tramo de tubería que va de la regadera al calentador, generalmente se encuentra agua fría que, cuando la llave se abre esta se deja tirar ya que el usuario generalmente espera unos minutos hasta que empieza a salir el agua caliente para iniciar el baño. Este pequeño desperdicio de agua que prácticamente todos los habitantes de la ZMVM realizamos a diario se estima que representa millones de litros de agua que puede ser utilizada, ya que se trata de agua potable.

Desarrollar una tecnología que evite este desperdicio es un trabajo relativamente simple empleando un sistema de automatización convencional que sólo permita el paso a la regadera del agua caliente en tanto que mientras que el agua fría sea derivada a un recipiente. No obstante, este tipo de sistemas resultan un tanto costosos y sobre todo, son poco resistentes para las condiciones de uso.

Por otro lado, actualmente se han desarrollado sistemas de automatización de los denominados inteligentes que resultan mucho más sencillos que los convencionales. En su mayoría estos dispositivos se diseñan aprovechando las propiedades de materiales denominados “con memoria de forma”.



Los materiales con memoria de forma son aquellos que tienen la capacidad de tomar dos formas predeterminadas al pasar por cierta temperatura crítica que depende de la composición del material y de la microestructura. El cambio de forma que experimentan estos materiales puede ser inducido mediante la aplicación de una carga y enfriamiento lo que hace que sean ampliamente utilizados hoy en día sobre todo en países de los denominados desarrollados o de primer mundo como Estados Unidos, Inglaterra, Alemania, Francia, etc.

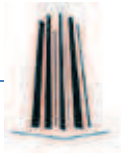
Cabe mencionar que el comportamiento mecánico de los Materiales con Memoria de Forma (MMF) es completamente diferente al que presentan los materiales convencionales ya que es no lineal, anisótropo, histerético y dependiente de la temperatura.

Debido a lo anterior, las formulas de diseño típicamente usadas para elementos mecánicos simples no son aplicables. No obstante lo anterior, hoy en día se han desarrollados modelos matemáticos simples que permiten predecir el comportamiento de MMF en forma de alambres, láminas y resortes helicoidales.

La existencia de modelos matemáticos que permiten predecir el comportamiento de elementos mecánicos simples, se ha fijado como objetivo del presente trabajo, desarrollar un par de dispositivos de automatización capaces de evitar que el agua fría que se encuentra en el tramo de tubería que va del calentador a la regadera, se desperdicie. Los diseños que se proponen constituyen el desarrollo de tecnología propia para ayudar a resolver un problema grave para la ZMCDM. A dichos dispositivos se les ha denominado como “válvulas economizadoras de agua” y se proponen dos diseños; uno que emplea un alambre con memoria de forma y el segundo que usa dos resortes también con memoria de forma. Para cumplir nuestro objetivo el presente trabajo se divide en 4 capítulos los cuales, se describen a continuación.

En el primer capítulo llamado “Aspectos generales de las aleaciones con memoria de forma” se presenta una breve descripción de las nociones fundamentales sobre los MMF y las características de su comportamiento así como los fenómenos asociados a éste, y algunas características particulares de la aleación de Ni-Ti.

En el segundo capítulo titulado “Problemática actual del abastecimiento de agua en la Zona Metropolitana” se explica cual es la situación de los recursos hídricos de la zona, los principales factores geológicos, económicos y sociales que generan la escasez del abastecimiento de agua, cuales son las actividades que generan un mayor consumo de agua en la zona, así como diversos datos estadísticos que hacen evidente la urgente necesidad de desarrollar dispositivos que permita un mayor ahorro de este recurso.



En el tercer capítulo denominado “Diseño de una válvula reguladora de agua caliente utilizando M.M.F” se describe a detalle los componentes que forman ambos diseños y se explica el modo de operación de los mismos.

En el cuarto capítulo nombrado “Resultados y discusión” se explica el modelo matemático a partir del cual se determinan ciertos parámetros de la válvula reguladora que opera a base de un alambre de Ni-Ti y también algunos métodos experimentales para determinar los parámetros críticos para el caso de la válvula reguladora que opera a base de dos resortes de Ni-Ti, se muestran los diagramas de instalación de las misma a una red hidráulica doméstica y se enlistan las ventajas y desventajas de cada diseño.



CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES DE LAS ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA



1.1 Materiales con memoria de forma.

1.1.1 Introducción a las AMF

Los continuos y diversos avances tecnológicos han traído consigo la necesidad de desarrollar nuevos y diversos materiales que cubran las necesidades de los nuevos diseños y que a su vez, promuevan la simplificación de los mismos, en este sentido los así llamados materiales con memoria de forma (MMF) ó aleaciones con memoria de forma (AMF), están demostrando tener un gran potencial para estos fines debido a que presentan comportamientos y efectos distintos a los materiales convencionales. Dichos efectos han sido estudiados durante ya varias décadas teniendo como resultado que actualmente se tengan aplicaciones en diversos sectores industriales, principalmente de base de Ni-Ti, las cuales nos dan una nueva gama de posibilidades que van desde el diseño de nuevos dispositivos y simplificación de mecanismos ya diseñados por parte de la industria automotriz y aeroespacial, hasta el desarrollo de prótesis óseas en las ciencias bio-ingenieriles. Sin embargo, es también conocido que no se ha avanzado en mas aplicaciones debido principalmente a que el comportamiento mecánico es no lineal, pero si histerético y altamente anisotrópico, lo que había limitado en gran medida las aplicaciones a escala industrial.

Estos materiales son aleaciones metálicas que después de una deformación aparentemente plástica, vuelven a su forma original tras un calentamiento y, por otro lado, éstos mismos materiales dentro de un determinado rango de temperaturas, pueden ser deformados hasta casi un 10%, volviendo a recuperar su forma original después de ser descargado, es decir, que en este proceso no sufre de deformaciones plásticas si no se sobrepasa determinado valor de esfuerzo. Estos inusuales efectos son denominados memoria de forma térmica ó efecto de memoria de forma simple y memoria de forma plástica ó súper elasticidad respectivamente. Estos efectos se deben a un cambio de fase denominada transformación martensítica termoelástica. Dado que los MMF responden de una forma peculiar a los cambios de temperatura y esfuerzo, han sido denominados “materiales inteligentes”. Es claro entonces que el potencial de aplicación de estos materiales y sus efectos asociados son de gran importancia ya que pueden ser utilizados para generar fuerzas o movimiento, así como hacer la función de sensor y actuador a la vez.

Podemos decir entonces que el efecto memoria de forma se refiere a la capacidad de ciertos materiales de “recordar una forma”, incluso después de severas deformaciones, es decir, una vez que han sido deformados a bajas temperaturas (en su fase martensítica) estos materiales permanecerán deformados hasta que sean calentados volviendo a su forma original.



1.1.2 Breve historia de los materiales con memoria de forma.

El desarrollo de estas aleaciones tiene su origen en el año de 1932, Cuando A. Olander descubrió el efecto súper elástico en una aleación de Au-Cd y, posteriormente en 1938 Greninger y Mooradian observaron la aparición y desaparición de la fase martensítica a medida que crecía y decrecía la temperatura en una aleación de Cu-Zn. Los fundamentos del efecto de memoria gobernado por el comportamiento termoelástico de la martensita son extensamente explicados una década más tarde por Kurdjumov y Khandros y también por Chang y Read en 1951. Pese a estos descubrimientos, el más importante se realizó en 1962, cuando Behuer y sus colaboradores, en el Naval Ordnance Laboratory, (Washington D.C. USA) desarrollaron una aleación de Ni-Ti con un efecto de memoria de forma aún más acentuado que el observado en la aleación de Au-Cd y denominaron a la nueva aleación con el nombre de Nitinol (derivado de Nikel Titanium Naval Ordnance Laboratory) [1].

Este descubrimiento abrió una gran puerta a la investigación y la búsqueda de nuevas aleaciones con capacidades de memoria de forma así como al estudio de su comportamiento mecánico y sus posibles aplicaciones. Pero pese a todos los avances realizados en el descubrimiento de nuevas aleaciones metálicas con estas propiedades (actualmente existen más de 10,000, aunque sólo un pequeño número de éstas tiene un potencial de aplicación industrial) el Nitinol sigue siendo la aleación más comercial y más extendida debido a su buena estabilidad al someterla a ciclos de trabajo, biocompatibilidad, resistencia a la corrosión y capacidad de recuperar grandes deformaciones.

La primera aplicación a gran escala de las AMF se da en 1971, cuando se diseñó un conector para una conexión hidráulica hecha de titanio en el helicóptero Grumman F-14. Éste es un ejemplo clásico de cómo las AMF pueden ser aplicadas a las necesidades de un mercado real a gran escala. La decisión de hacer las tuberías hidráulicas de titanio fueron su alta resistencia y el aligeramiento de peso que se obtiene usándolo, pero se presentaron problemas al momento de diseñar un conector fiable para la carga de combustible, para el efecto la compañía Thermofit® desarrolló un conector a base de polímeros, pero era poco confiable, por lo que la compañía Cryofit® desarrolló sus conectores de Ni-Ti, los cuales se acoplaban al tubo a temperatura ambiente y se desacoplaban cuando se les enfriaba con nitrógeno líquido, con lo cual Cryofit® logró colocar a las AMF como una alternativa de solución confiable y económicamente factible (aunque aún muy costosa para el uso general) para resolver el problema de carga de combustible en aeronaves de uso militar[1].



Gracias a esto, las AMF encontraron su primer nicho comercial en el ámbito de la defensa de los E.U.A. con lo que, aparte de desarrollar conectores hidráulicos, comenzaron a desarrollar conectores eléctricos, que a pesar de los altos costos, tuvieron un buen nivel de aceptación.

A principio de la década de los 80's, Algunas compañías japonesas comenzaron a desarrollar nuevas aplicaciones para el Nitinol, presentando innovaciones en los sistemas de aire acondicionado y en los alambres de soporte para sostenes femeninos, las Universidades Japonesas vieron con gran interés estos desarrollos tecnológicos por lo que comenzaron a desarrollar proyectos de investigación que tenían como objetivo alcanzar un mayor entendimiento del comportamiento de las AMF así como la búsqueda y desarrollo de nuevas aleaciones que tuvieran un potencial comercial (aunque hasta la fecha ninguna ha superado al Ni-Ti en cuanto a su potencial de aplicación). Posteriormente se desarrollaron alambres para los frenos de ortodoncia y otras aplicaciones médicas, la mayoría de las veces debido a su comportamiento súper elástico y en algunas ocasiones por el efecto de memoria de forma. En esta rama, la utilización de las AMF en especial del Ni-Ti, fue creciendo rápidamente debido a que era económicamente factible, a la biocompatibilidad, y a que permitía realizar procesos quirúrgicos menos invasivos que mediante métodos convencionales, llegando a ser el área medica la rama de aplicaciones más extensa para las AMF y generando la mayor parte de la demanda en el mercado de dichas aleaciones.

La industria aeroespacial ha ocupado componentes hechos con AMF durante las últimas dos décadas, por la alta resistencia de los materiales, por la reducción de peso en los componentes y por la simplificación de los mecanismos que se ha podido lograr, en especial en los mecanismos de despliegue de paneles solares y en la fabricación de antenas autodesplegables.

En la actualidad, se busca desarrollar dispositivos que diversifiquen la aplicación de éstas aleaciones, un claro ejemplo de esto es el desarrollo de termoactuadores hechos de AMF, los cuales permiten simplificar el mecanismo de los mismos y reducir su costo así como diversos actuadores termomecánicos para cubrir las necesidades de industrias de diversos tipos, pero debido a la complejidad que implica el poder predecir con una alta precisión el comportamiento de las AMF y a que en la mayoría de los casos un ligero cambio en su composición química puede generar un cambio de comportamiento radical en las mismas, ha resultado altamente costoso aplicar dichos desarrollos a la industria, sin embargo, en la actualidad empresas y universidades de los países de primer mundo están trabajando en el desarrollo de nuevas AMF e investigando los factores que afectan a estas aleaciones debido a que poseen un alto potencial de aplicación y sin duda en el futuro cercano las AMF estarán mucho más presentes en la tecnología cotidiana.



1.1.3 Transformación martensítica.

En las AMF ocurre una transformación martensítica tipo termoelástica, es decir, una transformación displaciva de primer orden, constituida principalmente por una deformación de corte [2]. Dicha transformación puede ser inducida por esfuerzos, enfriamiento o combinación de ambos y es la causante de que dichas aleaciones posean características tan únicas como lo son, la súper-elasticidad, el simple efecto de memoria de forma, el doble efecto de memoria de forma inducido, los cuales se describen brevemente a continuación:

- El efecto súper-elástico consiste en que el material estando a una temperatura por encima de la crítica y sometido a esfuerzos, es capaz de experimentar deformación (recuperable después de quitar la carga) de hasta 100 veces mayor que la que pueden experimentar los materiales convencionales.
- El efecto de memoria de forma simple es la habilidad del material de recuperar grandes deformaciones aparentemente plásticas inducidas mecánicamente (hasta el 10% en algunas aleaciones), mediante moderados incrementos de temperatura.
- El doble efecto de memoria de forma inducido consiste en que el material sujeto a una carga constante, toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura entre dos temperaturas críticas.

El doble efecto de memoria de forma es esencialmente el mismo que en el caso anterior, es decir, el material toma dos formas predeterminadas al variar la temperatura, sólo que en este caso no se aplica carga alguna. Dicho efecto se obtiene después de que el material es sometido a un proceso termo-mecánico llamado educación [3].

Estos efectos se deben a que la transformación martensítica en las AMF es reversible, es decir, que puede existir tanto la transformación de austenita a martensita y viceversa.

Para poder describir brevemente algunos aspectos termodinámicos de la transformación martensítica se definen las temperaturas de transformación de la siguiente manera:

M_s : Temperatura de transformación martensítica inicial.

M_f : Temperatura de transformación martensítica final.

A_s : Temperatura de transformación austenítica inicial.

A_f : Temperatura de transformación austenítica final.

Cuando la AMF esté sometida a una temperatura Mf o por debajo de ésta, la AMF está completamente en la fase martensítica, mientras que si se encuentra sometida a una temperatura Af ó superior a ésta, el material sufre un paulatino cambio de fase y la AMF está totalmente dentro de la fase austenítica, cuando la aleación se encuentra entre éstas dos temperaturas, existen las dos fases en diferente porcentaje según la temperatura esté más cercana a Af ó Mf . En la Fig.1.1 se muestra una gráfica $f-T$ (fracción volumétrica transformada–temperatura).

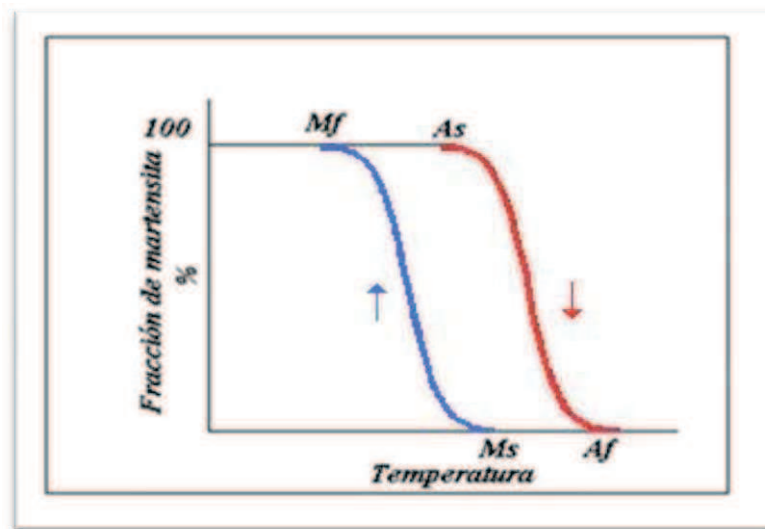


Fig.1.1) diagrama $f-T$ esquemático típico de una AMF [2]

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% [2,3].

El rango de temperaturas en donde ocurra la transformación varía según el tipo de aleación y según el porcentaje de los componentes que ésta contenga, por lo general, se busca que las aleaciones tengan una temperatura Af lo más baja posible, con el objetivo de que el material necesite la menor cantidad de temperatura posible para lograr la transformación a austenita.

La Fig.1.2 muestra el diagrama esquemático de equilibrio de fase de una aleación de xy , en el cuál se puede observar que hay un porcentaje de “ x ” en el cual, se puede obtener la composición xy a una temperatura más baja que en otras composiciones, a este punto marcado en la figura con línea punteada se le denomina eutectoide y es de suma importancia conocer este punto para una AMF ya que sirve como un parámetro para determinar el comportamiento de dicha aleación. En dicha figura “ X ” y “ Y ”

representan los componentes de una aleación, mientras que “a” representa un determinado porcentaje de uno de los componentes [4].

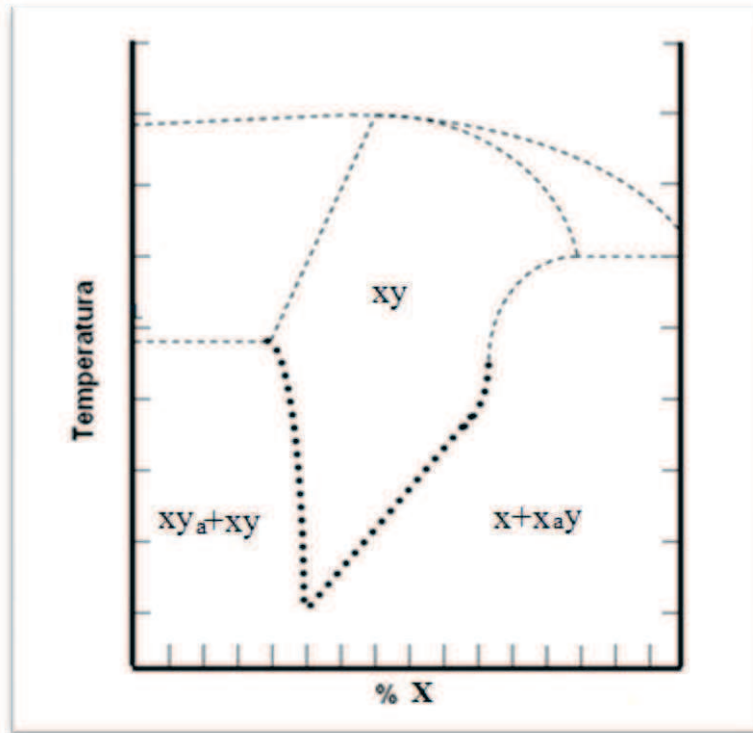


Fig1.2. Punto eutectoide en un diagrama de equilibrio de fases esquemático [4].

En el caso de la aleación de Ni-Ti, el porcentaje anteriormente mencionado es el que presenta una temperatura A_f más baja, por lo tanto, es la que requiere menos temperatura para llevar a cabo la transformación, es por esta razón que es la más explotada comercialmente.

Debido a que la transformación martensítica no está asociada con cambios en la composición, la energía libre de Gibbs de ambas fases está en función de la temperatura y se representan esquemáticamente en la Fig.1.3 Donde T_0 representa el equilibrio termodinámico de la temperatura entre ambas fases, $\Delta G^{P,M}$ representa la energía necesaria para la nucleación de la martensita, donde G^M y G^P son la energía libre de Gibbs en la fase austenítica y martensítica respectivamente, ΔG representa a la energía libre de Gibbs y está dada por la ecuación 1.1[5].

$$\Delta G = \Delta G_c + \Delta G_s + \Delta G_e \quad (1.1)$$

Donde ΔG_c es la energía química originada por el cambio estructural durante la transformación, ΔG_s es la energía superficial liberada durante el cambio de fases, ΔG_e es la energía liberada durante la transformación martensítica.

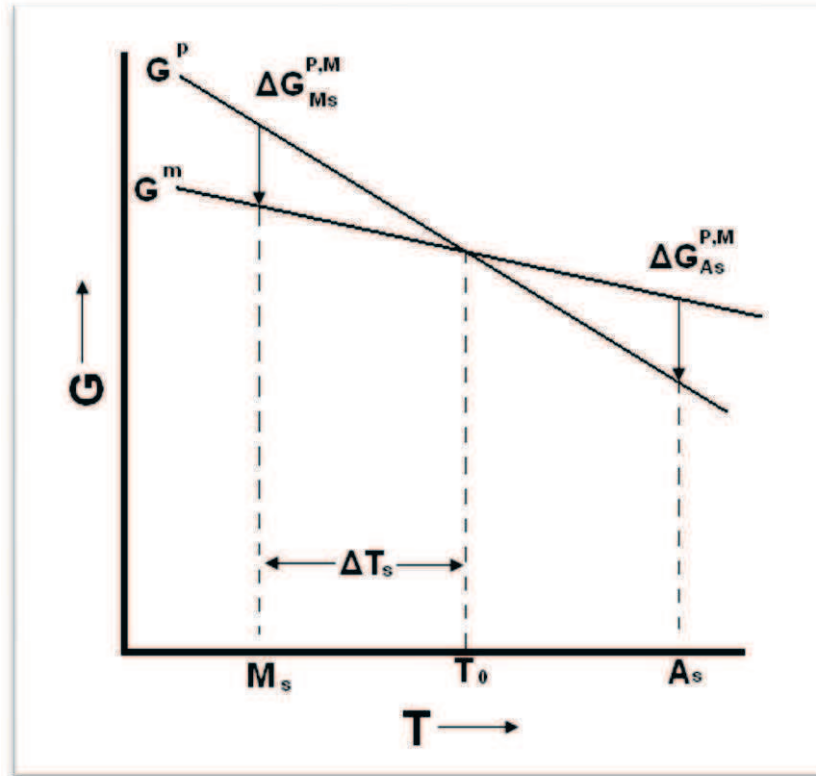


Fig1.3 Diagrama esquemático de la temperatura contra la energía libre de Gibbs para las fases austenítica y martensítica en una AMF [5].

1.1.4 Tipos de transformación

En el estado sólido existen dos tipos de transformaciones: difusional y displaciva. La transformación difusional surge cuando para formar una nueva fase existe un movimiento aleatorio de los átomos a distancias relativamente grandes, con un cambio en la composición química. Por otro lado, cuando se tiene una transformación displaciva los átomos se mueven de forma ordenada desplazándose distancias menores al parámetro de red, es decir no existe cambio en la composición química. Es evidente entonces que la transformación martensítica pertenece al segundo tipo de transformación, debido a que los materiales con memoria de forma presentan una transformación de martensita a austenita y viceversa es decir de sólido a sólido. A continuación se presenta un resumen de dichas transformaciones en el estado sólido.

1.1.4.1 Transformación por difusión.

La transformación por difusión se lleva a cabo generalmente en los cambios de estado de la materia, es decir, cambios de sólido a líquido, líquido a gaseoso, sólido a gaseoso etc. y son llamadas transformaciones por difusión o transformaciones difusivas debido a que se da una migración atómica de grandes proporciones, lo cual conlleva a los átomos a viajar distancias relativamente grandes para formar las estructuras de la nueva fase. Dicho tipo de transformación no es instantánea, sino que lleva tiempo el poderla alcanzar aún bajo condiciones estables de temperatura y presión, porque es necesaria una cierta cantidad de energía para que el cambio de fase pueda presentarse, dicha energía la conocemos con el nombre de calor latente.

Calor latente de fusión o calor latente, es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado, de sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gaseoso (calor latente de vaporización). Al cambiar de gaseoso a líquido y de líquido a sólido se devuelve la misma cantidad de energía.

Latente en latín quiere decir escondido, y se llama así porque, al no cambiar la temperatura durante el cambio de estado, a pesar de añadir calor, éste se quedaba escondido. La idea proviene de la época en la que se creía que el calor era una sustancia fluida denominada Flogisto. Por el contrario, el calor que se aplica cuando la sustancia no cambia de estado, aumenta la temperatura y se llama calor sensible.

El agua tiene calor latente de vaporización más alto ya que, para romper los puentes de hidrógeno que enlazan las moléculas, es necesario suministrar mucha energía y el segundo más alto de fusión. [6].

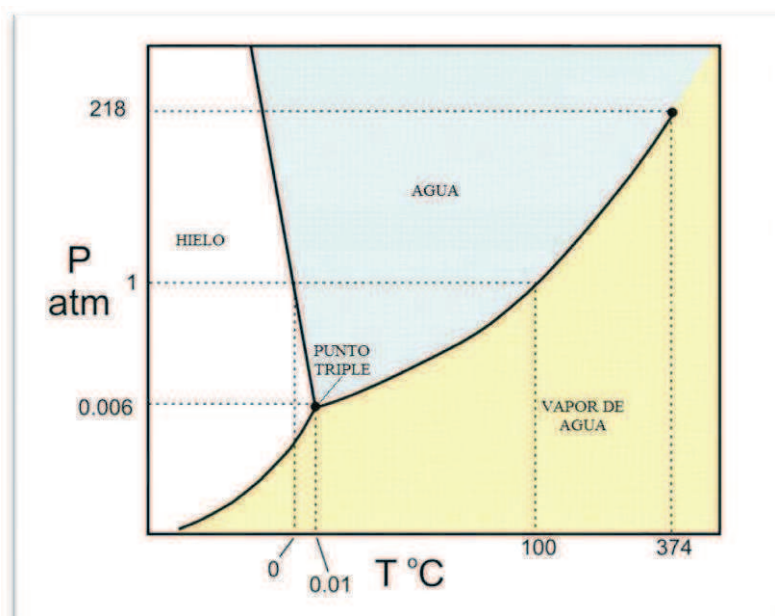


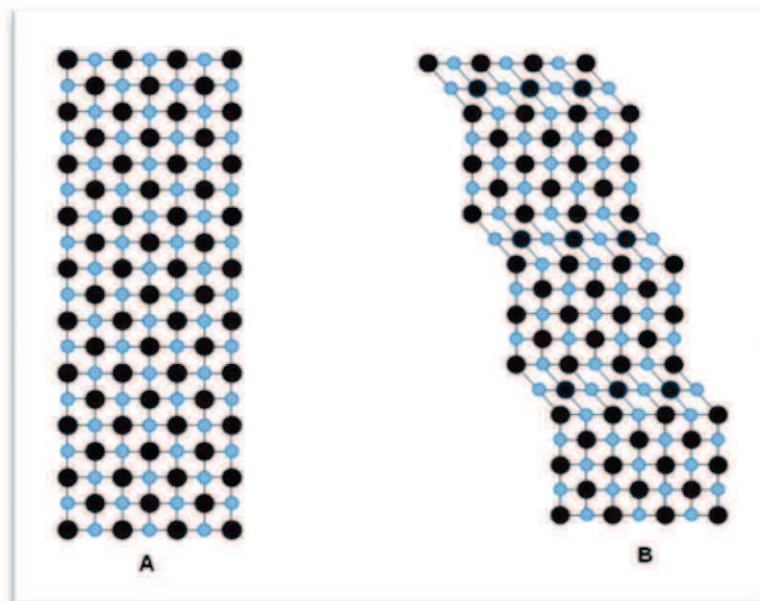
Fig. 1.4 Diagrama de equilibrio de fases del agua.

En la Fig.1.4 se muestra el diagrama de fases del agua, en el cual se puede apreciar que a 0.01°C y a 0.006 atm de presión se encuentra el punto triple, en el cuál las tres fases del agua coinciden, y por lo tanto, el agua puede pasar de un estado a otro con suma facilidad, mientras que a 100°C y 1 atm de presión, el agua puede pasar de líquido a vapor por evaporación o de vapor a líquido por condensación, así mismo, como lo marcan las líneas punteadas, a 1 atm y 0°C se encuentra el punto de congelación del agua. Las líneas del diagrama nos indican que variando la presión y/o la temperatura podemos encontrar distintas fases.

1.1.4.2 Transformación Displaciva

Podemos decir que la transformación martensítica es displaciva, es decir los átomos sufren un desplazamiento muy corto, lo que ocasiona que haya un desplazamiento de los planos atómicos (en el caso de las AMF, dicho desplazamiento es reversible) en las estructuras cristalinas, es por esto que en la transformación por desplazamiento no existen fases intermedias sino que la transformación ocurre de manera directa.

Este tipo de transformación ocurre tremendamente rápido y es el tipo de transformación que se presenta en la transformación martensítica, teniendo como velocidad máxima de transformación la velocidad del sonido, es debido a esto que a diferencia de la transformación en aceros, estas aleaciones presentan pliegues similares a los de un acordeón. En la Fig.1.5 se muestra como se acomodan las estructuras cristalinas cuando se da el cambio de fase por desplazamiento [2,7].



Fig,1.5) a) diagrama esquemático de la estructura atómica en fase austenítica de una AMF
b) diagrama esquemático de la estructura atómica en fase martensítica de una AMF



Por lo tanto la transformación martensítica ha sido definida como una transformación displaciva de primer orden, la cual se constituye por una deformación de corte, por tanto se lleva a cabo sin difusión atómica, con movimientos menores al parámetro de red, la cual se forma al enfriar una fase a alta temperatura desde una fase madre llamada austenita. Son, además, transformaciones de primer orden por presentar discontinuidades en las primeras derivadas de sus potenciales termodinámicos como son: entalpía, entropía, etc. Presentan una entalpía de transformación, una histéresis asociada a esa transformación y hay un rango de temperatura en el que existen austenita y martensita juntas [2].

1.1.5 Comportamiento mecánico de las AMF.

Se ha observado que si se le aplica un esfuerzo uniaxial a una muestra de una aleación con memoria de forma, éste siempre trae como consecuencia una transformación martensítica en el material, y que el esfuerzo crítico (σ_c) necesario para dicha transformación depende de la temperatura a la que se encuentre la aleación y de la orientación de dicho esfuerzo con respecto a los granos de la muestra sometida, por lo que el esfuerzo crítico de transformación no es constante.

En la Fig.1.6 se muestra un esquema del diagrama esfuerzo-deformación, en el cual se aprecia el lazo súper-elástico típico de las AMF cuando son sometidas a un ciclo de carga y descarga cuando se encuentran a una temperatura mayor que A_f . En este esquema se puede apreciar cómo la deformación aplicada al material por un esfuerzo crítico σ_c es aparentemente plástica, sin embargo, al quitar la carga que provoca dicho esfuerzo la deformación de la muestra es totalmente recuperada, este fenómeno sólo se presenta dentro de ciertos rangos de temperatura y esfuerzo, a pesar de estas limitantes el efecto súper-elástico es uno de los motivos por los cuales las AMF comienzan a ser cada día más demandadas para aplicaciones industriales.

El que el efecto súper-elástico se presenta únicamente a temperaturas mayores a A_f se debe a que el esfuerzo σ_c induce en la muestra una transformación martensítica la cual permite un gran deformación ϵ_o , que llega a ser hasta 100 veces mayor que en materiales convencionales. Se sabe que el acero puede deformarse elásticamente hasta en un 0.1% mientras que en muestras monocristalinas de AMF se ha reportado una deformación elástica de hasta el 10% [8].

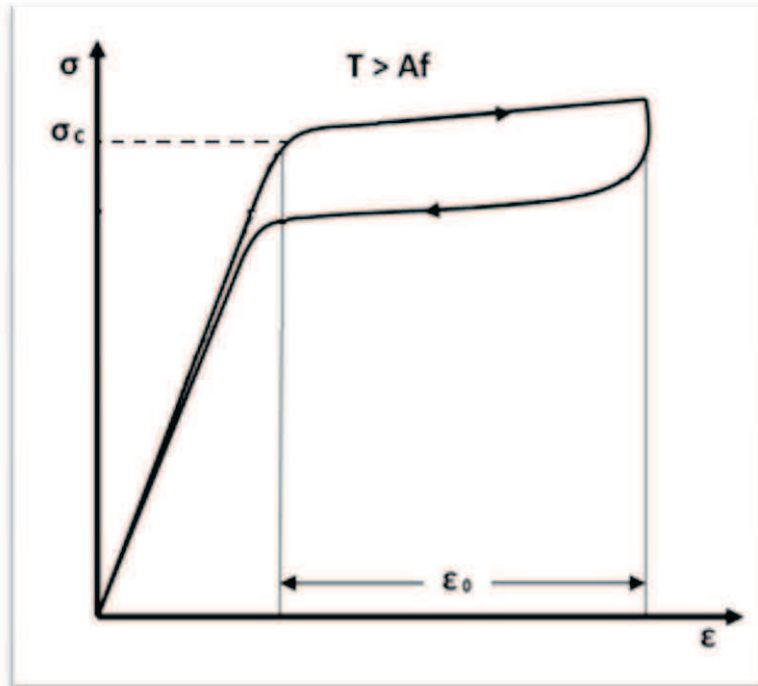


Fig1.6. Diagrama esfuerzo- deformación esquemático dode se muestra el lazo superelástico que presentan las AMF en general.

Uno de los métodos más utilizados para analizar el efecto que tienen los esfuerzos uniaxiales en la transformación martensítica en las AMF es la relación de Clausius-Claypeyron la cual describe la relación de los esfuerzos uniaxiales de la siguiente manera:

$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\Delta S}{\epsilon} = -\frac{\Delta H^*}{\epsilon T} \quad (1.2)$$

Donde σ es el esfuerzo uniaxial, ϵ es la deformación provocada por el cambio de fase y esta depende a su vez de la orientación cristalina, ΔH^* es la entalpía de la transformación por unidad de volumen, ΔS la entropía de transformación por unidad de volumen, esta ecuación se utiliza generalmente para obtener temperaturas de equilibrio, pero también funciona para poder determinar M_s , donde T es la temperatura de transformación. El valor de la razón de esfuerzos, la entalpía de transformación, y la deformación transformacional son distintos para cada tipo de TM que se presenta en cada AMF [5].

Cabe mencionar que hay una histéresis relacionada a la transformación inducida por el esfuerzo uniaxial aplicado, esto se debe a la fricción entre las microestructuras del material, dicha histéresis debe ser tomada en cuenta al momento de realizar el diseño de dispositivos con AMF.

Para el caso de que la TM se presente por un efecto combinado de esfuerzo y temperatura, el comportamiento de la AMF mostrará variaciones conforme varíen estos dos parámetros, así mismo varía su comportamiento en caso de que la temperatura sea constante y el esfuerzo variable o viceversa, este comportamiento se muestra esquemáticamente en el diagrama de la Fig.1.7 en la cual se muestran los tres casos antes mencionados.

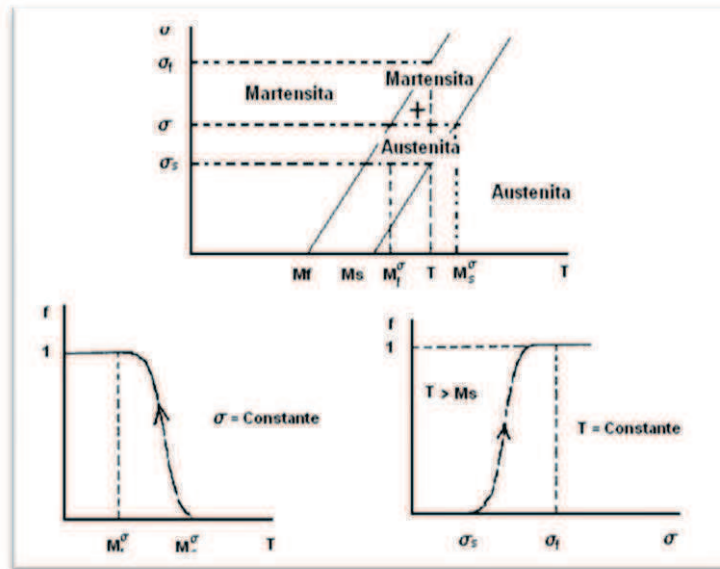


Fig.1.7. Diagrama temperatura-esfuerzo-transformación de una AMF [3].

En este caso, σ_s es el esfuerzo donde comienza la transformación martensítica, σ_f es el esfuerzo donde termina la transformación martensítica, cuando el esfuerzo es constante (σ), la transformación de austenita a martensita se da gracias a la disminución de la temperatura, mientras que, si la temperatura T es constante, la transformación se da por el incremento del esfuerzo, en el caso de que los dos parámetros antes mencionados sean variables, no existe un valor fijo de temperatura de transformación ó de esfuerzo que la provoque, sino que, éstos parámetros variarán uno en función del otro y viceversa [3,9].

El diagrama de la Fig.1.7 es sólo esquemático, ya que dicho diagrama es mucho más complejo y varía según el tipo y el porcentaje de la aleación, ya que las AMF presentan distintas transformaciones en determinados rangos de temperatura, alguna de estas aleaciones llegan a presentar transformaciones sucesivas del tipo martensita-martensita.

1.1.5.1 Pseudoelasticidad y superrelacividad.

Cuando se aplica una carga a una AMF, ésta puede deformarse aparentemente, y al calentarla, recupera su forma original, a esto nosotros lo llamamos efecto pseudoelástico, mientras que si el material sufre una deformación mayor del 1% al

aplicar la carga, y, al quitar la carga aplicada éste recupera su forma original sin necesidad de llegar a una temperatura M_f , estamos hablando del efecto superelástico. Al hablar de esto es evidente que hablamos de un mismo fenómeno en general al que llamamos pseudoelasticidad, dentro del cual identificamos como superelasticidad al rango donde la recuperación de la deformación es total, ésta característica está determinada por el porcentaje de la aleación, por la temperatura a la cual se realice la prueba y por la carga que se induzca en ella, a continuación, en la Fig.1.8 se muestra un diagrama Temperatura-esfuerzo-deformación, en el cual se muestra el lazo superelástico y el efecto de memoria de forma en el cual queda energía dentro del material, energía que se denomina energía de deformación, y la cual es liberada cuando la transformación de martensita a austenita ocurre [3,10].

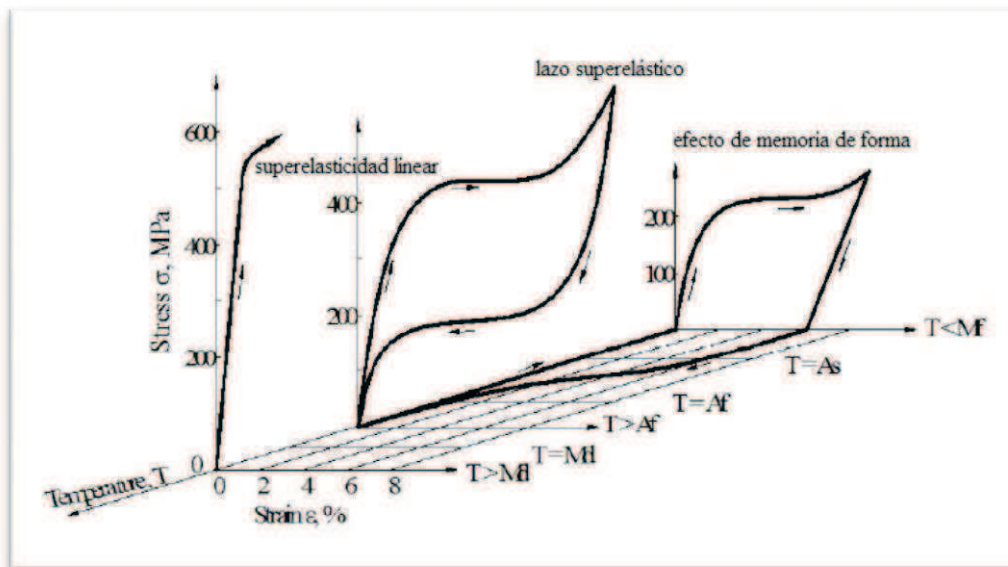


Fig. 1.8. Diagrama de la relación T, σ, ϵ de una SMA [10].

1.1.5.2 La anisotropía mecánica en las AMF

La anisotropía mecánica se describe como el cambio de las propiedades mecánicas de un material según la orientación de su estructura con respecto a la dirección de la fuerza aplicada. Es bien conocido que los materiales poseen anisotropía mecánica pero se considera nula en la mayoría de los materiales convencionales como en el caso del aluminio y los aceros, dicha anisotropía es tan pequeña que estos materiales son considerados en forma ideal como isótropos. En el caso de las AMF esto no ocurre de la misma manera, las AMF son aleaciones que poseen un alto grado de anisotropía mecánica, y dicha característica está presente aun en las aleaciones más comerciales y utilizadas, tales como Ni-Ti o Cu-Al-Be [11].



Es bien conocido que los materiales convencionales obedecen la ley de Hooke siempre y cuando se encuentren dentro de su límite elástico, dicha ley según la teoría de elasticidad se representa de forma general y desarrollada como:

$$\sigma = [C]\epsilon \quad (1.3)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} & c_{17} & c_{18} & c_{19} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} & c_{27} & c_{28} & c_{29} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} & c_{37} & c_{38} & c_{39} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} & c_{47} & c_{48} & c_{49} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} & c_{57} & c_{58} & c_{59} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} & c_{67} & c_{68} & c_{69} \\ c_{71} & c_{72} & c_{73} & c_{74} & c_{75} & c_{76} & c_{77} & c_{78} & c_{79} \\ c_{81} & c_{82} & c_{83} & c_{84} & c_{85} & c_{86} & c_{87} & c_{88} & c_{89} \\ c_{91} & c_{92} & c_{93} & c_{94} & c_{95} & c_{96} & c_{97} & c_{98} & c_{99} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{yx} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{zy} \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Donde σ es el tensor de esfuerzos, ϵ es el tensor de deformaciones y C el tensor de constantes elásticas. Dicha expresión es utilizada en mecánica de materiales de la forma más reducida posible debido restricciones como la simetría entre los tensores de esfuerzo y deformación, consideraciones energéticas así como condiciones de simetrías de las estructuras cristalinas, tales restricciones van disminuyendo el número de constantes elásticas hasta llegar a las denominadas constantes de Lamé ν y E donde ν es el modulo de Poisson y E el Módulo de Elasticidad o de Young. Así mismo para el caso uniaxial la ley de Hooke se representa como [12]:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{AE} \quad \text{ó} \quad \sigma = E\epsilon \quad (1.5)$$

La Fig.1.9 muestra una representación esquemática de una gráfica de la relación σ - ϵ en base a un material convencional, en ella podemos apreciar la zona elástica, la elástico-plástica y la zona plástica. En la zona elástica el material se puede recuperar de una deformación provocada por una fuerza determinada, en la zona elástico-plástica el material recupera hasta cierto punto su forma original pero no del todo, y finalmente, en la zona plástica, el material es deformado irreversiblemente.

Así mismo podemos observar cómo hay una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación dentro de la zona elástica, y como dicha linealidad se pierde en cuanto el material pasa a la zona elástico-plástica.

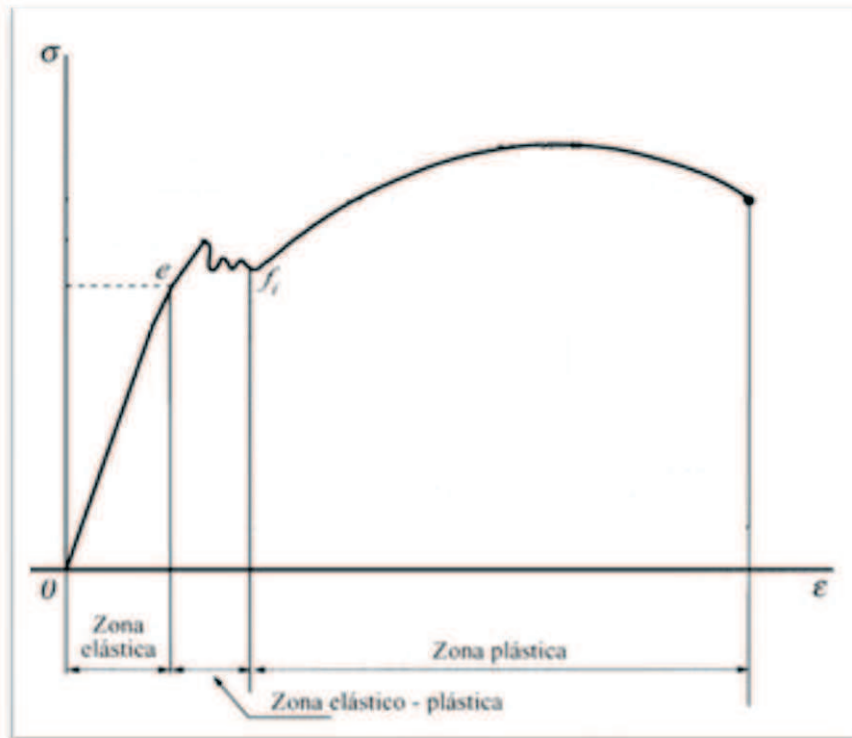


Fig.1.9 Diagrama esquemático σ - ϵ de un material convencional idealmente isotropo.

Ahora bien, en el caso de las AMF este comportamiento es muy distinto, debido al efecto súper elástico, el material entra a una zona en la cual presenta un comportamiento aparentemente plástico, pero al descargarse recupera su forma original, además, al ser materiales anisotrópicos no poseen un valor de módulo de Young constante, sino que éste cambia según la orientación del material incluso en el caso más simple como son los monocristales, sin embargo la mayoría los materiales utilizados en la industria son policristalinos, lo que hace más complicado predecir su comportamiento debido a que cada grano tiene un comportamiento distinto debido a las interacciones intergranulares entre granos vecinos lo que puede hacer que se presenten distintas variantes de martensita en cada uno de los granos, así mismo, se debe tener en cuenta que dichos materiales pueden contar con textura u orientación preferencial, lo que genera un impacto considerable en las propiedades mecánicas de los mismos dependiendo de cómo se encuentren orientadas las estructuras cristalinas del material con respecto a la orientación de la carga aplicada, dicha texturización favorece que la transformación martensítica se presente en ciertos planos de hábito de la red. Hasta la fecha se continúan realizando estudios al respecto debido a que esto se convierte en una limitante para la aplicación de las AMF en muchos de los ramos de la mecánica [14]. En la Fig.1.10 se muestra de manera esquemática los diagramas de transformación correspondientes a una muestra monocristalina de Ni-Ti.

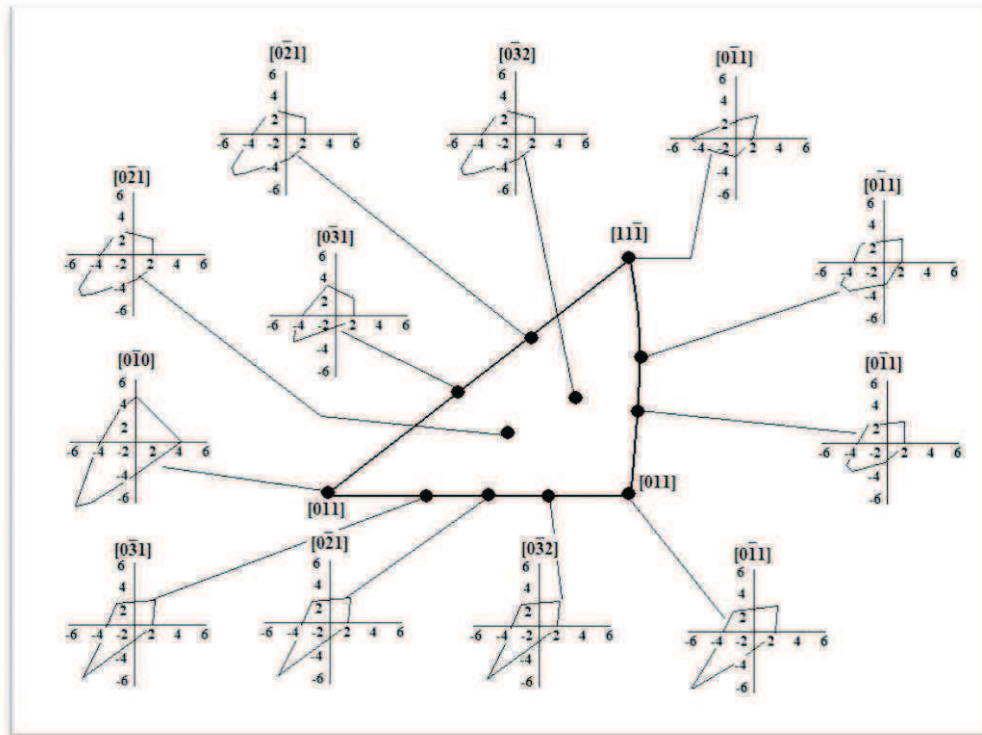


Fig.1.10. Diagramas de transformación correspondientes a una muestra monocristalina de Ni-Ti asociada con 12 orientaciones cristalinicas distintas [13].

Como se puede observar en la Fig.1.10, todos los diagramas son distintos entre sí, esto se puede considerar como un indicativo de que el material es altamente anisotrópico.

Para obtener los diagramas anteriormente mencionados es necesario conocer la orientación cristalina de la muestra, el plano y la dirección de rolado y la dirección en la cual se aplica la fuerza a la muestra.

En el caso de las muestras policristalinas, se hace mucho más difícil el poder determinar cómo va a afectar la anisotropía mecánica el comportamiento de la muestra, debido a que cada grano posee una orientación distinta respecto a la carga aplicada, esto implica que en cada grano se presentaran distintas variantes y por lo tanto, cada grano tendrá una deformación distinta a los granos vecinos y a su vez, ésta interferencia causará que existan diferencias entre el comportamiento de una muestra monocristalina y una policristalina. En pruebas realizadas a ambos tipos de muestras se ha comprobado que las muestras monocristalinas poseen un mayor efecto superelástico que las muestras policristalinas debido a las interacciones granulares.

Uno de los parámetros más utilizados para determinar cuál es la dirección en la que un grano es más propenso a la deformación debido al esfuerzo es el factor de Schmid, el cual también puede ser interpretado como el inverso del factor de Taylor para casos uniaxiales, en base al cual se obtienen los diagramas mostrados en la figura 1.10. El factor de Schmid es utilizado para saber en qué dirección tendera a fallar el material

cuando se le aplica una carga. La Fig.1.1 sirve para explicar brevemente como se obtiene dicho factor.

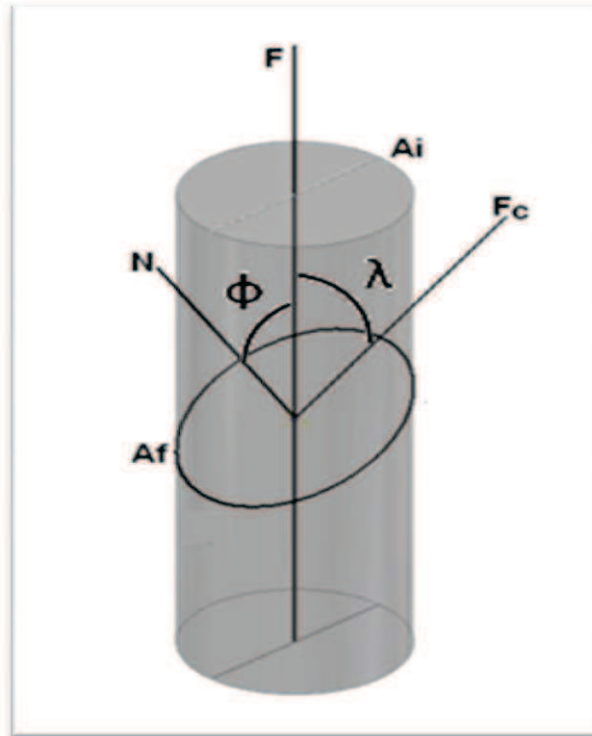


Fig.1.11. Diagrama que muestra los parámetros del Factor de Schmid [15].

De la figura anterior tomamos a F como la fuerza aplicada al material, F_c como la fuerza cortante, N como la fuerza normal a F_c , A_i y A_f como área inicial y área final respectivamente, mientras que λ es el ángulo existente entre F y F_c y ϕ es el ángulo existente entre N y F , de lo cual se deduce lo siguiente:

$$\tau_c = \frac{F_c}{A_f} \quad (1.6)$$

Donde τ_c es el esfuerzo de corte. Posteriormente:

$$\cos \phi = \frac{A_i}{A_f} \quad \text{por lo tanto:} \quad A_f = \frac{A_i}{\cos \phi} \quad (1.7)$$



$$\cos\lambda = \frac{F_c}{F} \quad \text{por lo tanto:} \quad F_c = F\cos\lambda \quad (1.8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.7) y (1.8) en la ecuación (1.6) tenemos:

$$\tau_c = \frac{F\cos\lambda}{\frac{A_i}{\cos\phi}} \quad \text{por lo tanto:} \quad \tau_c = \frac{F\cos\phi\cos\lambda}{A_i} \quad (1.9)$$

Pero como: $\frac{F}{A_i} = \sigma$ la ecuación queda como:

$$\tau_c = \sigma\cos\lambda\cos\phi = \sigma F.S. \quad (1.10)$$

Por lo tanto, $\cos\lambda\cos\phi$ es el factor de Schmid **F.S.** el cual también puede ser expresado como:

$$F.S. = \frac{\tau_c}{\sigma} \quad (1.11)$$

Con el objeto de poder expresar el factor de Schmid en términos de los índices de Miller debemos tomar en cuenta que:

$$\cos(a, b) = \frac{a \cdot b}{\|a\| \|b\|} \quad (1.12)$$

Expresando el factor de Schmid en términos de los índices de Miller se obtiene que:

$$F.S. = \left[\frac{(F \cdot F_c)(F \cdot N)}{\|F\|^2 \|F_c\| \|N\|} \right] \quad (1.13)$$

Donde:

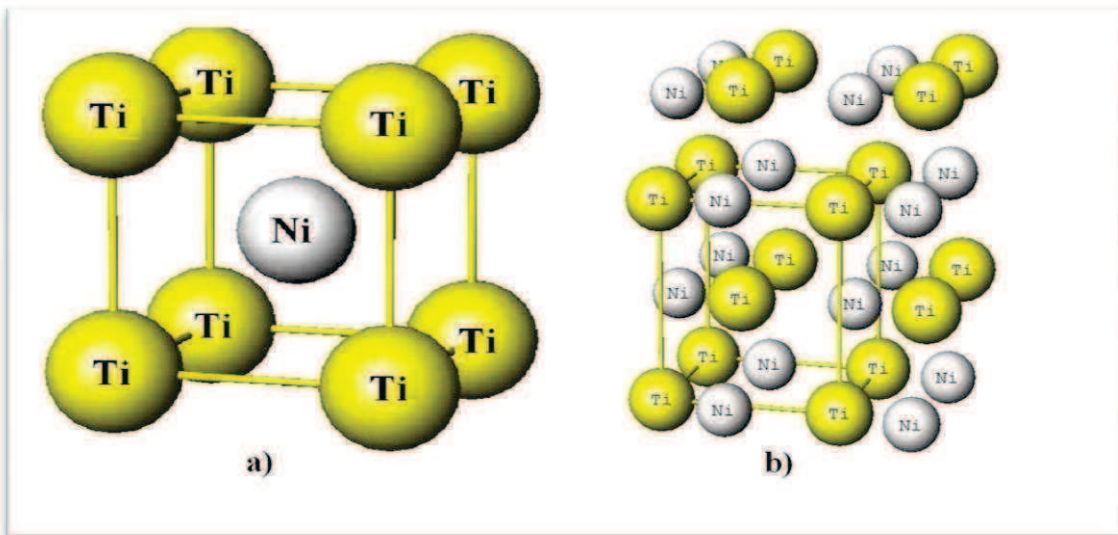
$$F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \quad F_c = \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \quad N = \begin{pmatrix} H \\ K \\ L \end{pmatrix}$$

De lo cual podemos deducir que $[F_1 F_2 F_3]$ es la orientación del eje de la carga, $[h k l]$ es la dirección de deslizamiento y $[H K L]$ es la dirección normal al plano de deslizamiento, por lo cual el Factor de Schmid queda expresado de la siguiente manera:

$$F.S. = \frac{\left[\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h \\ k \\ l \end{pmatrix} \right] \left[\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} H \\ K \\ L \end{pmatrix} \right]}{(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2) + (\sqrt{h^2 + k^2 + l^2})(\sqrt{H^2 + K^2 + L^2})} \quad (1.14)$$

1.2 Aleaciones con base Ni-Ti

En las aleaciones de Nitinol cercanas al equilibrio atómico (cercanas al 50% de Ni), el efecto de memoria de forma y la transformación de la pseudoelasticidad son fenómenos que se asocian con la transformación termoelástica de la martensita desde la fase austenítica (β) con una estructura cúbica centrada en el cuerpo (B2) a la fase martensítica con una estructura monoclinica B19', ambas mostradas en la Fig.1.12 [16].



**Fig.1.12 a) Representación grafica de la estructura B2 en una aleación de Ni-Ti en fase austenítica
b) Representación grafica de la estructura B19' en una aleación de Ni-Ti en fase martensítica**

A diferencia de otras AMF como es el caso de las aleaciones con base cobre, la transformación del Ni-Ti es una transformación de dos pasos, donde el material en fase austenítica pasa a través de de una fase de transición llamada “fase R” antes de

tomar la estructura monoclinica B19' característica del Ni-Ti en fase martensítica. El comportamiento de dicho fenómeno muestra una alta sensibilidad a parámetros como lo son el porcentaje de Níquel en la aleación, la oxidación por altas temperaturas, tratamientos termomecánicos, y a la adición de otros aleantes a la composición del material. Dicho fenómeno presenta una importancia significativa debido a que la aparición de la fase R afecta la estructura y el comportamiento del efecto de memoria de forma de las AMF con base Ni-Ti [16].

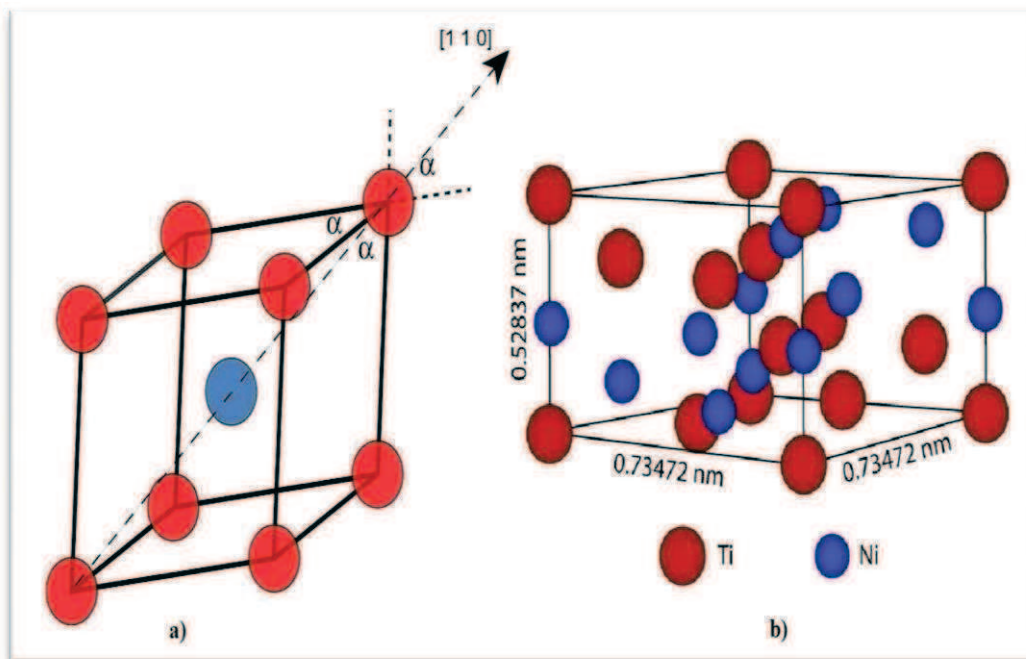


Fig.1.13 a) Representación gráfica de la estructura base de la fase R en aleaciones de Ni-Ti
b) Representación gráfica de una celda unitaria característica de la fase R en aleaciones de Ni-Ti

Se puede decir que la fase R es una distorsión romboédrica de la estructura B2 hallada en la fase austenítica, en la Fig.1.13.a) se muestra la estructura base de la fase R mientras que en la Fig.1.13.b) se muestra la celda unitaria característica de la fase R. La fase R puede ser detectada por medio de difracción de rayos X o por difracción de neutrones.

Se puede decir que la transformación de B2 a R es una transformación de primer orden, mientras que la transformación de R a B19' es de segundo orden. Como se

puede observar en la Fig1.13, en la fase R ocurre una contracción gradual de la estructura B2 a una estructura romboédrica con un ángulo α , lo que ocasiona un incremento concomitante de la deformación transformacional.



Debido a que la deformación transformacional de B2 a R es muy pequeña (del orden de 0.25 a 0.5% para aleaciones comerciales y hasta del 1% en muestras monocristalinas), y a que es altamente histerética, se busca que las aleaciones presenten éste fenómeno lo más escasamente posible y se ha encontrado que las aleaciones que no varían más allá de un 2% en su contenido de níquel presentan en menor medida este fenómeno, por esta razón son las aleaciones utilizadas para aplicaciones industriales y médicas.

En las aleaciones de Ni-Ti que se encuentran cerca del equilibrio atómico se da una transformación directa de la austenita con estructura B2 a la martensita con estructura monoclinica B19', pero si estas aleaciones reciben tratamiento de ciclado termomecánico se presenta la transformación de dos pasos anteriormente mencionada, este hecho aumenta la curva de la resistividad eléctrica vs la temperatura. Según las observaciones que se han realizado de éste fenómeno por medio de la difracción de rayos X, La transformación de la estructura B2 a la fase R puede ser considerada una transformación martensítica. Dicha transformación se presenta más fácilmente en aleaciones de Ni-Ti ricas en Níquel tratadas a una temperatura adecuada así como en aleaciones ternarias a como lo son Ni-Ti-Fe y Ni-Ti-Al [16].

La Fig.1.12 muestra la secuencia transformacional de una muestra de Ni-Ti con una composición de 50.2%Ni. Cuando la muestra es enfriada a 373K, la resistividad eléctrica comienza a incrementarse, esto coincide con la aparición de la fase R, como se muestra en la curva de resistividad eléctrica vs temperatura mostrada en la Fig1.13.a). Así mismo, esta temperatura coincide con el primer pico de la gráfica de calorimetría diferencial de barrido (CDB) mostrada en la Fig1.13.b). El comienzo del pico de aumento de la resistividad y el primer pico de la CDB coinciden dentro de un rango de 2K.

Este es uno de los métodos más utilizados para la caracterización de las AMF, debido a que existe una relación entre las temperaturas críticas de transformación con la resistividad eléctrica presentada por el material.

Esta coincidencia implica que tanto el aumento de la resistividad eléctrica como el aumento de la entalpía de transformación observado en el primer pico de la CDB son evidencia del comienzo de la fase R, la cuál es una transformación de primer orden. El segundo pico correspondiente a la CDB es debido a la transformación de la fase R a la fase B19', así mismo se observa la coincidencia del decremento de la resistividad eléctrica debida a este fenómeno [16].

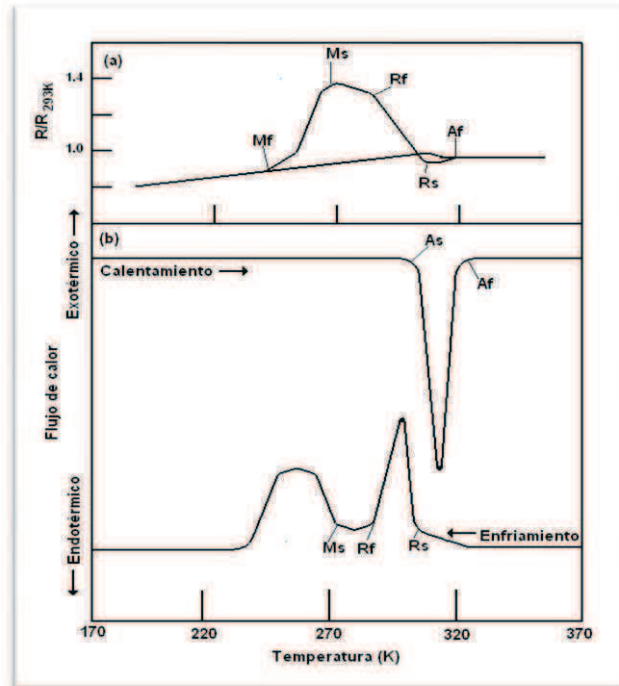


Fig.1.14 a) comparación grafica de la resistividad eléctrica contra curva de temperatura
b) CBD de una aleación de Ni-Ti con un 50.2% de Niquel [16]

Como se mencionó anteriormente, las aleaciones comerciales de titanio no varían más allá de un 2% en su contenido de Ni, en la tabla 1.1 se muestran las nomenclaturas dadas a las aleaciones comerciales de Ni-Ti y los porcentajes de Ni que contienen, así como la temperatura **Af**.

TIPOS DE ALEACIONES COMERCIALES DE Ni-Ti		
ALEACION	%Ni	Af(°C)
N	51.0	-10 a -15
S	50.8	0
C	50.8 (con 0.25% del peso en Cr)	-10 a -20
B	50.2 – 50.4	25 a 35
M	50.0 – 49.8	55 a 65
H	49.6-49.4	95 a 110

Tabla 1.1. Nomenclatura comercial, porcentaje de Ni y temperaturas Af de las aleaciones de Ni-Ti más utilizadas [10].

También existen otras aleaciones con diferente porcentaje de Ni así como aleaciones ternarias (las más comunes son de Ni-Ti-Fe o de Ni-Ti-Cu) pero dichas aleaciones no se han podido implementar en aplicaciones industriales debió a que sus efectos de superelasticidad o de memoria de forma no son los adecuados para poderlos implementar en los dispositivos, o bien por poseer un comportamiento que varía muy drásticamente a los cambios de temperatura o por la inestabilidad de su comportamiento durante las pruebas de ciclado de trabajo.

1.2.1 Diagrama de equilibrio del Ni-Ti

El diagrama de equilibrio del Ni-Ti indica los porcentajes tanto en peso como atómicos en los cuales el Ni-Ti puede existir, así mismo indica las temperaturas de cambio de fase como se puede observar en la Fig1.15.

En el aumento que se hace de la sección punteada se logra apreciar que el eutectoide para el caso del Ni-ti se encuentra en el 50% de peso atómico de contenido de níquel, por lo que podemos decir que para que podamos obtener Ni-Ti sin que éste este mezclado con otras composiciones como $NiTi_2$ o Ni_3Ti debemos buscar una aleación muy próxima al equilibrio atómico, esto es debido a que aleaciones como $NiTi_2$ y Ni_3Ti no presentan el fenómeno de memoria de forma ni el efecto superelástico. Otra característica importante de tener aleaciones de Ni-Ti muy próximas al 50%Ni es que la temperatura a la cual podemos tener esta aleación disminuye considerablemente, es por esto que las aleaciones más utilizadas a nivel comercial tan sólo varían un 2% en su composición. Cabe mencionar que en este caso el porcentaje en peso y el porcentaje atómico son muy similares, pero en otras AMF podría darse el caso contrario.

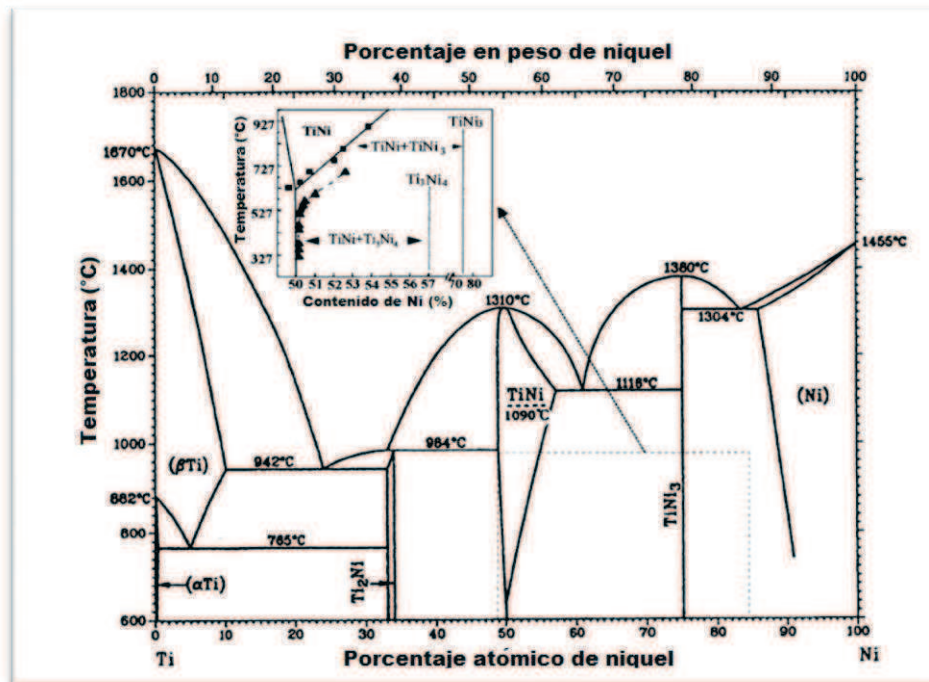


Fig.1.15 Diagrama de equilibrio para aleaciones de Ni-Ti [17]

1.2.2 Diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación del Ni-Ti

El diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación nos sirve como referencia para poder determinar la composición de la aleación que se requiere para que el dispositivo

trabaje dentro de los parámetros de diseño. Nos indica cuándo ocurrirá la transformación del material dependiendo de la temperatura y la carga de trabajo. Si podemos determinar o ya conocemos la temperatura y la carga de trabajo a la cual pensamos someter nuestro dispositivo, dicho diagrama nos ayuda a determinar el porcentaje de Ni que debe de contener la aleación para que tenga el mejor desempeño posible bajo las condiciones propuestas. En la Fig.1.16 se muestra el diagrama Esfuerzo-Temperatura-Transformación para una aleación de Ni-Ti con un 50.0% atómico de Ni.

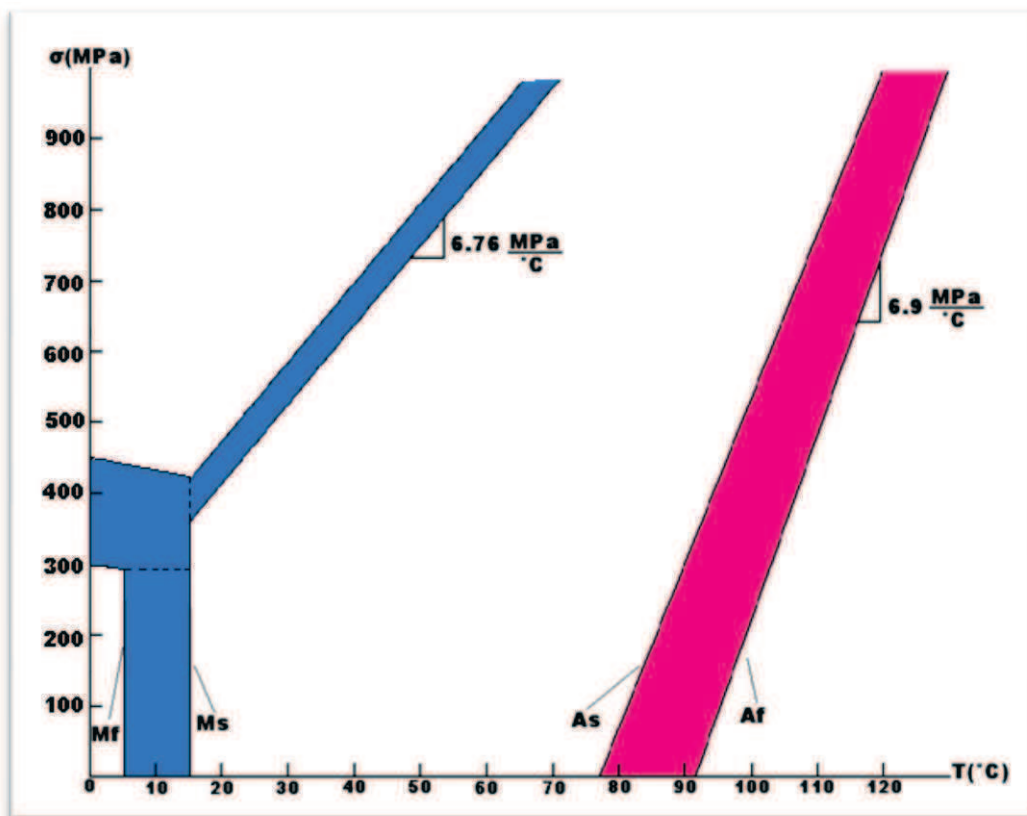


Fig.1.16. Diagrama esfuerzo-Temperatura de una aleación de Ni-Ti con un 50% atómico de Ni.

Como se puede observar en la figura, las pendientes de M_s y A_s son ligeramente distintas, los valores de dichas pendientes son los valores correspondientes de la relación de Clausius-Claypeyron para el caso de la aleación anteriormente mencionada, dichas pendientes varían muy poco en aleaciones comerciales de Ni-Ti aunque las temperaturas de transformación varían de manera más significativa.

Las aleaciones de Ni-Ti necesitan pasar por un proceso de ciclado mecánico para estabilizar sus propiedades mecánicas, este proceso es comúnmente llamado educación, cuando el material no se ha sometido a un proceso de educación se dice que el material es virgen, en la Fig.1.17 se muestra una gráfica de temperatura-esfuerzo para una aleación de Ni-Ti con un contenido de Ni del 50.8%, para muestras sometidas a ciclados a temperaturas de 20°C y 50°C.

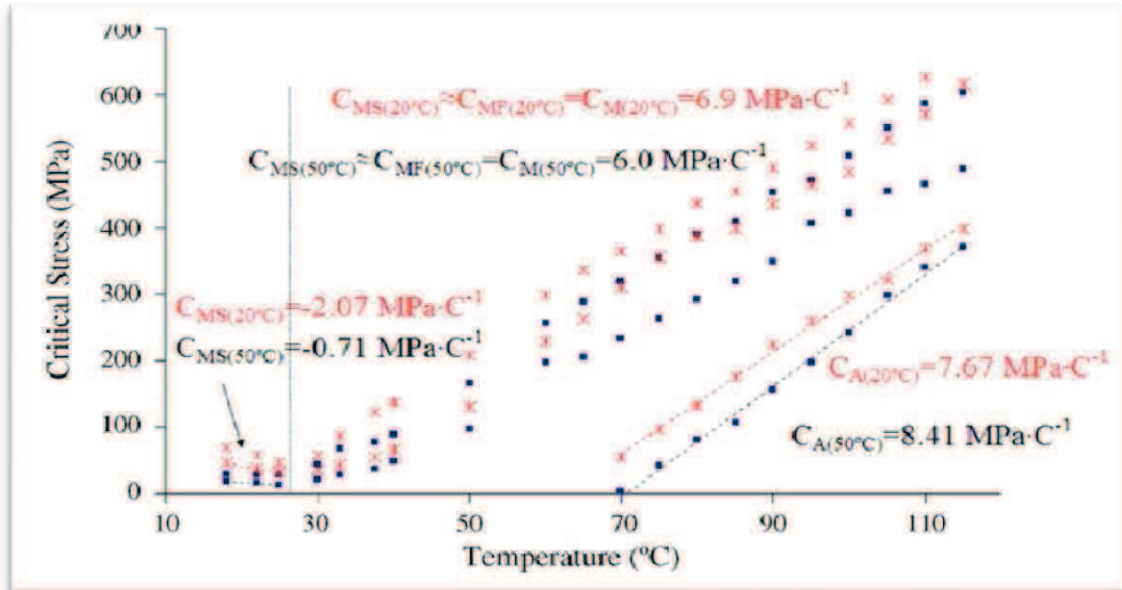


Fig.1.17. Gráfica T-σ de una aleación de Ni-Ti con un contenido de 50.8% de peso en Ni a temperaturas de 20°C y 50°C [10].

Se puede observar que, en general, las muestras cicladas a 20°C tienen un mayor esfuerzo crítico que las cicladas a 50°C pero que las pendientes de las rectas son, en general, mayores en el caso de las muestras cicladas a 50°C. No debemos olvidar que estas pendientes son la relación de Clausius-Claypeyron, así mismo estos no son valores absolutos, ya que si el porcentaje de Ni cambia, lo mismo sucederá con los valores mostrados en la figura.

1.2.3 Parámetros mecánicos de las AMF de Ni-Ti

Las aleaciones de Ni-Ti, al igual que las demás AMF poseen cualidades únicas en cuanto a su comportamiento mecánico según las condiciones a las que sea sometido y al porcentaje de su composición así como a tratamientos y recubrimientos que posteriormente se añaden al material con la finalidad de estabilizar su comportamiento o de protegerlo contra el medio ambiente. Dichos parámetros son observados en los diagramas obtenidos de diversas pruebas realizadas en laboratorios de diversas universidades y empresas relacionadas con el diseño de dispositivos de esta aleación, uno de los diagramas más utilizado para determinar los parámetros

mecánicos de una AMF es el diagrama de Temperatura-Esfuerzo-Deformación, en el cual se puede determinar las temperaturas idóneas de trabajo para una AMF. En la Fig.1.18 se muestra el diagrama anteriormente mencionado.

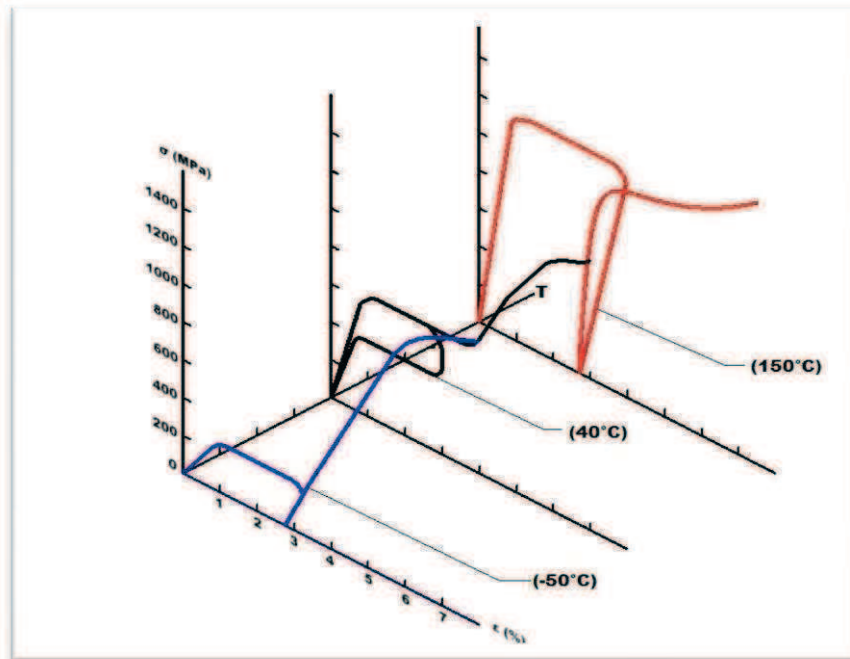


Fig.1.18. Diagramas T- σ de una aleación de Ni-Ti con un 50.4% de Ni referentes a pruebas realizadas a -50, 40 y 150°C

Este diagrama está simplificado, y se obtuvo de una serie de pruebas realizadas a una aleación de Ni-Ti con un 50.4% de Ni realizadas en la Universidad de Tsukuba, en Ibaraki, Japón, en el cuál se puede observar como a bajas temperaturas, el material requiere muy poco esfuerzo para sufrir una gran deformación sin presentar el efecto superelástico, a 40°C el material soporta casi cuatro veces más carga antes de presentar las mismas deformaciones que en el caso anterior, además se presenta el lazo superelástico, mientras que a 150°C, a pesar de que el esfuerzo crítico es mayor, ya no se presenta el efecto superelástico. Por lo general las AMF de Ni-Ti comerciales tienen una respuesta óptima en temperaturas que oscilan entre los -10°C a los 120°C [8].

Como se mencionó anteriormente, el tratamiento térmico que se le da a las AMF de Ni-Ti influye en el comportamiento mecánico de las mismas, la Fig.1.19.a) muestra el diagrama TTT para una aleación de Ni-Ti con un 50.8% de contenido de Ni, mientras que en la Fig.1.19.b) se puede observar una prueba cuyo objetivo fue determinar el cambio del esfuerzo último de tensión debido al efecto de la temperatura y el tiempo.

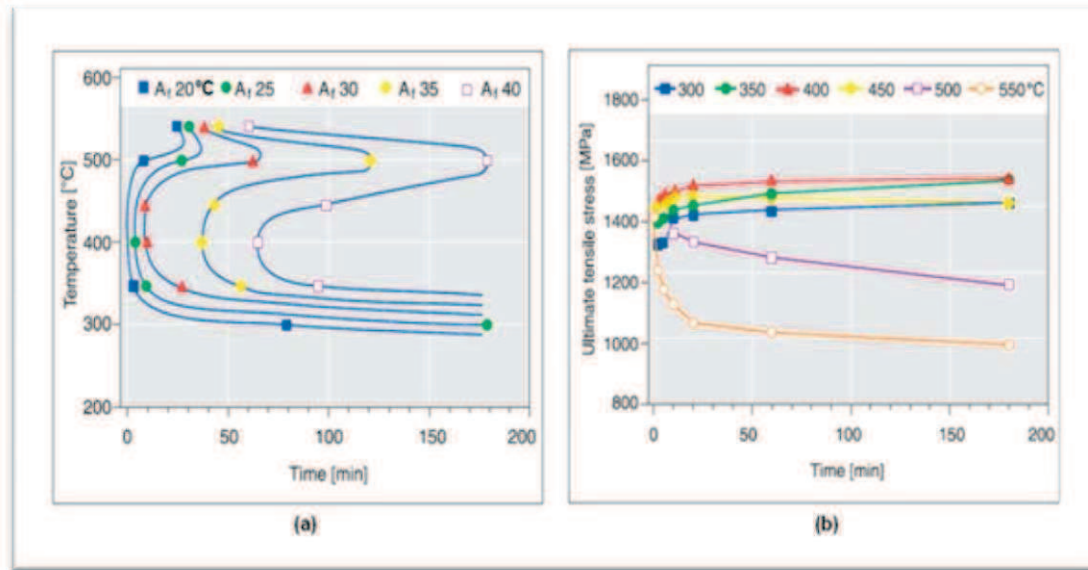


Fig.1.19 a) Diagrama TTT de una aleación de Ni-Ti con un 50.8% en peso de Ni.
b) Gráfica de esfuerzo último vs tiempo a distintas temperaturas. [8].

Según las graficas mostradas en la Fig.1.19.b el material muestra un comportamiento más estable a una temperatura de 400°C, permaneciendo casi constante un valor de esfuerzo último de tensión de casi 1600MPa.

En las AMF de Ni-Ti, al igual que en todas las demás AMF, la anisotropía mecánica altera de manera muy significativa el comportamiento mecánico del material, Oztuka encontró que para la transformación martensítica del Ni-Ti, la deformación transformacional alcanza hasta un 8% cuando la orientación del eje de aplicación de la carga es cercana a la dirección [001] y disminuye hasta un 2% cuando la carga se aplica en dirección [111] [8].

1.3 APLICACIONES UTILIZANDO MMF

Como se mencionó anteriormente, la primera y principal aplicación de las AMF a nivel industrial fue la fabricación de conectores hidráulicos diseñados para los requerimientos aeronáuticos, en estos conectores, el material es maquinado en su fase austenítica, con un diámetro interior ligeramente menor al tubo al que se va a acoplar, posteriormente el conector es enfriado con nitrógeno líquido para que el material sufra una transformación martensítica, y con esta, ocurra la expansión del diámetro interior, gracias a esta dilatación es posible introducir la tubería que se desea acoplar, y al regresar a temperatura ambiente el diámetro interior vuelve a reducirse, con lo cual oprime los tramos de tubería a acoplar, dichos conectores son estriados por lo general, con el objetivo de tener un mayor coeficiente de fricción y con ello evitar el deslizamiento entre las tuberías. La Fig.1.20.a muestra una fotografía de tuberías

hidráulicas de Ni-Al mientras los conectores son de Ni-Ti instaladas en un helicóptero, mientras que la Fig.1.20.b muestra la secuencia de acoplamiento [1].

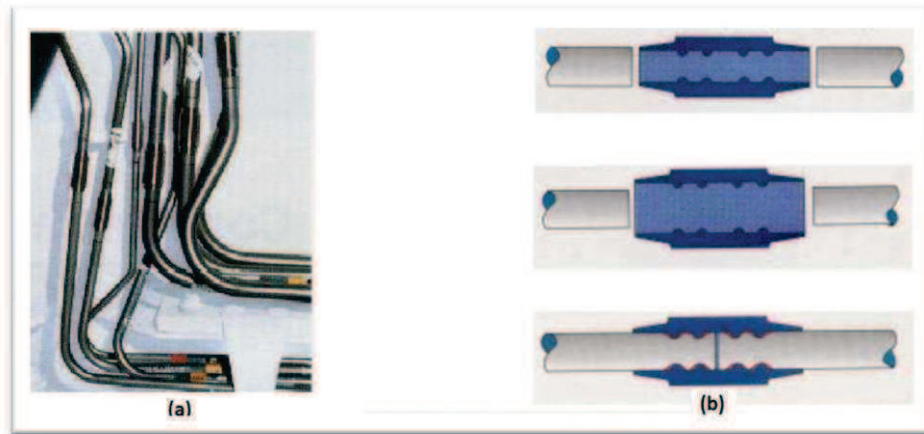


Fig.1.20 a) Tuberias hidráulicas de Ni-Al. b) Coples para tubería de Ni-Ti.

Además de los conectores hidráulicos anteriormente mencionados, las AMF han sido utilizadas para la fabricación de conectores eléctricos, dichos conectores son de forma tubular y deben soportar grandes ciclados de conexión y desconexión, los conectores de Ni-Ti, al trabajar de manera similar a los conectores hidráulicos, tienen ventajas como la de minimizar las fuerzas de inserción y maximizar la fuerza de sujeción, además, se ha probado que son altamente resistentes cuando los elementos conectados están sometidos a vibración, por ello es que los conectores eléctricos son la segunda aplicación más importante a nivel comercial a parte de las aplicaciones médicas. La Fig.1.21 muestra de manera esquemática un conector eléctrico con anillo de Ni-Ti [1].

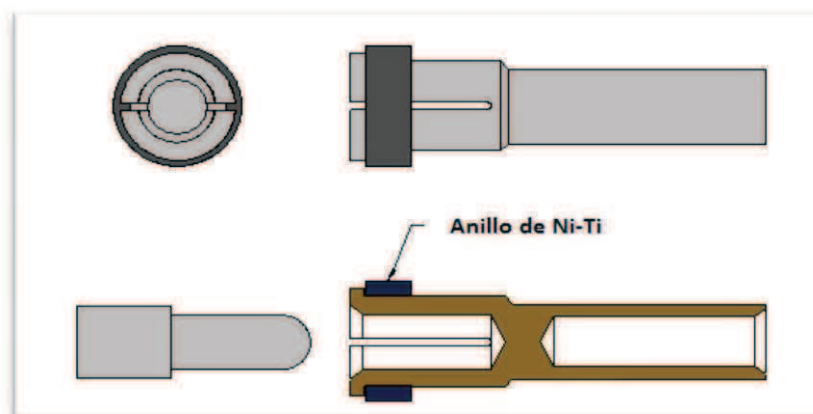


Fig.1.21. Conector eléctrico con anillo de seguridad hecho de Ni-Ti

Dentro de las aplicaciones médicas más importantes en las que las AMF han revolucionado los procedimientos médicos se encuentran los alambres de Ni-Ti

utilizados para los arcos utilizados en la colocación de brackets, estos han encontrado nicho comercial ante los arcos de acero inoxidable debido al efecto superelástico el cual facilita el ajuste del arco. En las aplicaciones médicas el Ni-Ti ha sido la AMF más utilizada debido a su biocompatibilidad. En la Fig.1.22 se muestran arcos de este material [7].

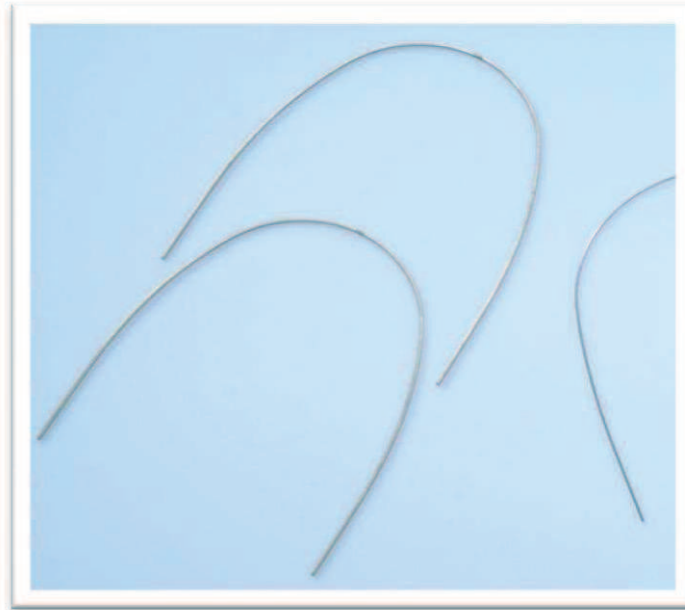


Fig.1.22. Alambre superelástico de Ni-ti utilizado para la elaboración de arcos dentales

Las AMF se han ocupado para el diseño de múltiples dispositivos para satélites y estaciones espaciales, por dos razones principales, la primera es la simplificación de los mecanismos y el ahorro de peso, la segunda es el ahorro de energía que representa tener mecanismos termomecánicos que no necesiten otra fuente de alimentación más que el calor del sol. Otra aplicación que se encuentra en desarrollo actualmente es la de ocupar las AMF como alternativa para eliminar vibraciones en estructuras aprovechando el alto nivel de histéresis y el efecto superelástico de las mismas para contrarrestar la vibración mecánica. La industria de termo-sensores y termo-actuadores está encontrando en las AMF nuevas alternativas que se antojan más eficientes y más económicas para el desarrollo de dichos dispositivos. En general, se calcula que en un periodo no mayor a 10 años las AMF (probablemente polímeros y cerámicos también) serán mucho más utilizados en la industria cotidiana como dispositivos actuadores y sensores que permitan una respuesta sensible y de mayor confiabilidad que muchos de los mecanismos convencionales hoy en día, con lo cual reducirá los costos de producir mecanismos más complejos diseñados para realizar dichas funciones. Es por esto que es de suma importancia que en nuestro país se



comience a considerar la fabricación de estos materiales y el desarrollo tecnológico de mecanismos que aprovechen sus ventajas, ya que aún estamos a tiempo de poder ser competitivos en un sector para el cual se tiene previsto un mercado potencial muy alto, ya que, de ignorar este hecho, es posible que nuestra dependencia tecnológica sea aún mayor de lo que es actualmente, y tengamos que ser consumidores de desarrollos extranjeros de los cuales podríamos dispensar.



CAPÍTULO II

PROBLEMÁTICA DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA



La problemática del agua en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es sumamente variada y compleja, dentro de la misma se encuentran interactuando problemas sociales, políticos, económicos, geológicos y tecnológicos los cuales se conjuntan dando como resultado la situación actual de escases de agua. Se dice que esta crisis ha llegado a un punto crítico similar al que se presentó en la década de 1990 con la contaminación y calidad del aire. Entre los puntos más significativos de esta problemática destacan el drástico aumento de la población en asentamientos irregulares, la poca permeabilidad del suelo de la ZMVM debido a la mancha urbana, la sobreexplotación de los pozos subterráneos así como la constante contaminación de los mismos, el daño que sufre la infraestructura de distribución de agua debido al hundimiento del suelo de la zona, la carencia de recursos para mantener y modernizar dicho sistema, y la falta de un desarrollo tecnológico propio que permita un mayor aprovechamiento del agua evitando el desperdicio innecesario de la misma.

En este capítulo se presentan datos estadísticos tomados por diversas instituciones de gobierno (INEGI, CONAGUA, IMTA), los cuales pretenden proporcionar al lector una referencia fidedigna y actualizada de cuál es la cantidad de agua que se sustrae de los acuíferos de la ZMVM, así como la distribución que se le da a el agua sustraída del mismo. A la vez se proporciona al lector las cifras de cuánta agua se recarga en los acuíferos para que así se pueda tener una idea de la gravedad de la sobreexplotación así como la urgencia de desarrollar nuevas tecnologías que permitan reducir significativamente dicho problema. El problema se vuelve aún más grave si se toma en cuenta que en esta zona se encuentra la capital del país, la cual es el centro político, económico y cultural de nuestra nación. Este hecho crea la necesidad de comenzar a desarrollar tecnologías propias las cuales nos permitan lograr un mayor aprovechamiento de nuestros recursos hídricos sin depender del desarrollo de tecnologías extranjeras, las cuales, a la larga, encarecen la modernización y el mantenimiento de nuestra infraestructura.

2.1 Demarcación de la Zona Metropolitana del Valle de México.

La Ciudad de México está ubicada en un valle en la porción sur de la Cuenca de México; este valle, situado aproximadamente a 2,400 metros sobre el nivel del mar, está rodeado de sierras de origen volcánico con cumbres que alcanzan alturas superiores a los 5000 metros sobre el nivel del mar (msn). Sus principales jurisdicciones políticas son el Distrito Federal (que alberga la capital del país), la mayor parte del Estado de México, así como porciones más pequeñas del los estados de Hidalgo, Tlaxcala y Puebla.

Dentro del Valle se ubica la ZMVM (16 delegaciones del Distrito Federal y los 18 municipios del Estado de México), con una superficie de 3,540 km², lo que representa el 37% de la cuenca del Valle de México, que cuenta con prominencias topográficas aisladas como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec, entre otros.

La Cuenca del Valle de México se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano y tiene un área aproximada de 9,000 kilómetros cuadrados. El valle, situado a una altitud cercana a los 2,400 metros sobre el nivel del mar, es el más alto de la región y se encuentra rodeado por montañas que alcanzan elevaciones superiores a los 5,000 metros. La temperatura promedio anual es de 15 grados centígrados. La mayor parte de los 700 milímetros de agua de lluvia que caen anualmente en la región se concentra en unas cuantas lluvias intensas, las cuales se presentan por lo regular de junio a septiembre; durante el resto del año las precipitaciones pluviales suelen ser escasas o nulas lo que impide que las descargas pluviales puedan ser aprovechadas en buena medida, ya que debido a la mancha urbana una buena parte de la descarga pluvial no se filtra al subsuelo, sino que es conducida al sistema de alcantarillado [18].

En la Fig.2.1 se muestran las delegaciones y municipios anteriormente mencionados, mientras que en la tabla2.1 se muestra la superficie que abarca cada delegación o municipio.

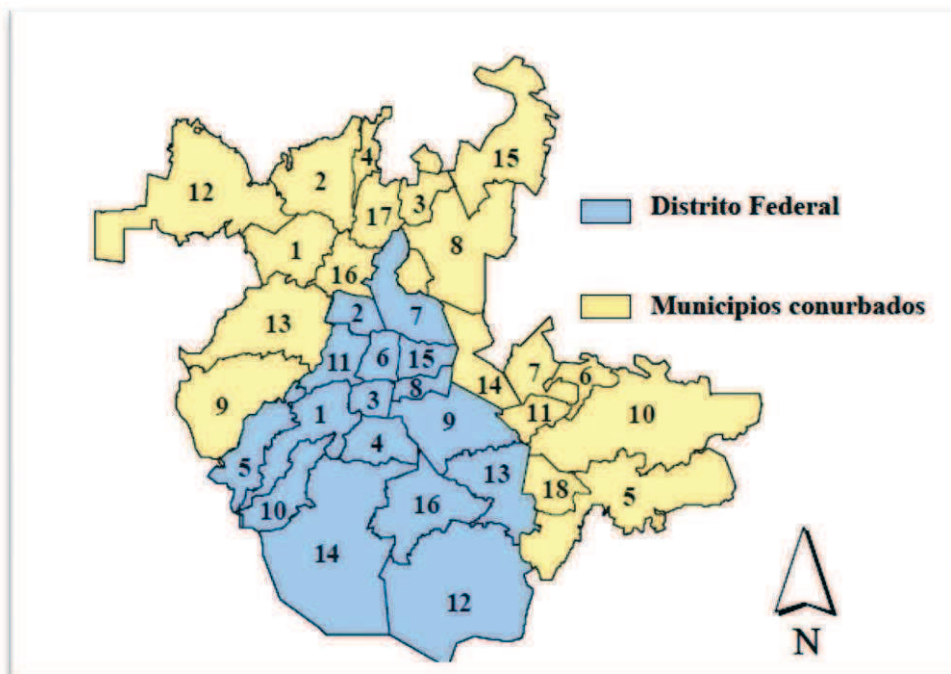


Fig.2.1 Delimitación política de la Zona Metropolitana del Valle De México.



Delegación		Superficie* (km ²)	Municipio		Superficie** (km ²)
1	Álvaro Obregón	95.9	1	Atizapán de Zaragoza	89.8
2	Azcapotzalco	33.7	2	Cuautitlán Izcalli	109.9
3	Benito Juárez	26.5	3	Coacalco	35.4
4	Coyoacán	53.9	4	Cuautitlán	37.3
5	Cuajimalpa	70.8	5	Chalco	234.71
6	Cuauhtémoc	35.5	6	Chicoloapan	60.8
7	Gustavo A. Madero	88.1	7	Chimalhuacán	46.6
8	Iztacalco	23.2	8	Ecatepec	155.4
9	Iztapalapa	113.5	9	Huixquilucan	143.5
10	M. Contreras	63.5	10	Ixtapaluca	315.1
11	Miguel Hidalgo	46.3	11	La Paz	26.7
12	Milpa Alta	287.5	12	Nicolás Romero	233.5
13	Tláhuac	86.3	13	Naucalpan	149.8
14	Tlalpan	308.7	14	Nezahualcóyotl	63.4
15	Venustiano Carranza	33.8	15	Tecámac	153.4
16	Xochimilco	119.2	16	Tlalnepantla	83.4
	Total	1,486.4	17	Tultitlán	71.08
			18	Valle de Chalco	44.5
			Total	2,054.3	

Tabla 2.1 Delegaciones y municipios que conforman la Zona Metropolitana del Valle de México y la superficie que estos ocupan. [19].

2.2 Características físicas e hidrogeológicas de la Zona Metropolitana del Valle de México.

La larga historia como centro urbano de la porción norte del valle (historia que se inicia con la capital azteca, Tenochtitlán, en el siglo XIV), da fe de su poder de atracción. La hidrología de esta región incluye un excelente sistema acuífero y un buen número de manantiales. Sin embargo, la especial localización física de la ZMVM ubicada en un valle alto y cerrado naturalmente por montañas representa un reto singular en cuanto al suministro de agua a una población urbana de gran magnitud se refiere. Además, la ciudad está situada en el lecho de un antiguo lago salino, sin un drenaje natural. Esto, aunado a un patrón de lluvias de temporal intensas, que dificultan el aprovechamiento de las mismas y a que no existen fuentes importantes de agua superficial cercanas susceptibles de ser aprovechadas junto con la fuente local del subsuelo provocan una escasez de agua en la ZMVM. Por si fuera poco, la elevación del valle provoca que la importación de agua sea una alternativa altamente costosa. Por último, la unidad arcillosa del subsuelo bajo el área metropolitana tiende a consolidarse debido al peso de los edificios, lo cual provoca un asentamiento diferencial que, combinado con la sobreexplotación de los acuíferos subyacentes, tiene por efecto el hundimiento del suelo de la región, el cual daña considerablemente las redes de distribución, lo que provoca fugas en el sistema. Esta cuenca es una depresión cerrada de manera natural, que a fines del siglo XVIII fue modificada artificialmente para controlar las

inundaciones en la ciudad. Las fuentes de recarga del agua subterránea en la cuenca se derivan, en gran medida, de las precipitaciones infiltradas y de la nieve derretida en las montañas y cerros que la rodean (que año con año es menor); este flujo se desplaza en forma de una corriente subterránea hacia las zonas menos elevadas. En su estado natural, la cuenca tenía una serie de lagos, desde los de agua dulce en el extremo superior, hasta los salados del extremo más bajo, en los que se concentraba la sal debido a la evaporación. La corriente de agua subterránea originaba numerosos manantiales al pie de las montañas, así como pozos en el valle. En la Fig.2.2 se muestra la topografía del Valle de México en el siglo XIV [18].



Fig.2.2 Mapa topográfico del Valle de México en el siglo XIV [20].

Los depósitos de arcillas lacustres superficiales cubren el 23% de las elevaciones menos pronunciadas del Valle de México. Los depósitos aparecen en formaciones divididas, por lo que se conocen como "capa dura". Compuesta principalmente de sedimentos y arena, la capa dura se localiza entre los 10 y los 40 metros de profundidad y sólo tiene unos cuantos metros de espesor. A las capas de arcillas lacustres superficiales que alcanzan una profundidad de 100 metros se les denomina acuitardos, y son considerablemente menos permeables que la capa dura o los sedimentos aluviales subyacentes. En el siglo XIX, al explotarse el agua del subsuelo por primera vez, la capa dura dio origen a los primeros pozos artesianos. Un pozo

artesiano es aquel tipo de manantial o pozo que comunica con un acuífero cautivo de agua (o petróleo), estando a nivel piezométrico.

Son denominados acuitardos las formaciones geológicas capaces de almacenar agua, pero que poseen una baja permeabilidad por lo cual el agua que hay en ellos cede lentamente, por lo que no pueden por sí mismos abastecer instantáneamente de los pozos subterráneos subyacentes a estos. En la Fig.2.3 se muestra de manera esquemática la ubicación de los acuitardos dentro del subsuelo.

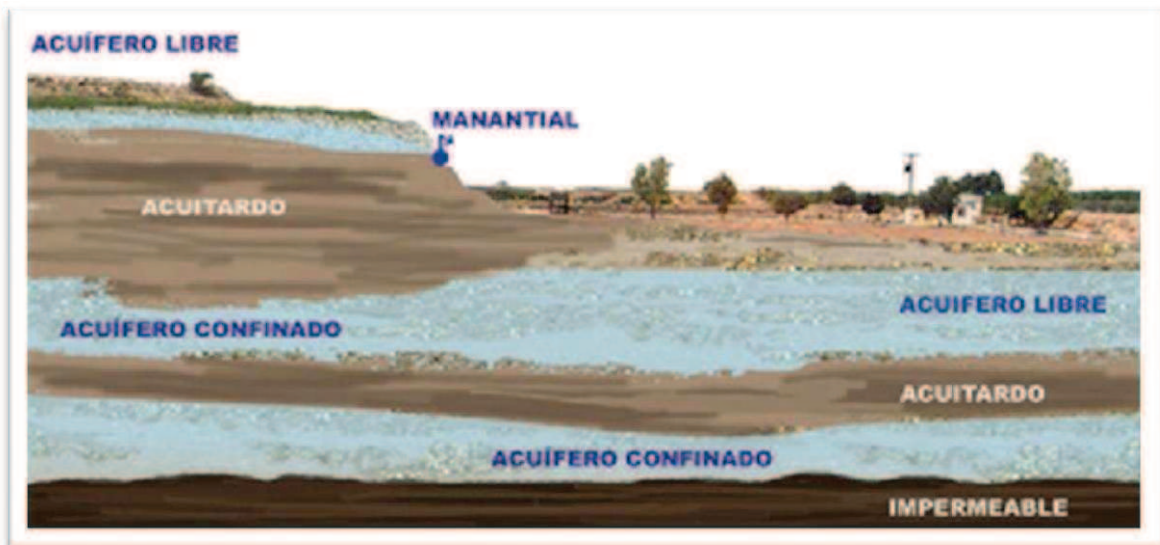
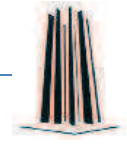


Fig. 2.3 Representación grafica de la ubicación de los acuitardos dentro de el manto acuífero.

El relleno aluvial se encuentra por debajo de las arcillas lacustres y tiene un espesor de 100 a 500 metros. Este material está interestratificado con depósitos de basalto, juntos, abarcan la porción superior del acuífero principal en explotación. Otra unidad inferior del acuífero, compuesta por depósitos volcánicos estratificados que tienen de 100 a 600 metros de espesor, alcanza una profundidad que va de los 500 hasta los 1000 metros, aproximadamente. Esta unidad más profunda está limitada por un depósito de arcillas lacustres. La formación de basalto es altamente permeable, con una buena capacidad de almacenamiento, y es considerada como el componente principal del acuífero en explotación; se encuentra expuesta cerca de la porción superior del piedemonte y se extiende por debajo de los depósitos aluviales del valle. El piedemonte, conocido también como zona de transición, es importante para la recarga natural del acuífero.

La Sierra Chichinautzin es la zona de recarga natural del acuífero de la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM), debido a la alta permeabilidad de su roca de basalto. Los grandes manantiales de Xochimilco son un punto de descarga del flujo



subterráneo; aquí se localizan algunos de los pozos más productivos del Valle de México. Debido a que toda la cuenca se encuentra rodeada por montañas, probablemente existan otras zonas de recarga del acuífero. Esta Sierra se ubica en el Estado de Morelos, en la parte colindante con el Distrito Federal y el Estado de México, dicha Sierra abarca desde Cuernavaca hasta Tetela del Volcán.

Históricamente, el principal acuífero abastecedor de agua estuvo sujeto a la presión artesiana es decir, que había pozos artesianos, estos pozos se comunican con un acuífero cautivo y debido a la presión interior del mismo, el agua sube hasta una altura casi superficial, en algunos casos, más allá de dicha altura, de manera que todos los pozos del fondo del valle llevaban el agua a la superficie sin necesidad de bombeo. Los gradientes hidráulicos naturales provocaban que el agua ascendiera sobre los acuitardos arcillosos. La proliferación de la realización de pozos en los últimos cien años ha cambiado las condiciones hidrológicas naturales. Ahora, los gradientes y el flujo en las capas superiores de los depósitos se encuentran, generalmente revertidos, hacia las zonas de mayor extracción [18,20].

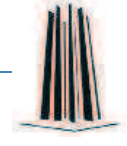
2.3 La sobreexplotación del los acuíferos de la ZMVM

La cuantificación de la cantidad de agua subterránea ha sido una tarea que ha adquirido gran importancia en las últimas décadas en nuestro país, como consecuencia del incremento de la demanda por el recurso. Así, tanto las personas involucradas directamente con el sector hidráulico como aquellas relacionadas de manera indirecta, han prestado mayor interés en los aspectos hidrogeológicos que forman la base el estudio de las aguas subterráneas.

La hidrogeología es la ciencia encargada del estudio del agua subterránea, su origen, movimiento y calidad. Una de las principales dificultades del estudio del agua subterránea es que ésta no puede verse directamente en el subsuelo y, en ocasiones, ocurre en ambientes complejos.

El agua subterránea es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura de agua. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y, eventualmente, llegan a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos.

Un par de factores importantes son los responsables de la existencia del agua subterránea: la gravedad, que mueve al agua hacia el centro de la Tierra, y el tipo de rocas, que de acuerdo con su porosidad, almacenarán más o menos agua.

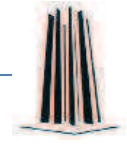


El descubrimiento de agua potable subterránea proveniente de los pozos artesianos de la ZMVM, provocó un furor por la perforación de pozos acuíferos subterráneos, la extracción creciente de agua de pozo, combinada con los métodos artificiales de drenado del valle, provocó que muchos manantiales naturales se secaran, que los lagos menguaran y que el agua del subsuelo perdiera presión, con la subsecuente consolidación de las formaciones de arcilla lacustre sobre las que se asienta la ciudad, debido a esto, el consecuente hundimiento del terreno ha constituido un serio problema para la ZMVM desde principios del siglo XX [22].

Uno de los primeros signos de disminución en el nivel del agua subterránea fue el desecamiento de los manantiales naturales en los años treinta, hecho que coincidió con la explotación intensiva del acuífero principal por medio de pozos profundos (de 100 a 200 metros de profundidad). En 1983 comenzó el muestreo sistemático de los niveles de agua en el acuífero. Desde entonces, el promedio anual de descenso del agua subterránea va de 0.1 a 1.5 metros por año en las diferentes zonas de la ZMVM. Los niveles del agua durante el periodo que va de 1996 a 2002 muestran un descenso neto de 6 a 10 metros en las zonas más intensamente bombeadas de esta región.

Es difícil hacer una estimación precisa de la cantidad de entrada y salida de agua de un acuífero confinado en el manto freático debido a que todos los datos que intervienen en los cálculos (propiedades de los medios, geología del subsuelo y definición de los sistemas de flujo) poseen un margen de error inherente que los hace inciertos, además, casi todos los sistemas de agua subterránea responden a las presiones con mucha mayor lentitud que los sistemas de agua superficial, de modo que los balances de agua que son muy utilizados para medir dichos parámetros en aguas superficiales no se emplean muy a menudo, excepto para consideraciones a largo plazo. Otra complicación consiste en que el balance de agua para el acuífero puede ser del todo distinto al correspondiente al sistema de agua subterránea en su conjunto; gran parte del agua que ingresa a los suelos subterráneos puede no llegar al acuífero principal en cuestión. Es por este motivo que la mejor manera para determinar el balance del agua de un acuífero, es utilizar registros a largo plazo de bombeo y de niveles de agua subterránea. Los descensos en los niveles de agua demuestran que el volumen de agua que está saliendo del sistema es mayor que el que ingresa, lo que indica un estado de sobreexplotación. Los acuíferos menos explotados permanecen en un relativo estado de equilibrio. En tales casos, pueden esperarse fluctuaciones cíclicas o estacionales, pero a falta de grandes variaciones climáticas los niveles de agua a largo plazo permanecen estables en condiciones naturales.

Mediciones de campo han probado que el nivel del agua de los mantos acuíferos correspondientes a la ZMVM han descendido, aproximadamente, un metro por año,

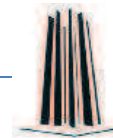


según estos cálculos la sobreexplotación del acuífero está ocurriendo desde principios de este siglo, por lo menos. El cuánto tiempo podría durar esta clase de explotación es una pregunta que no se ha podido responder de manera certera, y aún hoy en día las principales instituciones encargadas de la explotación, manejo y distribución del agua, como lo son CONAGUA y el IMTA están tratando de responderla [22,23,].

Al estimar el volumen de agua subterránea almacenada, es importante considerar las contribuciones de la capa de arcilla superior, así como el hecho de que esta capa (el acuitardo) no actúa como una capa confinante en un 30% de su extensión, ahí es donde los niveles del agua han descendido por abajo del límite de esta capa. Sobre la base de las mediciones de campo y los modelos de esta región, el total del volumen saturado del acuífero en la parte sur de la cuenca ha sido estimado en 1,189.3 billones de metros cúbicos. La explotación anual en esta región se estima de 27.9 m³/s. Esta cifra de extracción equivale a una pérdida de agua subterránea que oscila entre 3.45 y 5.59 billones de metros cúbicos anuales. La diferencia estriba en que los cálculos consideren, o no, que el agua que se queda en el acuitardo contribuye al volumen de agua del acuífero principal.

Según el censo por parte del INEGI realizado en el 2009, el 95.4% de los 15.1 millones de habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México reciben el servicio a través de redes de distribución conectadas directamente a las casas, o bien a una toma común de distribución en el vecindario. En el Distrito Federal hay un nivel de servicio de abastecimiento del 98 %, mientras que en el Estado de México es de 93.7%. El resto de los residentes tiene que obtener el agua de las pipas suministradas por el gobierno, o comprarla a camiones con tanques propiedad de empresas privadas que la venden a un precio relativamente alto. Los valores promedio de uso per cápita reportados para el Distrito Federal y el Estado de México son de 364 y 230 litros diarios, respectivamente. Las autoridades atribuyen el hecho de que el uso per cápita sea superior en el Distrito Federal a su mayor desarrollo y actividad industrial. Adicionalmente, en el Estado de México hay muchos pozos industriales privados cuya existencia no se refleja en los cálculos. El consumo per cápita no es excesivo cuando se compara con el de los Estados Unidos que varía de 250 a 1,120 litros por día, con un promedio diario de 660 litros [24, 26].

Anualmente, México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera; el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que los acuíferos del país reciben 78.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable y se les extraen por medio de pozos, norias, galerías filtrantes y manantiales 27.5 mil millones de metro cúbicos. Así,



el balance subterráneo refleja en principio una gran disponibilidad de agua en el subsuelo, sin embargo, esta situación es engañosa ya que gran parte de los principales acuíferos del país se encuentran seriamente sobreexplotados. Además se ha detectado una disminución significativa en la recarga de los acuíferos debido a la gran área cubierta por la mancha asfáltica, cuál se ha incrementado considerablemente en los últimos 20 años y el hundimiento del terreno provocado por la sobreexplotación de dichos acuíferos provoca el hundimiento progresivo del terreno, lo cual a su vez, trae consigo una disminución en la permeabilidad del subsuelo.

La importancia del agua subterránea para la ZMVM queda de manifiesto al considerar que el 70% del volumen que se suministra a la población, el 33% del que se destina a la agricultura y el 62% del que utiliza la industria tienen ese origen [18,23, 26].

A partir de la década de los años setenta, ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados: 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en 2006. De ellos se extrae casi el 60% del agua subterránea para todos los usos [25].

Para un mejor control y manejo del agua, la CONAGUA ha dividido el territorio nacional en trece zonas hidrológicas, la ZMVM es la XIII zona y abarca todo el valle de México. A continuación se muestra en la tabla 2.2 los acuíferos pertenecientes a cada zona y cuántos de éstos han llegado a ser sobreexplotados.

REGION ADMINISTRATIVA	TOTAL	SOBREEXPLOTADOS	CON INTRUSION SALINA	CON EL FENÓMENO DE SALINIZACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS SALOBRES		RECARGA MEDIA (HECTÓMETROS CÚBICOS)
				ACUÍFERO	CAUSA DE LA SALINIZACIÓN	
Estados Unidos Mexicanos	653	101	17	17		79 651
I Península de Baja California	87	7	9	4	Altos índices de evaporación, agua congénita	1 249
II Noroeste	63	13	5	0		3 130
III Pacífico Norte	24	2	0	0		3 263
IV Balsas	46	2	0	0		4 601
V Pacífico Sur	35	0	0	0		1 994
VI Río Bravo	100	15	0	4	Presencia de calizas y yesos, agua congénita	5 167

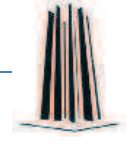
VII Cuencas Centrales del Norte	68	24	0	8	Presencia de calizas y yesos	2 274
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	127	32	1	0		7 686
IX Golfo Norte	40	2	0	0		1 274
X Golfo Centro	22	0	2	0		3 849
XI Frontera Sur	23	0	0	0		18 015
XII Península de Yucatán	4	0	0	1	Presencia de calizas	25 316
XIII Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala	14	4	0	0		1 834
NOTA: La suma de los parciales puede no coincidir con los totales, debido al redondeo de las cifras.						

Tabla 2.2 Número de acuíferos sobreexplotados por región administrativa que incluye cifras de recarga así como que regiones administrativas poseen acuíferos con problemas de salinización.

Así mismo la Fig.2.3 muestra la delimitación de la XIII zona administrativa, denominada por la CONAGUA “Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala”.



Fig. 2.3 Delimitación geográfica de la región administrativa XII denominada “Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala” [23].



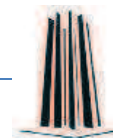
Actualmente, el uso de agua en la ZMVM es de aproximadamente $68 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente $46 \text{ m}^3/\text{s}$, casi el 72% del agua utilizada, se obtiene de distintas baterías de pozos que se encuentran explotando el acuífero de la Cuenca de México. En conjunto, el Distrito Federal y el Estado de México tienen 1,089 pozos registrados, a profundidades que van de 70 a 200 metros. Esta cifra no incluye los pozos de mayor profundidad operados por la Comisión Nacional del Agua. Existe también un gran número de pozos no registrados, muchos de los cuales se encuentran en el Estado de México. Los pozos se localizan por lo general en cuatro campos diferentes, ubicados en el interior y en los alrededores de la ZMVM. Se les conoce como campos de pozos del Sur (Xochimilco), Metropolitano, Este (región de Texcoco) y Norte. Fuentes de abastecimiento de agua relativamente menores, pero importantes a nivel local, se derivan de las aguas superficiales de la cuenca, en gran medida represas de pequeños ríos y manantiales superficiales. El agua traída de las cuencas del Cutzamala y el Lerma contribuye con alrededor de un 26 por ciento al abastecimiento total. El agua superficial de la Cuenca del Valle de México contribuye sólo con alrededor del 2% ($1.4 \text{ m}^3/\text{s}$) al abastecimiento de agua de la ZMVM. El río Magdalena proporciona el agua para el Distrito Federal, mientras que la presa Madin, en el río Tlalnepantla, abastece al Estado de México [26].

El sistema Lerma-Cutzamala acarrea $10.6 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua desde el río Cutzamala. Después de ser tratada cerca de los puntos de recolección, el agua del río Cutzamala es conducida a través de un acueducto. El agua subterránea importada de la cuenca del Lerma ($4.3 \text{ m}^3/\text{s}$) es desinfectada con cloro e incorporada a este acueducto antes de integrarse al sistema de distribución de la ZMVM. Otro acueducto abastece al Estado de México con $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua subterránea, también obtenida de la cuenca del Lerma.

El gobierno federal ha identificado otras fuentes de agua en las cuencas vecinas para su potencial contribución al abastecimiento de agua de la ZMVM. Según la Comisión Nacional del Agua, la cantidad de agua potencialmente disponible de estas cuencas suma $43.7 \text{ m}^3/\text{s}$, cifra que iguala el total de extracción del acuífero. El Comité calcula que el costo del proyecto sería de alrededor de 21 mil 400 millones de pesos, pero los costos por acarreo de agua desde estas áreas aún se desconoce. En la actualidad, el gobierno planea traer $5 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua desde la cuenca del Temascaltepec; además, está considerando la posibilidad de acarrear $14.2 \text{ m}^3/\text{s}$ desde la cuenca del Amacuzac [27].

2.4 Los recursos hídricos de la ZMVM en la actualidad

En la actualidad, el problema de la distribución de agua potable en la ZMVM ya es una realidad, y representa uno de los problemas logísticos más graves para las entidades

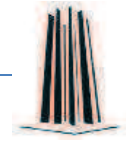


que integran dicha zona. El INEGI (instituto nacional de geografía y estadística) ha recopilado datos estadístico extraídos de las mediciones que CONAGUA realiza a los pozos de bombeo, los cuales indican que la sobreexplotación de los mismos se ha agudizado en los últimos años debido al crecimiento demográfico y a pérdidas del sistema causadas por fugas.

Los datos mostrados en la tabla 2.3 muestran claramente que el nivel de disponibilidad del agua en el país está decreciendo de manera acelerada. Lo mismo sucede en la ZMVM en la cual la situación se agrava debido a la sobrepoblación y a las malas condiciones de la infraestructura de distribución hídrica, lo cual afecta directamente a la disponibilidad per cápita del agua en dicha zona.

DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA TOTAL (hm³/año)					
REGIÓN ADMINISTRATIVA	2002	2004	2005	2006	2007
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	476 456	474 638	472 194	465 139	458 095
XII AGUAS DEL VALLE DE MEXICO Y SISTEMA CUTZAMALA	3 934	3 934	3 864	3 009	3 008
DISPONIBILIDAD NATURAL MEDIA PER CÁPITA (m³ POR HABITANTE AL AÑO)					
REGIÓN ADMINISTRATIVA	2002	2004	2005	2006	2007
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	74 621	74 184	75 461	74 041	72 771
XII AGUAS DEL VALLE DE MEXICO Y SISTEMA CUTZAMALA	182	188	192	144	143
RECARGA MEDIA TOTAL DE ACUÍFEROS (hm³/año)					
REGIÓN ADMINISTRATIVA	2002	2004	2005	2006	2007
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	77 494	78 053	76 984	78 564	79 652
XII AGUAS DEL VALLE DE MEXICO Y SISTEMA CUTZAMALA	1 809	1 807	1 938	1 938	1 835
EXTRACCIÓN TOTAL BRUTA DE AGUA (hm³/año)					
REGIÓN ADMINISTRATIVA	2002	2004	2005	2006	2007
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	72 643	75 430	76 500	77 323	78 950
XII AGUAS DEL VALLE DE MEXICO Y SISTEMA CUTZAMALA	4 461	4 643	4 665	4 685	4 706

Tabla 2.3. Recopilación de datos estadístico procedentes del INEGI, la cual muestra datos tanto de la zona administrativa como del distrito Federal como del Estado de México [25].



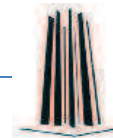
La disponibilidad natural media es un resumen un promedio del agua dulce renovable. Dicho promedio se obtiene de la las mediciones realizadas en los distintos pozos de la región hidrológica o entidad federativa según sea el caso, tomando en cuenta la cantidad de población que se encuentra asentada en dicha región hidrológica o entidad federativa, se obtienen la disponibilidad media per cápita, es decir se divide la disponibilidad natural media total entre el número de habitantes de la región y se divide entre el número de sus habitantes.

Por otra parte, la recarga total media es el promedio de la cantidad de agua que los acuíferos reponen por medio de los escurrimientos pluviales, deshielos, ríos subterráneos o cualquier otra fuente de riego natural que sea capaz de permear en el subsuelo y llegar a los mantos acuíferos. Dicha recarga es medida por los aumentos de nivel en los pozos de bombeo. En el caso de la ZMVM las recargas importantes son estacionales, lo que ocasiona que una menor cantidad de agua se pueda filtrar hacia los mantos acuíferos.

La extracción total bruta es la suma del agua bombeada de cada pozo perteneciente a la entidad federativa o hidrológica en cuestión, si se observan los valores de recarga total media de la extracción total bruta correspondientes a la zona hidrológica XIII mostrados en la tabla 2.3 nos podemos percatar de que los valores de extracción son muy superiores a los de recarga, esto quiere decir que el recurso hídrico de los mantos acuíferos de la ZMVM se está mermando de manera significativa. Actualmente se sabe que cuatro de los catorce acuíferos con los que cuenta la región administrativa XIII se encuentran en una situación de sobreexplotación.

La disminución de la disponibilidad del agua no solo se debe a la sobreexplotación de sus mantos acuíferos, también la disminución de los escurrimientos naturales (el agua que cae a la superficie y se filtra por los estratos del subsuelo hasta llegar a los mantos acuíferos) ha jugado un papel importante en dicha disminución debido a diversos factores, entre los más significativos podemos mencionar el aumento de la mancha urbana, la compactación progresiva de los suelos lacustres y el cambio climático que sufre la ZMVM.

Otro factor importante que causa el aumento en la sobreexplotación de los recursos es que cada vez se le brinda servicio de agua a un mayor porcentaje de la población de la ZMVM, y tomando en cuenta que ésta se continúa incrementando, el suministro a los nuevos usuarios implica una agudización en dicho problema. Cabe mencionar que en los datos mostrados por el INEGI, no se contemplan las extracciones realizadas por empresas particulares que brindan un servicio de abastecimiento de agua a los asentamientos irregulares y zonas marginadas de la población [26].



En la tabla se muestra como ha aumentado el porcentaje de la población que cuenta con suministro de agua por parte de las instituciones gubernamentales. Puesto que este trabajo de tesis únicamente presenta la problemática del agua en la ZMVM, se mostraran las cifras obtenidas para todo el país y para las dos entidades federativas que dicha zona abarca, las cuales son el Estado de México y el Distrito Federal.

POBLACION QUE CUENTA CON EL SERVICIO DE AGUA POTABLE (%)							
ENTIDAD FEDERATIVA	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	88.5	89.0	89.2	89.4	89.5	89.5	89.6
ESTADO DE MEXICO	92.4	92.6	92.2	91.3	90.6	93.3	92.4
DISTRITO FEDERAL	97.7	97.4	98.2	99.0	99.5	97.6	97.8

Tabla 2.4 Porcentaje de población que cuenta con el servicio de agua potable según el INEGI [25].

Cabe mencionar que los altibajos en los porcentajes mostrados en la tabla anterior observados en el caso del Estado de México y el Distrito Federal se deben al aumento de la población y a la proliferación de asentamientos irregulares principalmente en las zonas limítrofes de la ZMVM.

El hecho de que la población del Distrito Federal haya disminuido y de que la población de la zona metropolitana correspondiente al Estado de México haya aumentado considerablemente en los últimos veinte años trae como consecuencia que dicha entidad haya rebasado al Distrito Federal en cuanto a consumo doméstico de agua se refiere. La tabla 2.5 muestra como el sistema Cutzamala distribuye el agua entre las entidades federativas anteriormente mencionadas [24].

AÑO	TOTAL		ENTREGA AL D.F.		ENTREGA AL EDO. MEX.	
	Volumen (hm ³ /año)	Gasto medio (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)	Gasto medio (m ³ /s)	Volumen (hm ³ /año)	Gasto medio (m ³ /s)
2000	306 698	9 675	176 554	5 568	483 252	15 243
2001	303 144	9 638	173 345	5 512	476 489	15 150
2002	303 662	9 654	175 986	5 602	479 648	15 256
2003	310 699	9 767	185 226	5 825	495 925	15 592
2004	310 670	9 844	177 733	5 637	488 403	15 481
2005	310 392	9 840	182 795	5 640	493 187	15 480
2006	303 530	9 610	177 260	5 610	480 790	15 220
2007	303 900	9 720	174 560	5 580	478 460	15 300

Tabla 2.5 Cifras anuales del año 2000 al 2007 de la cantidad en agua entregada por el sistema Cutzamala tanto al Distrito Federal como al Estado de México.

Se puede observar que en los años de 2006 y 2007 se nota una ligera disminución del volumen entregado por el sistema Cutzamala, esto es debido a las obras de mantenimiento correctivo que se han llevado a cabo desde entonces, lo que ocasiona el corte parcial del suministro, quedando sin servicio algunas de las redes de distribución.

Además, la región administrativa XIII posee una importante peculiaridad en cuanto a la concesión del servicio de distribución de agua se refiere, dicha particularidad radica en que en esta zona administrativa la proporción de concesiones que posee el servicio de abastecimiento público es mucho mayor que en las otras XII regiones, esto se debe a que en proporción territorial la región XIII es la más pequeña, y a la vez, sufre la mayor concentración demográfica de todo el país, dicha peculiaridad hace que la utilización del agua por parte del abastecimiento público sea mucho más significativa y le da un mayor peso a este rubro en comparación a las demás zonas [26]. La tabla 2.6 se muestra el volumen total concesionado para cada región administrativa así como el volumen destinado al rubro público, agrícola, industrial y en generación de energía.

Volúmenes concesionados para usos consuntivos por Región Hidrológico-Administrativa, 2008 (millones de metros cúbicos)						
No	Región Hidrológico-Administrativa	Volumen total concesionado	Agrícola *	Abastecimiento público *	Industria autoabastecida sin termoeléctricas*	Termoeléctricas*
I	Península de Baja California	3 510.3	2 892.7	327.5	91.1	199.0
II	Noroeste	7 608.8	6 526.8	983.6	91.4	70
III	Pacífico Norte	10 439.0	9 761.7	679.3	58.0	0.0
IV	Bahías	10 702.6	6 307.7	997.5	227.1	3 170.2
V	Pacífico Sur	1 351.5	1 000.0	333.1	18.4	0.0
VI	Río Bravo	9 234.3	7 735.1	1 182.5	205.0	1 111.6
VII	Cuencas Centrales del Norte	3 832.5	3 371.8	371.1	61.2	28.3
VIII	Lerma Santiago-Pacífico	14 162.0	11 668.6	2 057.5	411.4	245
IX	Golfo Norte	4 746.8	3 688.0	526.6	466.6	65.6
X	Golfo Centro	4 956.6	2 960.0	764.0	875.7	377.0
XI	Frontera Sur	2 190.1	1 630.5	456.9	102.7	0.0
XII	Península de Yucatán	2 368.2	1 443.3	471.0	444.5	9.4
XIII	Valle de México	4 640.6	2 248.7	2 306.8	211.5	82.6
TOTAL NACIONAL		79 752.3	61 214.9	11 197.5	3 264.6	4 075.2

NOTA: Los datos pueden no coincidir por el redondeo de los datos.
Los volúmenes son al 31 de diciembre de 2008.
La información de los volúmenes se basa en la asignación de los aporramientos de agua en el REPOA y no el lugar de abasteción de los usuarios.
* Incluye los rubros agrícola, pecuario, ganadería, múltiples y otros de la clasificación del REPOA.
* Incluye los rubros público urbano y doméstico de la clasificación del REPOA.
* Incluye los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio de la clasificación del REPOA.
* Se incluye el volumen total concesionado para generación de energía eléctrica sin contar hidroeléctricas.
FUENTE: CONAGUA, Subdirección General de Programación, Tabulado a partir de CONAGUA, Subdirección General de Administración del Agua, Volúmenes inscritos en el REPOA al 31 de diciembre de 2008.

Tabla 2.6 Volumen concesionado por la CONAGUA a cada una de las trece regiones hidrológicas administrativas [24].

Debido a la sobreexplotación de los acuíferos la extracción de agua subterránea ha ido aumentando gradualmente. Esto trae consigo múltiples inconvenientes para la ZMVM, entre ellos podemos mencionar el hundimiento de los suelos lacustres, la disminución de la calidad el agua extraída, el aumento del costo real del suministro, entre otros. La gráfica de la Fig.2.4 muestra cómo ha ido aumentando gradualmente la utilización del agua subterránea para satisfacer la demanda del recurso hídrico en el país [24].

Fig.2.4 Gráfica que muestra la evolución del volumen concesionado para abastecimiento público por tipo de fuente [24].

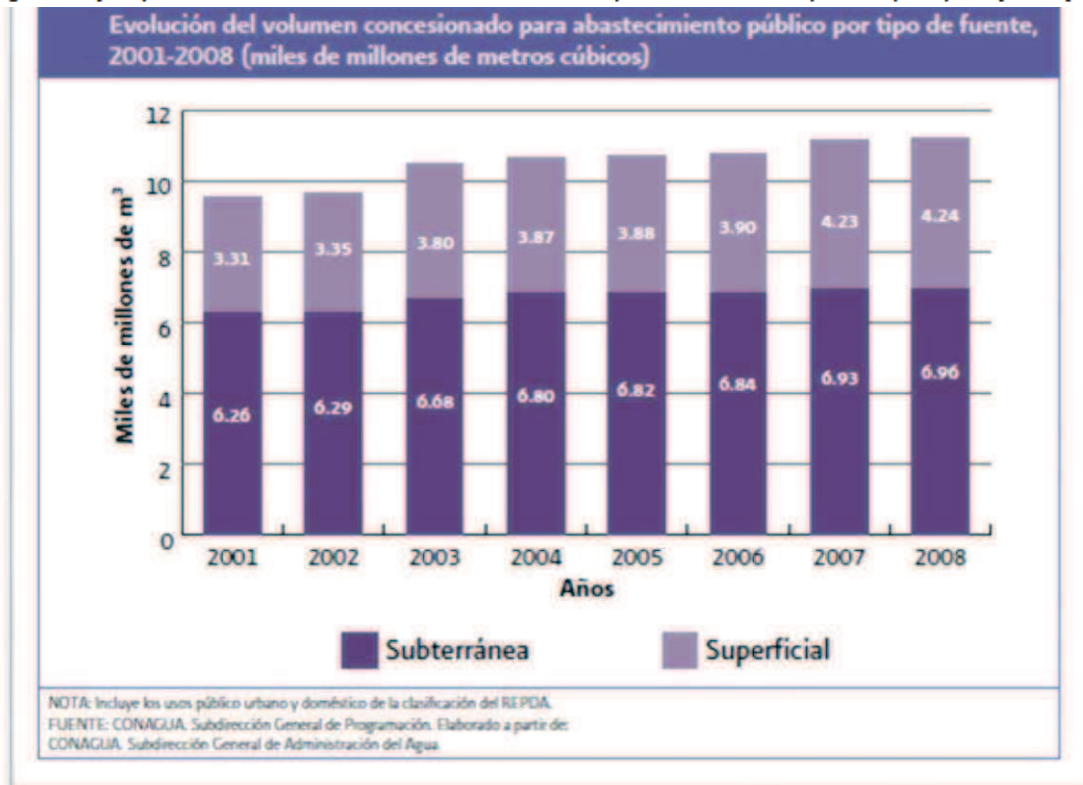


Fig.2.4 Gráfica que muestra la evolución del volumen concesionado para abastecimiento público por tipo de fuente [24].

Como se observa en la gráfica de la Fig. 2.4, la extracción de agua subterránea se mantiene en aumento año con año y, aunque aparentemente el aumento es muy paulatino, se debe recordar que muchos de los acuíferos se encuentran sobreexplotados y que este pequeño aumento agrava la situación de los mismos y pone a muchos más en riesgo de padecer la misma situación.

En el caso de la zona administrativa XIII la mayor cantidad de agua utilizada para el abastecimiento urbano, el industrial y la generación de energía provienen de del subsuelo, es decir de los mantos acuíferos, esto se debe a que en esta zona se encuentra la mancha urbana de la ZMVM, en la cual se asienta prácticamente el 10% de la población del país.

Prácticamente el 50% del agua extraída de la zona administrativa XIII proviene del subsuelo, y esto es bastante alarmante debido a que las tendencias de crecimiento demográfico indican que se espera una alza en el número de personas que dejan las zonas rurales para asentarse en los grandes centros urbanos del país, lo que implica una sobreexplotación aún más pronunciada para las próximas décadas [27]. En las Figs. 2.5, 2.6 y 2.7 se muestran los datos recopilados por la CONAGUA en el 2010 para el caso de la zona administrativa XIII y para las entidades federativas Distrito Federal y Estado de México, con el objeto de que el lector pueda apreciar en datos duros como la ZMVM en general consume una gran cantidad de agua en relación al abastecimiento público, sin duda la mayor cantidad en todo el territorio nacional.

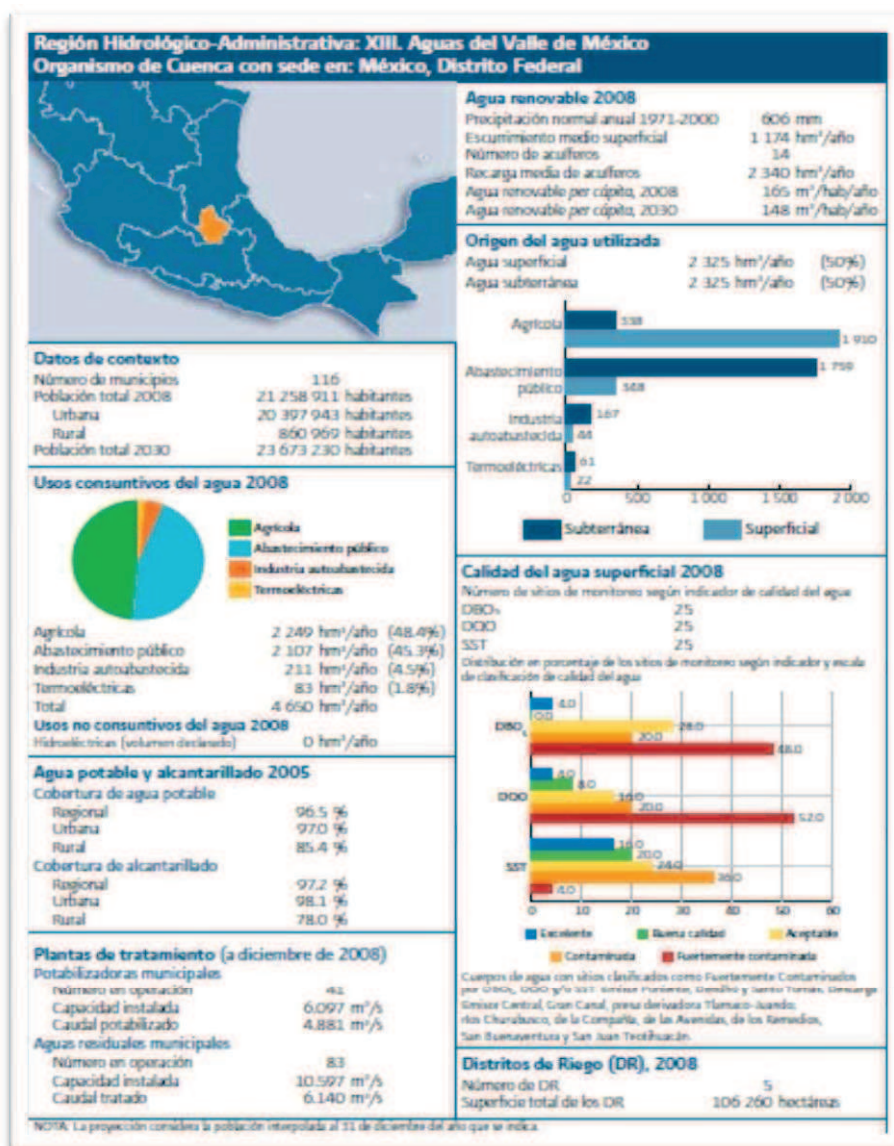


Fig.2.5. Datos relevantes del agua en la región hidrológico-administrativa XIII [28].

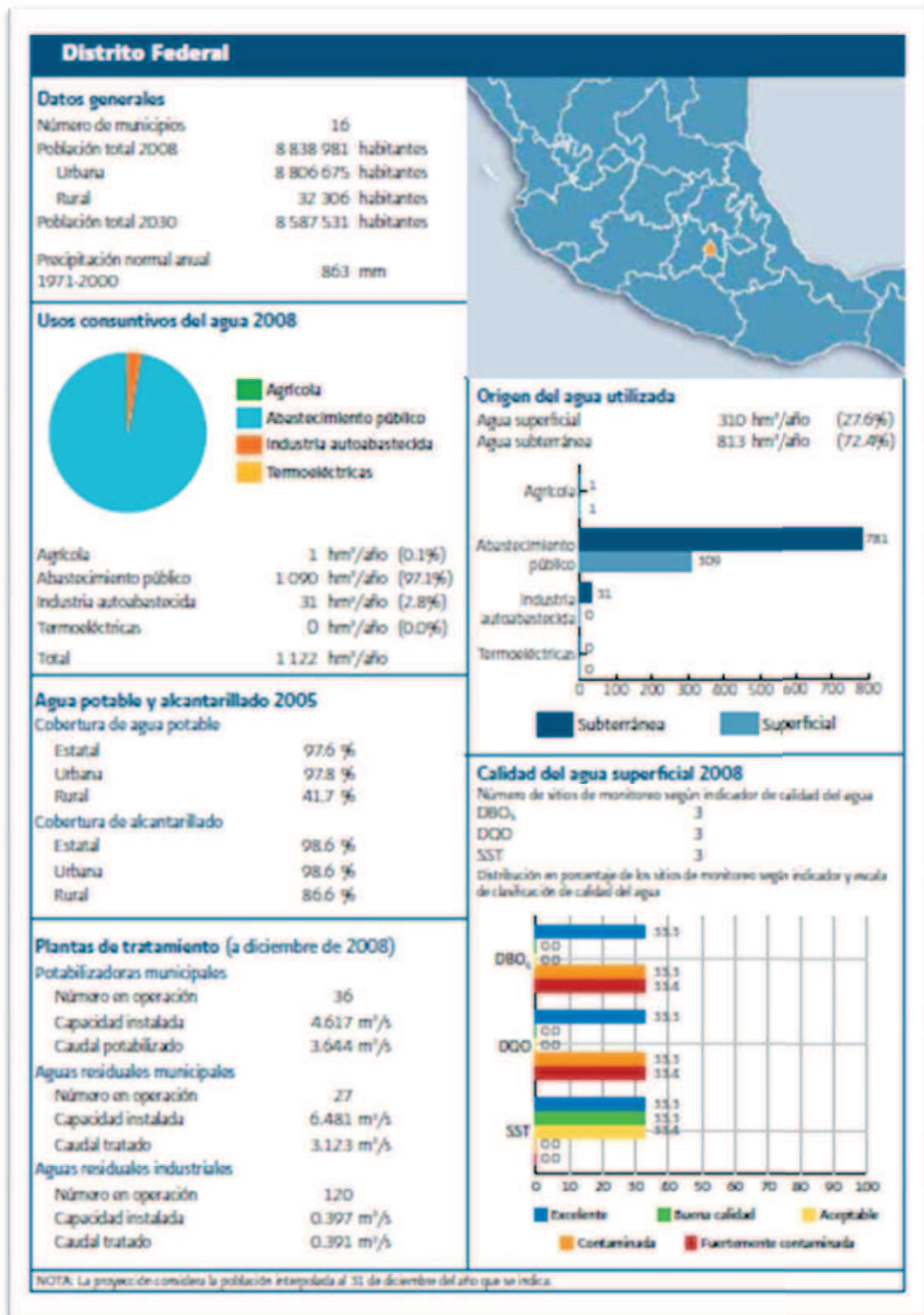


Fig.2.6. Datos relevantes del agua en el Distrito Federal [28].

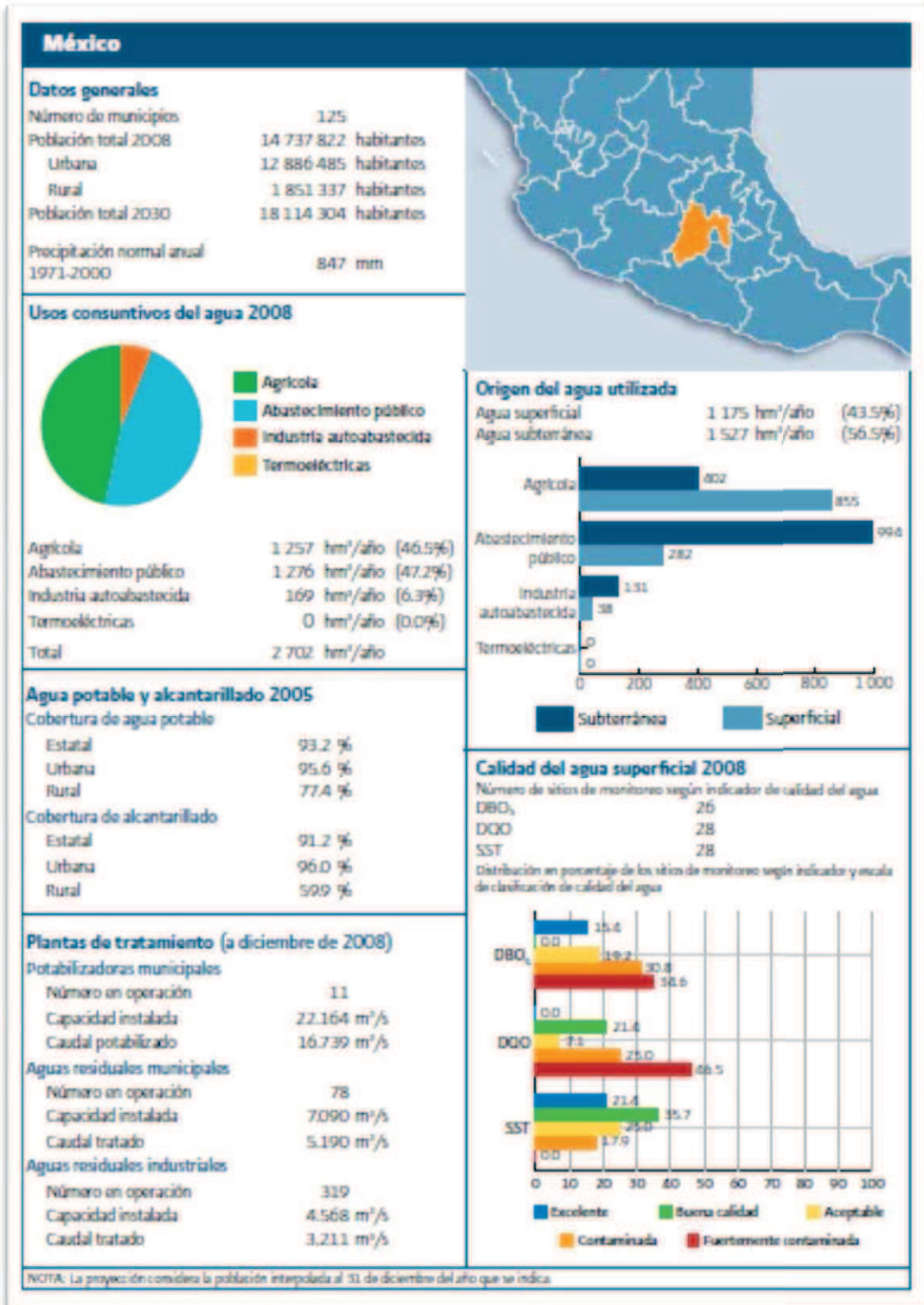


Fig.2.7. Datos relevantes del agua en el Estado de México [28].

2.5 El futuro hídrico de la ZMVM

Un aspecto muy importante a considerar en los escenarios futuros de México es el incremento de la población y la concentración de la población en zonas urbanas. De acuerdo con las estimaciones de CONAPO, entre 2007 y 2030 la población del país se incrementará en casi 14.9 millones de personas. Además, aproximadamente el 82% de la población total se asentará en localidades urbanas. Se calcula que el 70% del crecimiento poblacional para el 2030 ocurrirá en las Regiones Hidrológico-Administrativas VIII Lerma-Santiago-Pacífico, XIII Aguas del Valle de México, VI Río Bravo y I Península de Baja California. En cambio, las regiones III Pacífico Norte y V Pacífico Sur, experimentarán una disminución de su población [27].

En la Fig.2.8 se muestra una grafica en la cual se proyecta el crecimiento poblacional tanto en zonas urbanas como en zonas rurales en un periodo que abarca del año 2007 al año 2030.

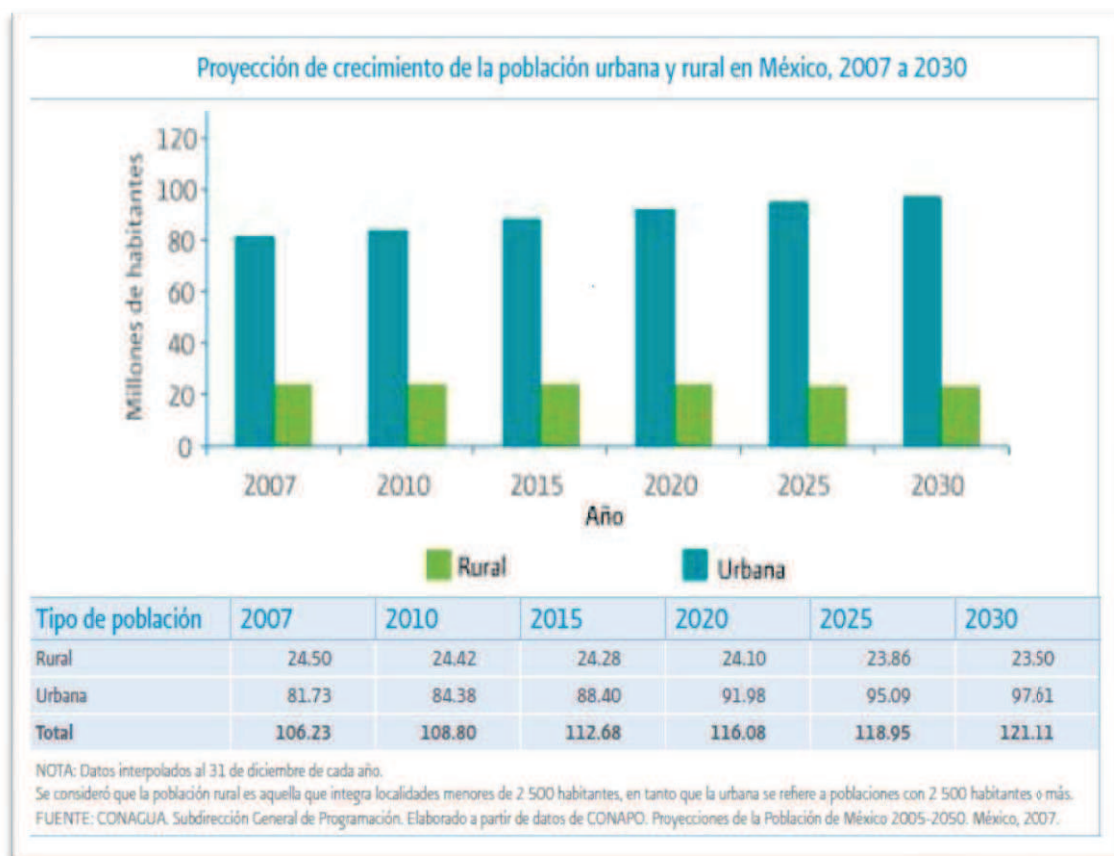


Fig.2.8 Gráfica de la proyección del crecimiento de la Población urbana y rural en México. [27]

Se estima que la tendencia del grueso de la población nacional a mudarse a asentamientos urbanos ya de por sí sobrepoblados traerá consigo una sobreexplotación aún mayor a los recursos hídricos del Valle de México, lo que lo pone en un alto riesgo de padecer una profunda crisis con respecto a la capacidad de los acuíferos para soportar un consumo tan grande. Así mismo, las predicciones indican que esta sobreexplotación afectará de manera directa y muy significativa el consumo per cápita que estará disponible para el año 2030, una gráfica de dichas predicciones se muestra en la Fig2.9.

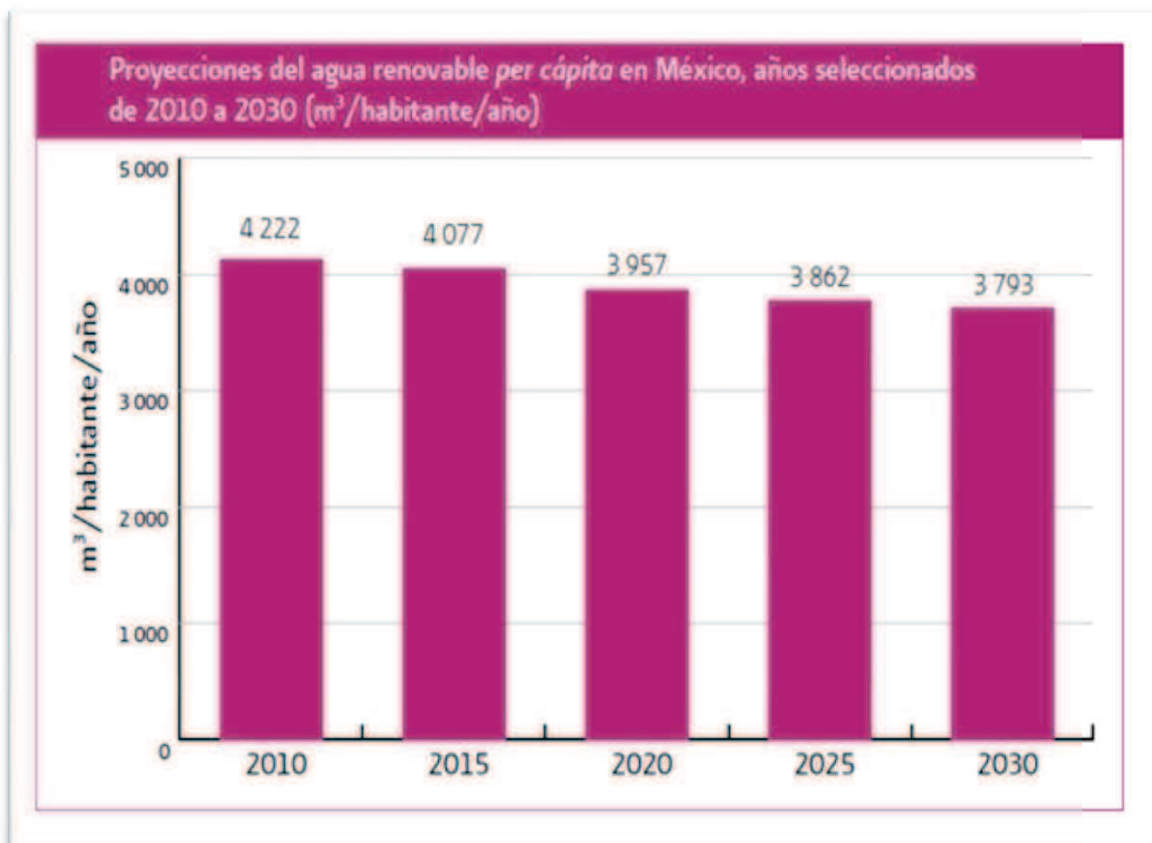


Fig.2.9. Gráfica que muestra el decrecimiento proyectado a futuro de la cantidad de agua renovable per cápita [27].

Para el año 2030, en algunas de las regiones Hidrológico-Administrativas del país, el agua renovable per cápita alcanzará niveles cercanos o incluso inferiores a los 1000m³ por habitante al año, lo que se califica como una condición de escases grave.

Dentro del Programa Nacional Hídrico 2007-2012 realizado por la CONAGUA una de las medidas para poder amortizar el impacto de dicho crecimiento sobre los recursos hídricos está la implementación de nueva tecnología que ayude a contribuir al buen aprovechamiento del agua tanto en los rubros rural, industrial y por supuesto, en el abastecimiento público [27].



*Fig.2.10 Gráfica de la proyección a futuro del agua renovable *per cápita* anual en México [27].*

2.6 Dispositivos Mecánicos de ahorro de agua

Con lo expuesto con anterioridad, es evidente que en la ZMVM la problemática del agua es sumamente compleja y que en ella influyen distintos factores los cuales determinan la sustentabilidad de la zona urbana en el futuro.

En distintas partes del mundo se ha buscado el desarrollo de tecnologías que sean capaces de procurar una reducción en el gasto de los recursos hídricos, y debido a la tendencia poblacional mundial de asentarse cada vez en mayor número dentro de las grandes urbes, el desarrollo de tecnologías que promuevan el ahorro de agua a nivel doméstico se ha incrementado en las últimas dos décadas, puesto que los hogares representan una parte muy importante dentro del rubro de abastecimiento público, el cual es en la mayoría de los casos el más demandante dentro de las zonas que dichas urbes comprenden.

Para darnos una idea de lo que el consumo doméstico significa es necesario tener en cuenta que el consumo promedio *per cápita* en el año 2007 para el caso de la ZMVM fue de 391.8 litros diarios, de los cuales se calcula que por lo menos 150 litros son utilizados en el interior del hogar (esto contempla baño, cocina, uso de lavadora, limpieza interna etc.), de los cuales pueden utilizarse hasta 35 % del consumo en los

inodoros, 30 % en las regaderas, 20 % en las lavadoras de ropa, entre 3 - 10 % en las llaves de fregaderos y lavados, y 5 % en las lavavajillas [24].

Por este motivo la mayoría de los dispositivos que se diseñan pensando en el ahorro de agua a nivel doméstico se encuentran en forma de accesorios para letrinas, regaderas y grifería principalmente.

En esta sección se muestran algunos de los accesorios ahorradores de agua que pueden ser implementados a nivel doméstico, y que de hecho son los más recomendados por las instituciones gubernamentales como alternativas de solución al problema de desperdicio del agua.

Uno de los accesorios ahorradores de agua que ha tenido mayor aceptación entre los consumidores son los dispositivos aireadores, dicho dispositivo es similar a la terminal de la regadera o de los grifos, con un pequeño depósito en el cual se mezcla el flujo que sale de la tubería con aire, con el objetivo de que el flujo de salida al consumidor sea más uniforme debido a la pulverización del agua al mezclarse con el aire, según sus fabricantes, estos dispositivos son capaces de generar un ahorro hasta del 60% en el gasto de agua [29].

Este efecto se logra colocando rejillas atomizadoras un poco antes de que el agua salga del grifo o regadera, lo que ocasiona que la sensación de flujo sea mayor y por lo tanto, el usuario reduzca el caudal que habitualmente utilizaba para realizar sus actividades. En la Fig.2.11 se muestra un dispositivo aireador hembra para regadera de la marca Anzapack®.



Fig.2.11 Dispositivo aireador para regadera marca Anzapack [30].

Otro dispositivo que ha tenido bastante aceptación son las regaderas con obturador. El obturador es un sistema que cierra totalmente el flujo que pasa hacia la regadera, se usa con el objetivo de facilitar el corte del agua cuando el usuario se encuentra enjabonado, ya que por lo regular éste no cierra el paso del agua o lo hace de manera lenta, y, tomando en cuenta que una regadera común promedio gasta 12 litros por cada minuto que transcurre, el gasto que aparentemente es mínimo cobra importancia, el objetivo del dispositivo obturador permite ahorrar este gasto innecesario. En la Fig.2.12 se muestra el cabezal de una regadera con obturador [29].



Fig.2.12 Regadera con dispositivo obturador [29].

Otro dispositivo ahorrador muy bien recibido por el público usuario son los monomandos, estos dispositivos son considerados dispositivos ahorradores porque al reducir a una sola manija la operación del agua fría y caliente reduce el tiempo en que el usuario tarda en cerrar el flujo de agua. El funcionamiento del monomando es sencillo, el caudal es regulado por una válvula esférica la cual mezcla los dos flujos en cierto porcentaje de acuerdo con la posición de la manija, cuando se desea interrumpir el flujo, se mueve verticalmente el monomando, lo que ocasiona que el paso de la válvula quede desalineado del flujo de entrada. En la Fig2.13 se muestra el despiece de un monomando [31].

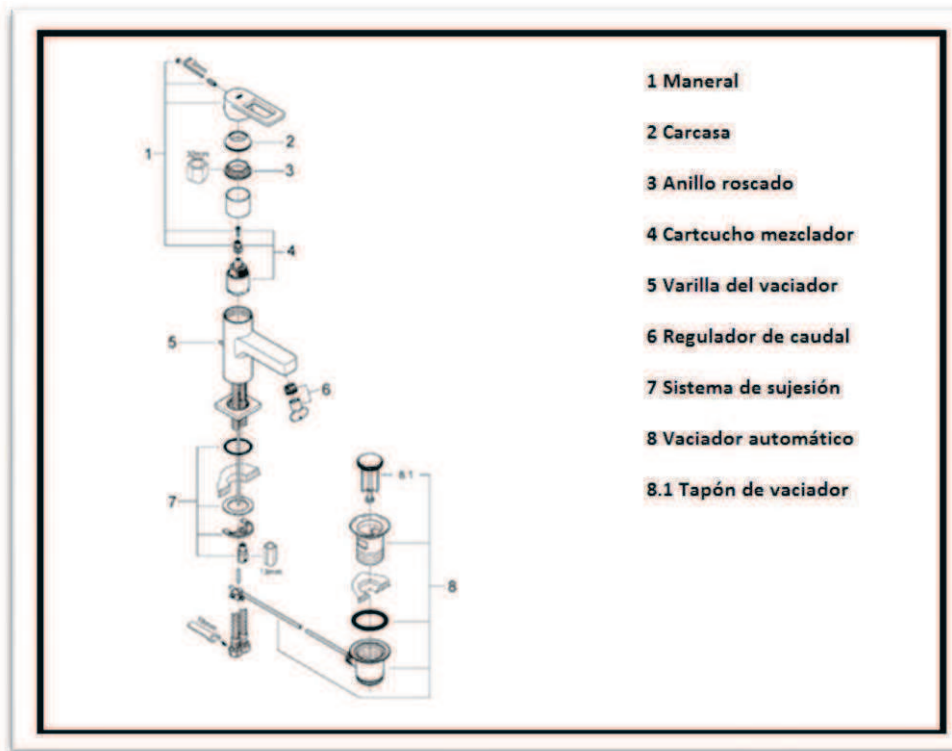
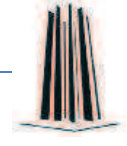


Fig.2.13 Dibujo explosivo de un monomando Helvex® [31].

Además, en el área de grifería existen otros dispositivos que debido a su elevado costo no es muy usual encontrar en domicilios particulares pero si en instalaciones destinadas al servicio público, un ejemplo de esto son los grifos que se abren por medio de una válvula con solenoide que es activada por sensores de presencia al igual que algunos mingitorios del mismo funcionamiento. Actualmente incluso existen mingitorios secos, los cuales tienen una superficie repelente a los líquidos y que operan con un diafragma en el tubo receptor el cual permite la entrada de los líquidos pero no deja salir los olores provocados por la evaporación, los cuales tampoco es factible aplicarlos en el ámbito domestico debido al costo y a que necesitan una instalación diferente a los otros sistemas.

Los retretes son uno de los sistemas que más gasto de agua genera dentro de un hogar. La búsqueda por ahorrar agua en estos dispositivos ha llegado a la utilización de tanques presurizados que funcionan conectando la línea de alimentación al tanque que está cerrado herméticamente, con lo cual la carga de presión dentro del mismo puede ser igual a la diferencia de nivel de la superficie libre del agua en el tinaco y la del tanque del inodoro, o a la presión de la red de abastecimiento, lo que mejora la eficiencia del retrete y reduce la cantidad de agua a niveles inferiores a los 6 litros por descarga.



Existen otros inodoros que aprovechan las aguas grises provenientes del agua de las duchas, bañeras y lavamanos se puede reutilizar para el tanque, donde las aguas grises son almacenadas en un depósito acumulador y por medio de tubería de PVC el agua es conducida para la alimentación del tanque del inodoro.

El problema con este tipo de retretes es que la reutilización de aguas grises se necesita una mayor seguridad en su manipulación, por lo que se recomienda la depuración físico-química de las aguas procedentes de duchas, lavamanos y bañeras, la colocación de una malla fina que sirva como tamiz para no permitir el ingreso de sólidos y la aplicación de cloro que desinfecte el agua del depósito ya que está se encuentra contaminada.

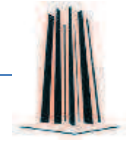
El agua consumida por duchas, bañeras y lavadoras es canalizada hasta el depósito de aguas grises, situado en el lugar más idóneo de la casa, como una bodega o por falta de espacio podría ir enterrado en el jardín. Cuando se acciona el dispositivo de descarga de los tanques de los inodoros y se descarga ésta, la bomba que lleva incorporada el depósito acumulador impulsa las aguas grises para volver a cargar los tanques de los inodoros.

El problema de la ZMVM con respecto a estos sistemas, es que la mayoría de los hogares en esta zona no tienen las características para poder acoplar este tipo de sistemas a sus instalaciones.

Debido a la difícil situación que se vive en la zona metropolitana con respecto a la problemática del agua, instituciones gubernamentales como CONAGUA y el IMTA han promovido campañas publicitarias donde se busca la concientización de la población mediante acciones que reduzcan el gasto hídrico en el ámbito urbano, pero, desafortunadamente el que la población adopte estas medidas como parte de la vida cotidiana tarda años, en ocasiones décadas y la situación actual demanda soluciones capaces de ofrecer resultados a corto o mediano plazo, incluso, en algunas ocasiones los gobiernos federal y estatal subsidian la compra de dispositivos ahorradores de agua, un ejemplo de esto fue el subsidio del gobierno federal, un ejemplo muy significativo de este hecho se dio cuando se subsidiaron millones de cisternas para retrete, las cuales eran de 8 litros por descarga en vez de las cisternas anteriores que usaban 16 litros, lo cual ha significado un ahorro muy significativo de agua para la ZMVM [32].

Esto nos ha mostrado que el desarrollo de nuevas tecnologías y dispositivos puede generar soluciones viables y de efecto a mediano plazo.

Hoy en día, en México el desarrollo de nuevas tecnologías que ayuden al ahorro del agua es escaso, y eso merma la capacidad de optimizar el aprovechamiento del vital



líquido debido a que las tecnologías extranjeras tienen, en la mayoría de los casos, un alto costo que hace prohibitiva la implementación a gran escala de estas tecnologías, además, muchas de estas tecnologías no están pensadas en las necesidades de la población local, en cuanto a que muchos de los dispositivos están diseñados para hogares con mayor espacio y con una infraestructura distinta a la que se tiene en la ZMVM, es por esto que se tiene la necesidad de comenzar a desarrollar tecnologías y dispositivos propios que nos permitan aprovechar de manera más eficiente nuestros recursos hídricos.



CAPÍTULO III

DISEÑO DE UNA VÁLVULA REGULADORA DE AGUA CALIENTE UTILIZANDO M.M.F.



3.1 Introducción al diseño de un dispositivo a base de de MMF

El diseñar elementos mecánicos con materiales con memoria de forma (MMF) requiere de cierto nivel de conocimientos sobre el comportamiento termomecánico de estos materiales que nos permita aprovechar sus propiedades en la solución de problemas específicos [5]. Concretamente, es necesario desarrollar modelos matemáticos que puedan describir el comportamiento del material bajo condiciones de carga y/o temperatura determinadas. La elaboración de dichos modelos puede llegar a ser sumamente compleja, debido a que los MMF son altamente anisótropos, histeréticos su comportamiento es no lineal y dependiente de la temperatura.

Debido a la complejidad de su comportamiento, la aplicación a nivel industrial de los MMF había sido lenta en décadas anteriores. Actualmente esta tendencia está cambiando, sobre todo en países desarrollados como Japón, Alemania y Estados Unidos, donde los MMF empiezan a ser utilizados principalmente en la industria medica, aeronáutica y más recientemente en la industria automotriz así como en sectores industriales en los que por razones de seguridad es poco conveniente tener dispositivos electrónicos llegando a ser importantes complementos de los sistemas neumáticos [1].

Para diseñar el dispositivo propuesto en el presente trabajo de tesis es necesario tomar en cuenta que se propone utilizar un alambre de Ni-Ti como un tipo de termo-actuador. El dispositivo que se propone realiza una acción mecánica, que consiste en abrir una válvula que permite el paso de agua caliente a la regadera, cuando la temperatura es superior a la temperatura crítica del MMF empleado. La apertura de la válvula se ejecuta debido a que al ser calentado el MMF, éste experimenta una contracción, asociada a una transformación martensita-austenita, que desplaza un tapón que permite el paso del agua; si la temperatura del agua se encuentra por debajo de cierta temperatura crítica del material, el elemento con memoria de forma se elonga, debido a que se presenta una transformación austenita-martensita, y un resorte helicoidal colocado en serie con el elemento con memoria de forma ejecutará el cierre de la válvula y por lo tanto impedirá que el agua fría pase a la regadera y se desperdicie.

Se optó por utilizar MMF en este dispositivo debido a que su utilización implica muchas ventajas con respecto a los termo-actuadores convencionales como pueden serlo los sistemas de automatización convencionales. Una de las principales ventajas que posee la utilización de un MMF sobre los dispositivos convencionales es el hecho de que el alambre actúa como sensor y actuador a la vez, lo cual reduce mucho la complejidad del diseño realizado. Otras ventajas que se pueden mencionar son que el diseño se vuelve mucho menos pesado y mucho más pequeño lo que se traduce en



un diseño más simple y económico. Actualmente, algunos sectores industriales han comenzado a usar MMF en los diseños de sus sistemas, un ejemplo es la industria automotriz, en la cual muchos de los sistemas de aire acondicionado utilizan resortes con memoria de forma para abrir las aletas que permiten el paso del aire caliente al interior del automóvil, así mismo, los MMF son cada vez más utilizados como actuadores en el área de la robótica, debido a que permite una amplia gama de nuevas posibilidades para el diseño y modo de operación de los mismos [1].

El MMF que ha sido más utilizado para el diseño de elementos sensores y actuadores es el Ni-Ti, debido a que su comportamiento es más estable, posee una mayor resistencia a los ciclos de carga y presenta un mayor porcentaje de deformación elástica.

Otsuka [1], atribuye siete principales ventajas que poseen los MMF sobre los termoactuadores convencionales:

1. Entrega mayor fuerza por unidad de peso
2. Poseen mayor capacidad de elongación elástica
3. Permiten mayor flexibilidad del diseño gracias a una mayor movilidad del actuador
4. Brindan una rápida respuesta a una temperatura específica
5. Son inertes a una gran variedad de condiciones ambientales
6. Pueden ser utilizados cuando se requiere una limpieza crítica en el proceso
7. Su operación genera niveles de ruido mínimos

En el presente trabajo se considera el comportamiento en tensión tanto de un alambre como de un resorte de Ni-Ti con memoria de forma para llegar al diseño de una válvula economizadora de agua en regaderas tanto domésticas como industriales. Ya que los modelos descriptivos del proceso de diseño generalmente hacen énfasis en la importancia que tiene el generar un concepto de solución en una etapa inicial del proceso, primero se propone y describe un diseño conceptual del equipo, en el cual, básicamente se evalúan los principales factores que comprometen la factibilidad del diseño, así como los parámetros de mayor interés concernientes al comportamiento del alambre de Ni-Ti. Posteriormente se propone la construcción de dos prototipos acordes con los resultados obtenidos en el análisis de factibilidad. En las siguientes secciones se presenta el diseño de dos válvulas economizadoras de agua en regaderas tanto domésticas como industriales que emplean materiales con memoria de forma. Uno de los diseños propuestos emplea un alambre y el otro dos resortes, ambos de Ni-Ti con memoria de forma.



A fin de poder predecir el comportamiento termo-mecánico del alambre y/o del resorte que será utilizado para el desarrollo del prototipo es necesario contar con un modelo matemático que pueda reproducir con cierta precisión el comportamiento real dichos elementos. Sólo contando en dicho modelo será posible diseñar un prototipo que sea capaz de aprovechar de manera apropiada el comportamiento del MMF, dicho modelo se presenta en apartado 3.2.1 del presente capítulo.

3.2 Diseño de una válvula reguladora de agua caliente empleando un alambre de Ni-Ti con memoria de forma.

3.2.1.- Principio de operación

Para este primer diseño de válvula, se empleo un alambre de Ni-Ti con memoria de forma que opera como actuador y sensor a la vez. Como se mencionó anteriormente, el utilizar un alambre con memoria de forma permite simplificar el diseño y por lo tanto disminuir el costo.

Como se describe con mayor detalle en la siguiente sección, para que el alambre con memoria de forma pueda realizar la tarea de un actuador, el cual somete al empaque de la válvula a un desplazamiento intermitente, es necesario tener un elemento que pueda someter al alambre a una determinada fuerza de tensión, para ello, se utilizo un resorte helicoidal para tensión convencional. Dicho resorte, ejerce una fuerza longitudinal sobre el alambre que genera una variación en la longitud del alambre al variar la temperatura del agua que está en contacto con éste. Como se describió en la sección 1.2.4, durante el calentamiento, al pasar por la temperatura de transformación martensita-austenita, correspondiente con el esfuerzo inducido, el alambre experimentará una contracción mientras que durante el enfriamiento, al pasar por la temperatura de transformación austenita-martensita, el alambre se elongará.

En la Figura 3.1 se muestran dos curvas deformación-temperatura correspondientes a un alambre con memoria de forma al ser sometido a dos esfuerzos normales constantes de magnitud: σ_1 y σ_2 .

Como se ve en la Figura 3.1, el alambre con memoria de forma es capaz de arrastrar una carga, como la del resorte helicoidal convencional, durante el calentamiento y a su vez durante el enfriamiento, la carga del resorte inducirá una elongación. Ambas, acciones son suficientes para abrir y cerrar la válvula de manera automática sin necesidad de emplear sensores, actuadores ni componentes eléctricos o electrónicos típicos de un sistema de automatización convencional.

Cabe mencionar que, como se verá más adelante, la carga que ejerce el resorte helicoidal convencional sobre el alambre con memoria de forma no es constante más bien incrementa al incrementar la temperatura. Dicha variación respecto al comportamiento mostrado en la Figura 3.1 no altera esencialmente el comportamiento esperado aunque sí disminuye ligeramente el desplazamiento que experimenta el alambre con memoria de forma.

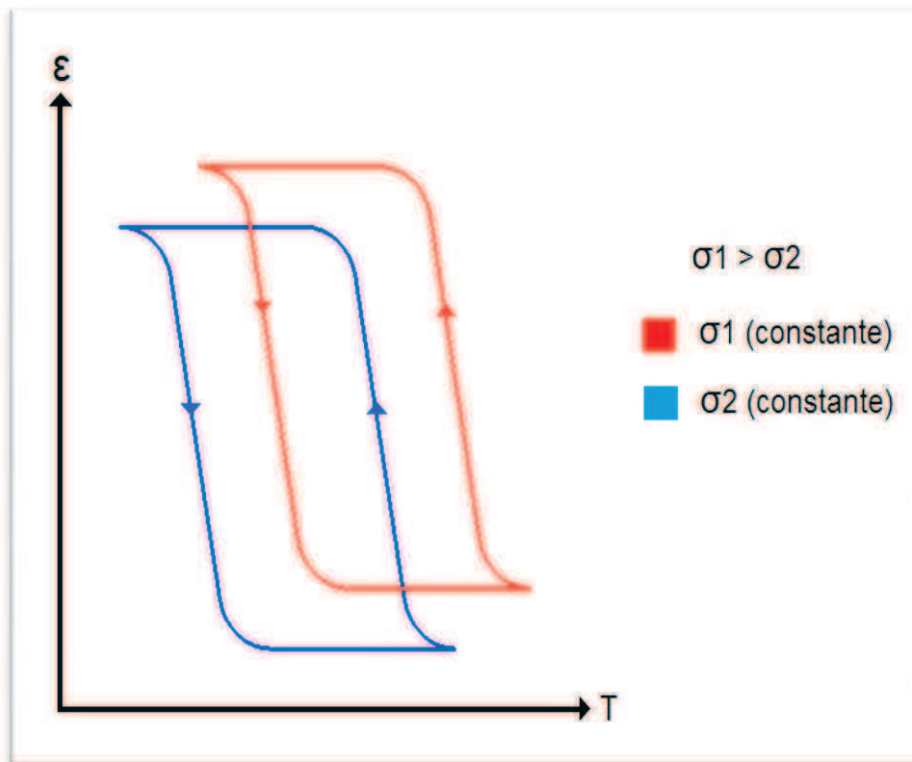


Figura 3.1. Diagramas deformación-temperatura presenta un alambre con memoria de forma al ser sometido a una carga de tensión constante que inducen esfuerzos normales cuya magnitud es σ_1 y σ_2 .

Es importante mencionar que las recomendaciones del fabricante del alambre indican que la temperatura máxima de operación no exceda de 100°C por encima de la temperatura A_f el material ya que podría perder sus propiedades súper-elásticas.

Como se menciona anteriormente, durante el calentamiento el alambre de Ni-Ti, debe alcanzar una temperatura mayor a la temperatura de transformación austenítica (A_s), y deberá ser enfriado hasta una temperatura menor a la temperatura de transformación martensítica (M_f) para completar el ciclo. La fuente de calentamiento o enfriamiento serán los medios líquidos que pasen por el interior de la válvula.

Para verificar el funcionamiento del arreglo propuesto, se elaboró un modelo físico como el que se muestra en las Figuras 3.2 y 3.3 y cuyos componentes se enlistan en la Tabla 3.1.

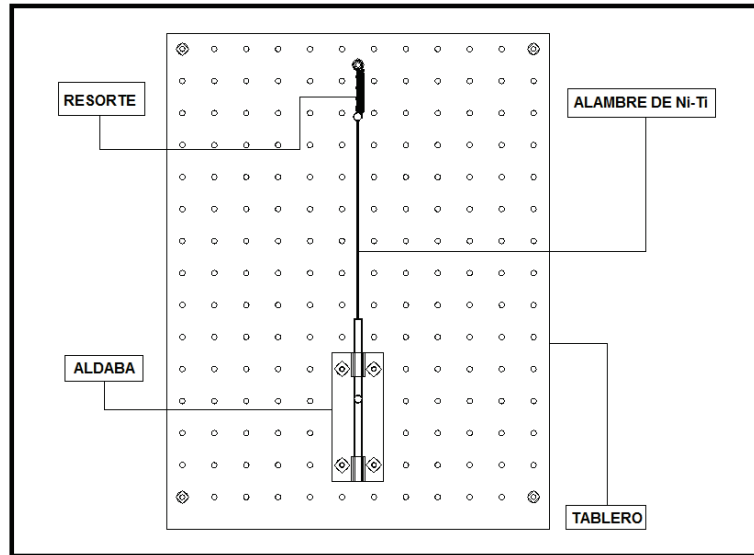


Figura 3.2. Modelo físico construido para verificar el comportamiento del alambre con memoria de forma.

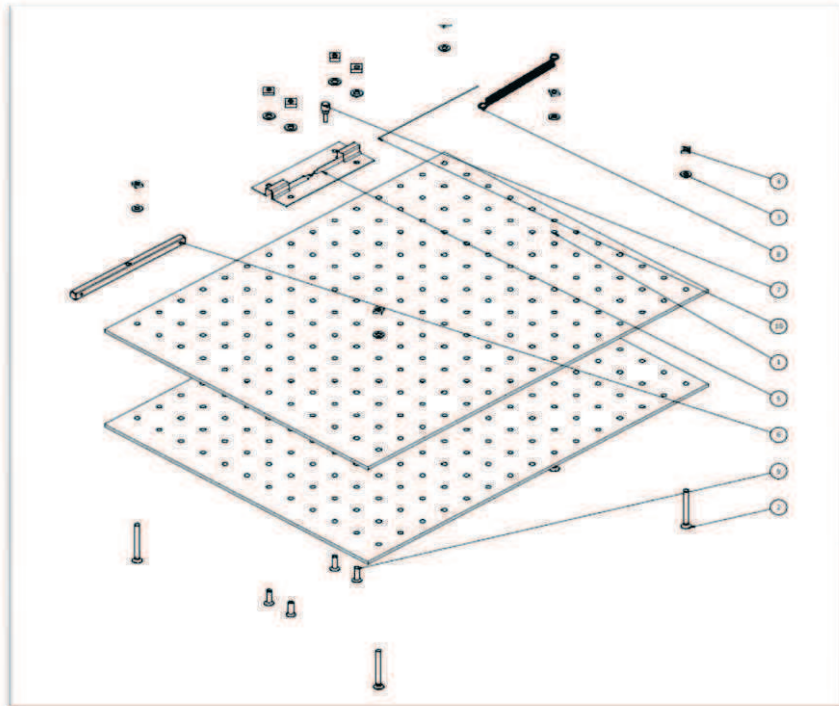


Figura 3.3. Diagrama en explosivo del modelo físico mostrado en la Figura 3.2.

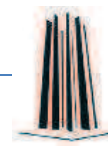


Tabla 3.1. Lista de componentes del modelo físico de las Figuras 3.2 y 3.3.

PIEZA	CANTIDAD	NOMBRE	DESCRIPCION
1	2	Tablero	Base rígida sobre la cual yace el arreglo correspondiente al diseño conceptual
2	5	Tornillo ISO 2010 M4X40	Tornillos utilizados para fijar los tableros y proporcionar un punto de anclaje al resorte
3	1	Arandela DIN 125-1AA4,3	Utilizada para mejorar la sujeción que brindan las tuercas sobre el tablero, lo cual evita desplazamientos entre los tableros
4	9	Tuerca cuadrada No. 8-36	Utilizada para la fijación de los tornillos al tablero.
5	1	Cuerpo de aldaba	Su función es restringir el movimiento del poste que es utilizado a modo de corredera.
6	1	Poste de aldaba	Este se conecta al alambre de Ni-ti y permite obtener un desplazamiento lineal producto de la TM del alambre
7	1	Seguro de poste	Utilizado para restringir el movimiento lineal sufrido por el poste al desplazarse linealmente.
8	1	Resorte	Resorte helicoidal de tensión utilizado para imprimir una fuerza de tensión en el alambre de Ni-ti
9	4	Tornillo ISO 2010M4X20	Tornillo utilizado para fijar el cuerpo de la aldaba al tablero
10	1	Alambre de Ni-Ti	Elemento motor y sensor del dispositivo, este va conectado al resorte y al poste con el objetivo de provocar un desplazamiento lineal en este último cuando la temperatura se incremente por encima de As

El alambre con memoria de forma del modelo físico se calienta haciendo pasar por él una corriente eléctrica y es enfriado al aire por lo que los intervalos de tiempo entre el calentamiento y el enfriamiento son diferentes. Así mismo, en el modelo físico la apertura y cierre de la válvula es simulada con una corredera de un picaporte.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los elementos componentes del modelo físico así como su función dentro del conjunto. Los componentes que se describirán son:

- Tablero
- picaporte
- Resorte
- Alambre de Ni – Ti
- Fuente de alimentación de voltaje variable
- Elementos accesorios

Estos elementos cumplen funciones muy específicas dentro del funcionamiento del arreglo, el cual tiene el objetivo de poder generar un movimiento lineal aprovechando las elongaciones y contracciones que sufre el alambre de Ni-Ti debido a la transformación martensítica reversible que se presenta en dicho material cuando es sometido a una variación de temperaturas que permita que dicho fenómeno se presente, y, mediante el arreglo realizado con estos componentes se demuestra la viabilidad de un sistema que permita la construcción de una válvula que opere bajo ciertas condiciones de fluctuación térmica.

Tablero

La función del tablero es el sujetar rígidamente al resto de los componentes del sistema, dicho tablero debe ser lo suficientemente rígido para no sufrir deformaciones significativas debido a las fuerzas que se generan cuando el dispositivo se encuentra en operación. El tablero empleado es llamado perfocel, el cual ofrece la ventaja de que se pueden colocar los tornillos para sujetar rígidamente a los demás componentes del sistema. En la Figura 3.4 se muestra la vista superior del tablero así como sus principales dimensiones.

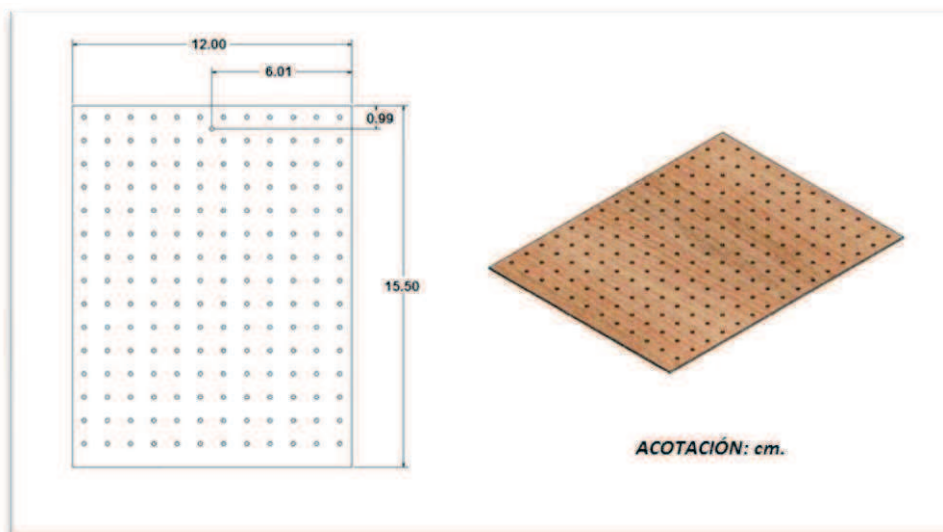
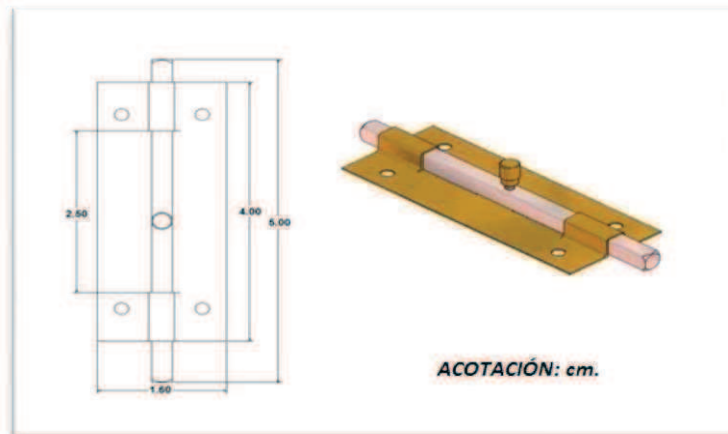


Figura 3.4. Tablero de “perfocel” empleado en el modelo físico.

Picaporte

El picaporte se utiliza como corredera sencilla ya que ofrece un desplazamiento longitudinal que será generado por la elongación y contracción del alambre de Ni-Ti. Para ello el cuerpo del picaporte, que sirve como guía del poste, se sujeta con tornillos al tablero. El alambre de Ni-Ti se sujeta a un extremo del poste para que este sea desplazado por la interacción entre el resorte de tensión y el alambre, mientras que el seguro es utilizado para restringir el movimiento lineal del poste y evitar que éste se salga de su ubicación. La posición del poste dependerá de la fase en la cual se encuentre el alambre de Ni-Ti; si éste se encuentra en su fase martensítica será elongado por la tensión ejercida por el resorte de tensión; si se encuentra en fase austenítica el alambre recuperará su longitud original elongando el resorte y desplazando el poste en dirección opuesta a la anterior.

En la Figura.3.5 se muestra el ensamble correspondiente al sistema que hace las veces de corredera en el modelo.



3.5. Ensamble del sistema que hace las veces de la corredera en el modelo.

Resorte

El resorte es el encargado de que el poste regrese a su posición inicial cuando el alambre de Ni-Ti se encuentra en su fase martensítica. Dicho resorte está sujeto al alambre de Ni-Ti por uno de sus extremos, mientras que el otro se encuentra fijo al tablero mediante un tornillo.

Este resorte es elemento que permite que el mecanismo tenga un movimiento alternativo, según los cambios de temperatura que sufra el alambre, ya que de lo contrario el sistema no podría regresar a su estado inicial. Además la tensión que el resorte genera provoca esfuerzos a lo largo del alambre, lo que se traduce en una

reducción de la temperatura crítica de transformación del alambre. En la Figura 3.6 se muestra la imagen del resorte de tensión utilizado para el sistema.



Figura 3.6. Resorte helicoidal de tensión.

Alambre de Ni-Ti

El alambre de Ni-Ti es el elemento medular del dispositivo ya que gracias a él es posible realizar el desplazamiento del poste mediante un mecanismo sumamente sencillo el cual aprovecha el efecto memoria de forma al ser calentado, por encima de la temperatura crítica **A_s** , por medio de un circuito eléctrico de corriente directa en donde un alambre de Ni-Ti actúa como la resistencia. Cuando se suspende el paso de la corriente eléctrica por el alambre su temperatura disminuye por debajo de **M_s** , el alambre es elongado por el resorte, el cual se contrae y hace que el poste se desplace en sentido opuesto al anterior.

Cabe destacar que el alambre de Ni-Ti puede ser elongado hasta un 8% de su longitud original sin sufrir deformaciones plásticas, pero para evitar el riesgo de que eso ocurra el dispositivo está diseñado para permitirle el 4% de elongación, esto se logra gracias a la restricción que el seguro brinda al poste. El alambre utilizado tiene una sección transversal de 0.0254cm de diámetro y 40cm de longitud, y con un 49.4% de Níquel aproximadamente. El alambre empleado en esta parte del trabajo se muestra en la Figura 3.7

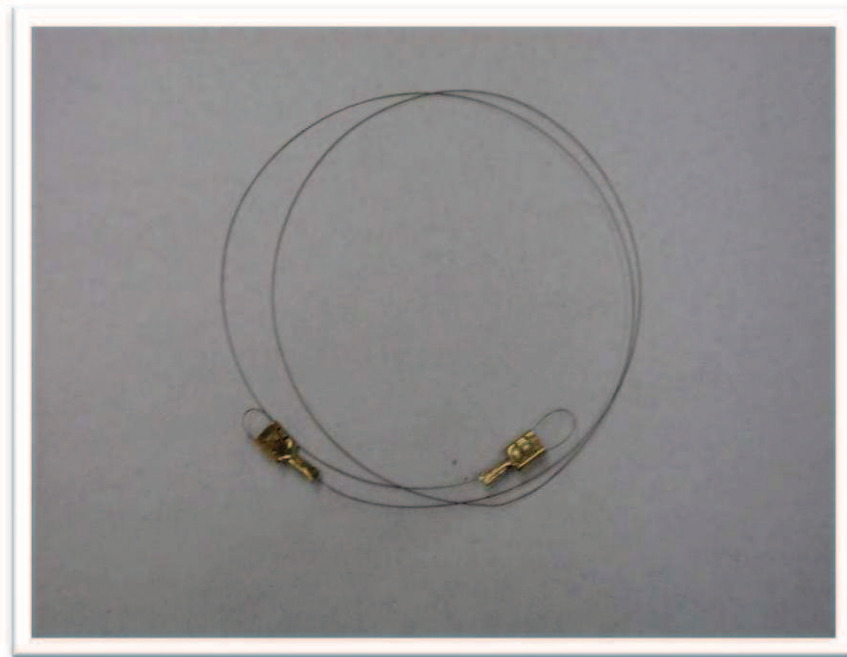


Figura 3.7. Alambre de Ni-Ti con memoria de forma empleado en el estudio.

Por otro lado, la Figura 3.8 muestra las dos posiciones extremas del modelo descrito en la presente sección. En dicha figura se aprecia el desplazamiento del resorte provocado por la contracción del alambre de Ni-Ti al ser calentado induciéndole una corriente eléctrica.

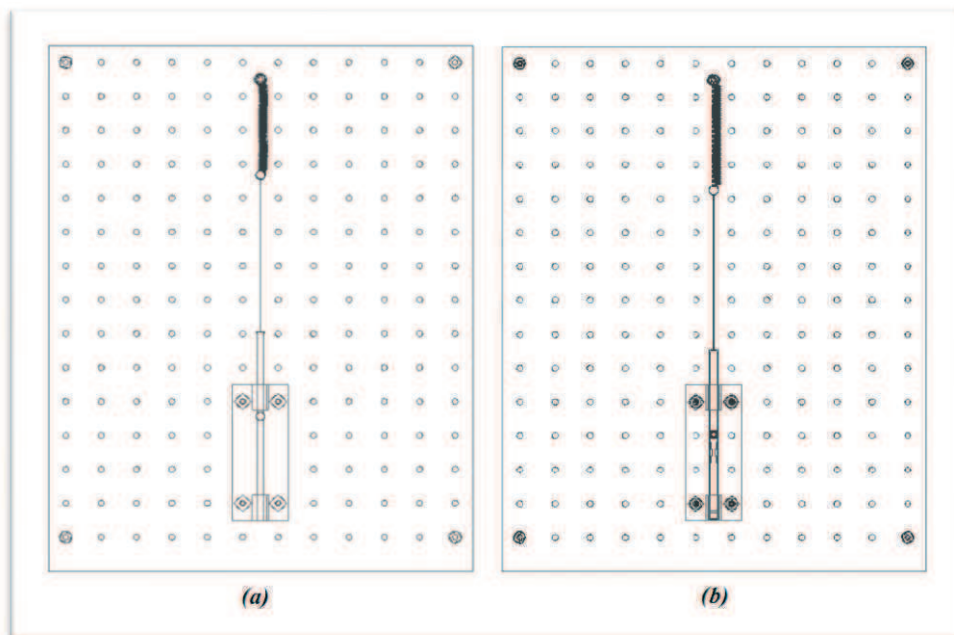


Figura 3.8. Diagrama que muestra las dos posiciones extremas que toma el modelo descrito en la presente sección.

Fuente de alimentación de voltaje variable

Con el fin de activar por calentamiento la transformación: martensita-austenítica en el alambre de Ni-Ti, se utilizó una fuente eléctrica de corriente directa (VCD) la cual recibe como alimentación 127 V de corriente alterna a 0.5 A y tiene una salida de 1.5 A y un voltaje variable de 1.2 a 33V.

Como se mencionó anteriormente, si se conecta cada una de las terminales de la fuente en ambos extremos del alambre de Ni-Ti se crea un circuito en corto el que el alambre actúa como una resistencia que sufre un calentamiento por efecto Joule el cual es suficiente para que alambre alcance una temperatura superior a los 92°C, que es la temperatura **A_f** que indica el fabricante del alambre como temperatura de activación. En la Figura 3.9 se muestra el diagrama eléctrico de la fuente empleada para calentar el alambre empleado en el modelo mientras que la Tabla 3.1 se enlistan los componentes de la fuente.

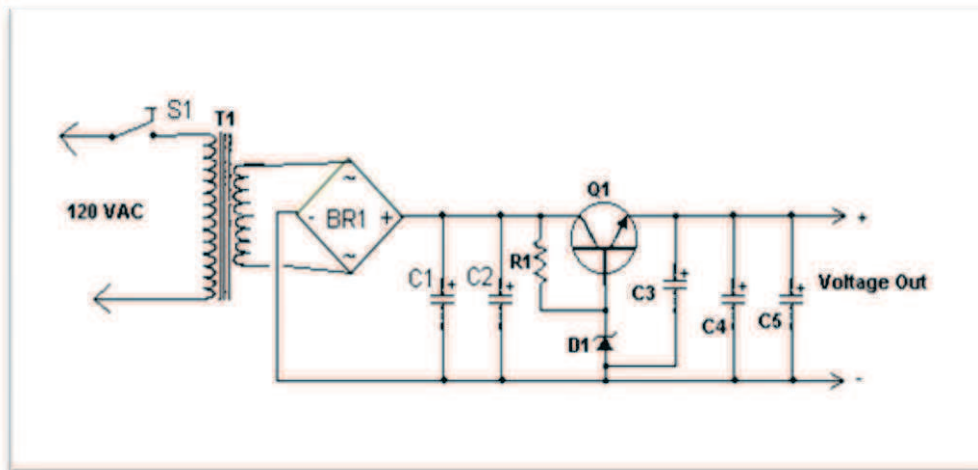


Figura 3.9. Diagrama eléctrico de la fuente empleada para inducir la transformación martensita-austenita al alambre de Ni-Ti con memoria de forma empleado en el modelo.

PARTE	DESCRIPCION	CANTIDAD
R1	Resistor de 680 Ohm y 1/4 Watt	1
C1	Capacitor de 20,000 - 50,000uF a 20-40 Volts	1
C2	Capacitor de 100uF a 50 Volts (electrolítico)	1
C3	Capacitor de 100uF a 50 Volt (cerámico)	1
C4	Capacitor de 0.1uF a 50 Volts	1
C5	Capacitor de 0.01uF a 50 Volts	1
D1	Diodo Zener	1
Q1	Regulador LM317T	1
T1	Transformador	1
BR1	puente rectificador	1
S1	Switch de 250 VAC 10A	1

Tabla 3.2. Elementos componentes de la fuente de la Figura 3.9

Cabe mencionar que si se emplean alambres de mayor área transversal, su resistencia disminuye por lo que es necesario incrementar el voltaje aplicado necesario para inducir la corriente necesaria para incrementar la temperatura del alambre y puede experimentar la transformación martensita-austenítica. Así mismo, es importante aclarar que las temperaturas transformación del material (**As, Af, Ms y Mf**) dependen de la composición química del material así como de la microestructura [16]

Elementos accesorios

Los elementos accesorios tienen la función de fijar rígidamente los componentes del dispositivo entre sí, y proporcionar un punto de anclaje al resorte de tensión, básicamente, son elementos de sujeción estandarizados cuyos códigos de artículo se incluyen en la Tabla 3.1 correspondiente a la lista de partes del sistema. Debido a que dichos accesorios son piezas de producción estandarizada no se incluyen planos de dichas piezas en este trabajo de tesis. En la Figura 3.10 se muestran los elementos accesorios utilizados que son esencialmente tornillo con tuercas y arandelas.



Figura 3.10. Elementos accesorios; tornillos, tuercas y arandelas

Operación del modelo

El alambre con memoria de forma, cuyas temperaturas de transformación están por encima de la temperatura ambiente, es sometido a un esfuerzo normal producido por un resorte de tensión, lo que ocasiona que el alambre sufra la máxima elongación durante su operación. Dicho arreglo es montado en el tablero que debe ser lo suficientemente rígido para no flexionarse debido a la tensión ejercida por el alambre al sufrir la transformación martensita-austenita la cual ocurre cuando el alambre es calentado empleando para ello la fuente eléctrica descrita anteriormente. Al ocurrir la transformación martensita-austenita, el alambre con memoria de forma se contrae elongando al resorte helicoidal, y por lo tanto incrementando la carga que éste ejerce

sobre él, que a su vez genera un desplazamiento de la corredera respecto a su posición original.

En la Figura 3.11 se muestran los diagramas Esfuerzo-Temperatura-transformación y fracción volumétrica de martensita-Temperatura para los casos:

- Cuando la transformación se martensita se induce a esfuerzo constante y enfriamiento.
- Cuando la transformación martésítica se induce a esfuerzo variable, que incrementa con la temperatura, y enfriamiento.

Es claro que el comportamiento que presenta el modelo descrito en la presente sección corresponde con el caso b) ya que a alta temperatura el resorte helicoidal es estirado por el alambre con memoria de forma mientras que durante el enfriamiento se relaja aplicando una carga menor al alambre. Como se ve, en las gráficas de la Figura 3.11 el efecto inducido es un incremento en el intervalo de temperaturas en el que ocurre la transformación. Así mismo, en la Figura 3.12 se aprecia claramente que la deformación resultante en el caso b) es ligeramente menor que el caso a) donde el esfuerzo es constante.

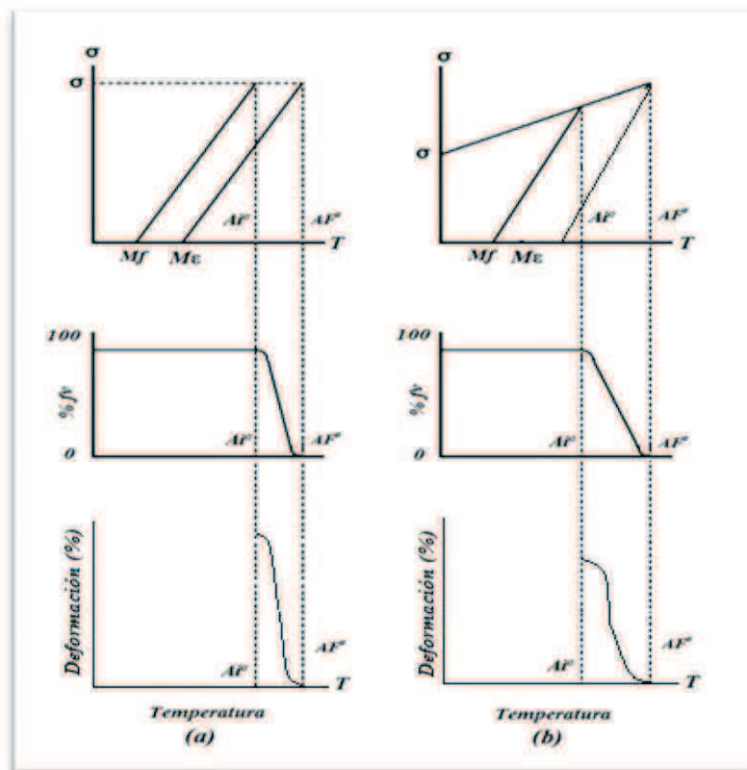


Figura 3.11. Diagramas Esfuerzo-Temperatura-Transformación y fracción volumétrica transformada-temperatura que muestran la transformación martensítica: a) a esfuerzo constante y enfriamiento y b) a esfuerzo variable y enfriamiento.



El desplazamiento longitudinal que sufre la corredera del modelo al ser calentado el alambre con memoria de forma es precisamente el que se aprovecha para abrir la válvula que a continuación se describe. En dicho caso el calentamiento proviene del agua procedente del boiler y el desplazamiento de la corredera es empleado para permitir el paso del agua caliente a la regadera. Los datos obtenidos de las pruebas realizadas al modelo se utilizaron como algunos de los parámetros de diseño del primer prototipo de la válvula economizadora de agua, el cual se describe a continuación.

3.2.2 Diseño del prototipo que utiliza alambre de Ni-Ti.

Utilizando los resultados de las pruebas realizadas en el dispositivo anteriormente descrito y tomando en cuenta las características estándar de las tuberías domésticas típicas de la ZMVM, se desarrolló el primer prototipo de la válvula economizadora de agua con alambre de Ni-Ti. Como se mencionó anteriormente la válvula economizadora de agua tiene como objetivo contribuir al ahorro de agua evitando el desperdicio que se da en las regaderas domésticas. El desperdicio que se pretende evitar es el que se debe generalmente al agua que se encuentra en la línea del agua caliente y que está fría y hasta tarda unos minutos en ser desplazada por el agua caliente que proviene del calentador.

Según datos de la CONAGUA y del IMTA, una regadera doméstica que cuenta con un dispositivo aireador puede llegar a tener un consumo de hasta 5lt/min, mientras que regaderas que carezcan de este dispositivo pueden llegar presentar consumos aun mayores. Por otro lado en una zona que cuenta con una población cercana a los 20 millones de habitantes asentados en cerca de 5 millones de hogares podemos darnos cuenta que la cantidad de agua que se desperdicia durante unos minutos en cada regadera se vuelve sumamente significativa. Es por ello que resulta de gran importancia para una ciudad como el D. F. contar con un dispositivo funcional, adaptable a la infraestructura hidráulica doméstica y económicamente viable, y que pueda contribuir al ahorro del recurso hídrico puede ser de gran valor para mejorar el aprovechamiento del agua potable en dicha zona.

El prototipo de la válvula economizadora de agua se diseñó de tal manera que pueda acoplarse a las instalaciones hidráulicas domésticas sin tener que hacer mayores modificaciones en las mismas, la mayor parte de los elementos de dicha válvula son de cobre, debido a que es un metal muy utilizado en las tuberías domésticas, ya que es un material resistente a la oxidación, no tóxico y económicamente accesible, los únicos elementos dentro de la válvula que no son de cobre son el empaque, que es de BUNA (Caucho sintético), el resorte de compresión que es de acero C-75, y el alambre de

Ni-Ti. A continuación se describen los componentes de dicha válvula así como el ensamble de los mismos.

Es importante mencionar que dado que pueden existir importantes variaciones en condiciones climáticas en distintas regiones del país, el uso de las aleaciones propuestas en estos diseños son únicamente contemplando las condiciones climáticas de la ZMVM, por lo que si el prototipo se prueba fuera de esta zona podría haber alteraciones en su comportamiento termo-mecánico.

3.2.3 Descripción del ensamble de los componentes

El primer elemento de la válvula ha sido denominado “cuerpo de la válvula” y sirve como elemento de unión entre las dos cuerdas de las tuercas unión, permitiendo colocar ambas tuercas con sus cuerdas en direcciones opuestas, y a su vez sirve como contenedor del resorte, el empaque, la base del resorte, y el sujetador del empaque. El cuerpo de la válvula cuenta con una serie de pequeños barrenos que corren paralelamente con el eje de la pieza y se ubican alrededor del orificio central. Estos orificios permiten el paso del fluido una vez el empaque sea retraído hacia el interior de dicho cople, en el orificio central es donde son contenidos el resorte y el sujetador del empaque con la finalidad de que evitar desplazamientos no paralelos al eje central del cuerpo de la válvula durante la operación del dispositivo. En la Figura 3.12 se muestra dicho elemento.

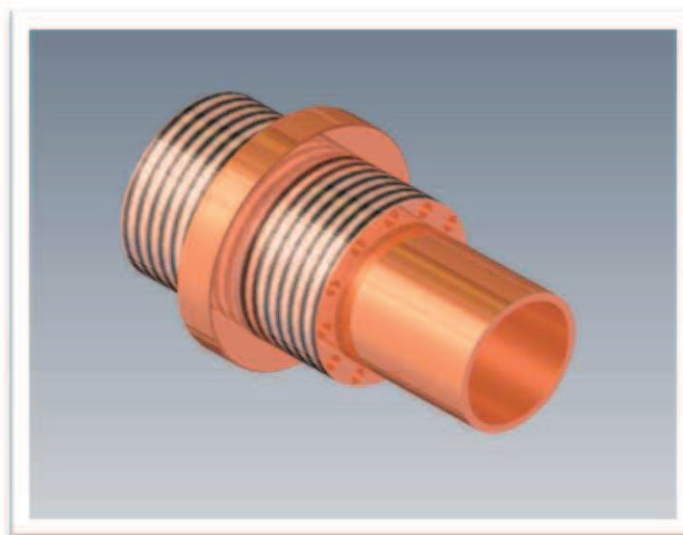


Figura 3.12. Cuerpo de la válvula

En la parte posterior del cuerpo de la válvula se aloja la base de resorte, dicha base únicamente se coloca en la parte posterior, sin ningún tipo de fijación puesto que la tuerca unión que posteriormente se enrosca al cuerpo de la válvula es la que restringe

todo movimiento de la base, la cual, tiene la función de brindarle una superficie de contacto al resorte para que este se pueda comprimir sin desalineamientos durante la operación de la válvula. En la Figura 3.13 se muestra el ensamble anteriormente mencionado.

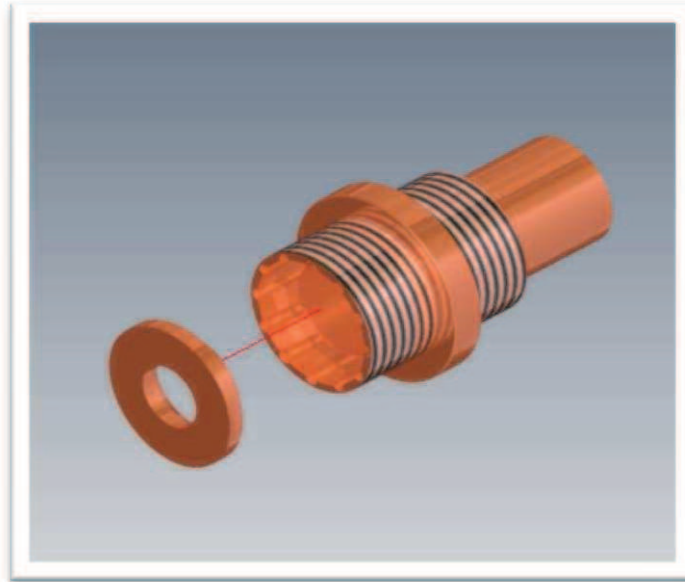


Figura 3.13. Ensamble del cuerpo de la válvula y asiento del resorte

Por otra parte, antes de montarse en el cuerpo de la válvula, la tuerca unión debe de soldarse a una reducción de cobre que va de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " para poder incorporar la válvula a una instalación hidráulica domestica común. Para ello, se utiliza una soldadura de estaño-plomo con un 95% de estaño, ya que de las soldaduras comerciales de estaño-plomo, es la que tiene mayor adherencia, así mismo cabe mencionar que la válvula requiere de dos tuercas unión y de dos reductores. En la Figura 3.14 se muestra el ensamble de estos dos elementos.

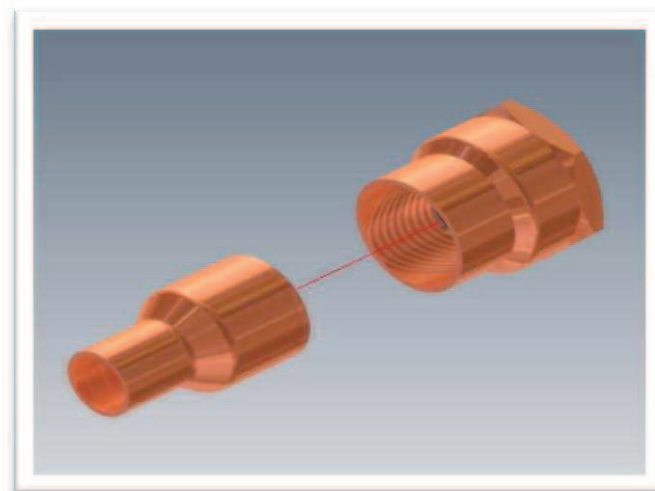


Figura 3.14. Ensamble de la tuerca unión con la reducción

Una vez soldados estos elementos una de las tuercas unión puede enroscarse al cuerpo de la válvula, esto se debe hacer del mismo lado en el que se colocó la base del resorte, con la finalidad de sujetar dicha base y con ello poder colocar el resorte, el sujetador de empaque, y el empaque dentro de la parte tubular de dicho cuerpo. La Figura. 3.15 muestra el ensamble de la tuerca unión con el cuerpo de la válvula.

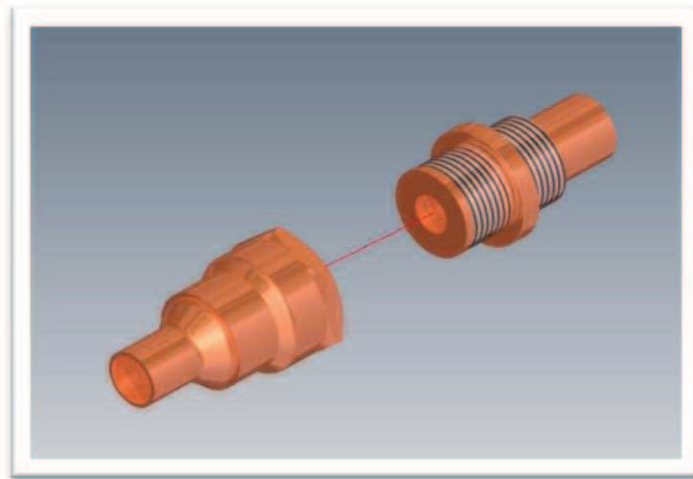


Figura 3.15. Ensamble del cuerpo de la válvula con la tuerca unión

Una vez que la tuerca unión de la parte posterior ha sido enroscada y que esta ha presionado lo suficiente la base del resorte para que esta quede fija, se coloca el resorte dentro de la parte tubular del cuerpo de la válvula como se muestra en la Figura 3.16

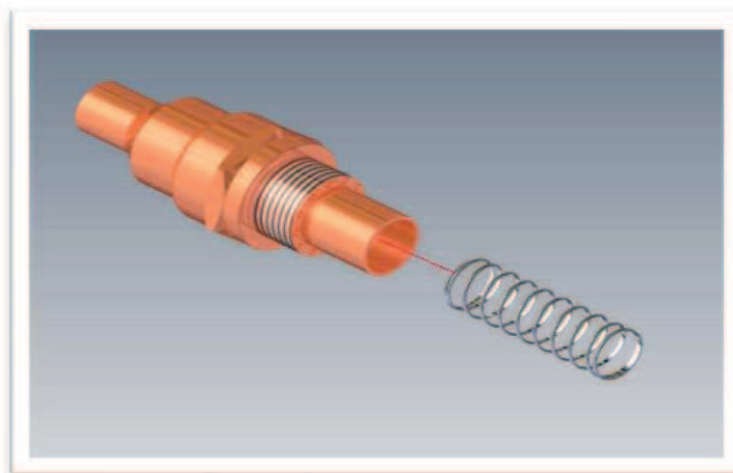


Figura 3.16. Inserción del resorte de compresión al conjunto: tuerca unión-reducción-cuerpo de la válvula.

Por otra parte, el empaque se fija al sujetador del empaque por medio de un tornillo de 1/8" como se muestra en la Figura 3.17. El sujetador de empaque debe deslizarse en el interior de la parte tubular del cuerpo de la válvula y en la parte trasera posee unas asas las cuales sirven para que el alambre de Ni-Ti pase a través de estas.

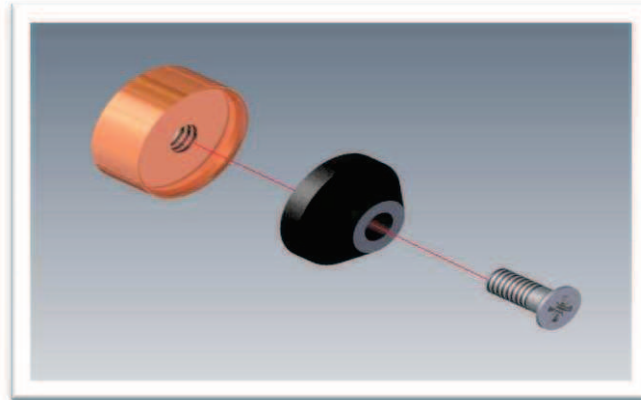


Figura 3.17. Ensamble del empaque con el sujetador

El alambre de Ni-Ti es sensor y actuador termo-mecánico que permite que la válvula sea capaz de realizar su labor sin necesidad de elementos electrónicos o electromecánicos, ya que cuando el agua esta fría, el resorte de la válvula tiende a empujar al sujetador de empaque, lo que ocasiona que el alambre de Ni-ti sufra una deformación aparentemente plástica no mayor al 6% de su longitud original, que es totalmente recuperada cuando el agua sube de temperatura y llega a igualar o superar la temperatura **As** de la aleación. Cuando la temperatura es alta el alambre genera una compresión del resorte y con ella la retracción del sujetador y del empaque, lo que permite que el agua caliente pueda continuar su paso a través de la válvula. En la Figura 3.18 se muestra como el sujetador descansa sobre el resorte y como el alambre de Ni-Ti, pasa a través de todo el cuerpo de la válvula.

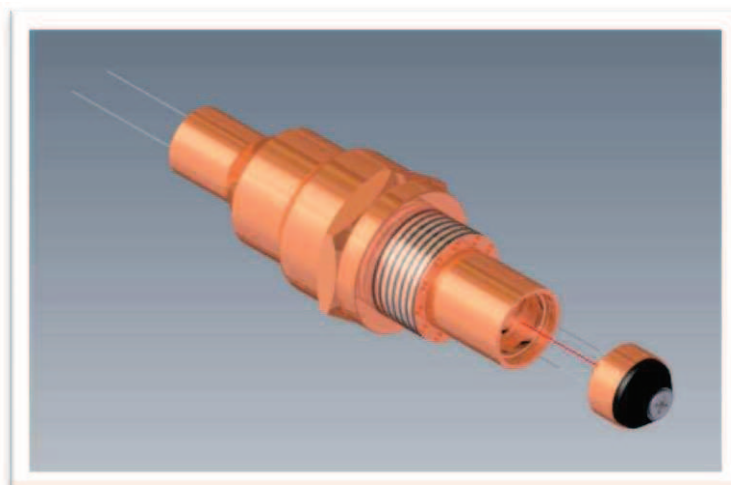


Figura 3.18. Inserción del sujetado con empaque y alambre al cuerpo de la válvula

Una vez colocados en posición el alambre de Ni-Ti, el sujetador, y el empaque en su posición se debe enroscar la otra tuerca unión al cuerpo de la válvula, para esto debe de haberse soldado previamente el cople reductor a dicha tuerca como se muestra en la Figura 3.19.

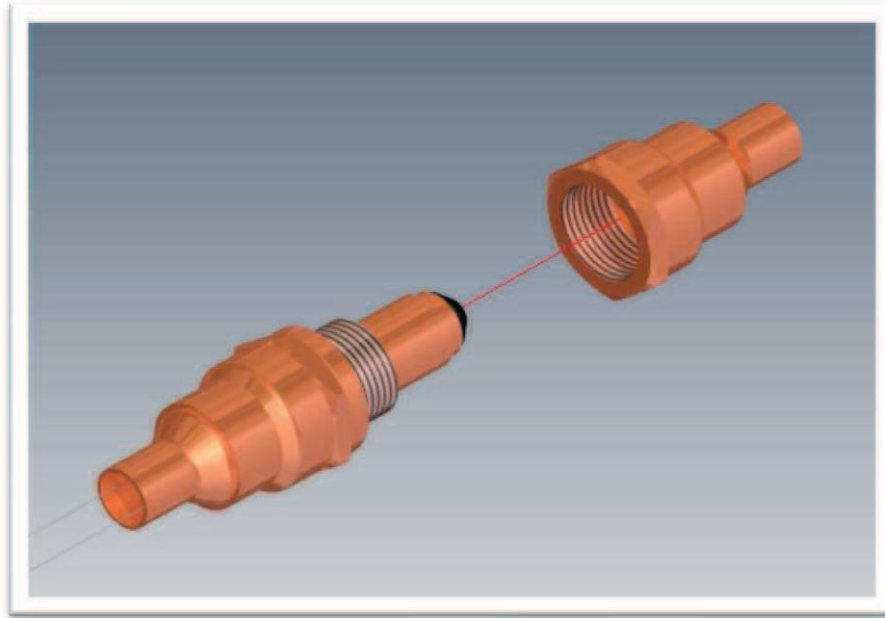


Figura 3.19. Ensamble del prototipo de válvula economizadora de agua que emplea un alambre con memoria de forma.

3.2.4 Descripción del funcionamiento del sistema.

El diseño de la válvula economizadora de agua empleando un alambre con memoria de forma aprovecha el comportamiento termo-mecánico del alambre de Ni-Ti, de tal manera que dicho alambre actúa como sensor y actuador de tal manera que cuando se encuentra en su fase martensítica, a temperaturas menores a M_s , sea elongado por el resorte, de tal manera que dicho resorte empuja al sujetador y al empaque contra la pared de uno de los coples reductores (b), lo que impide que el agua pase a través del orificio cuando la temperatura de la misma es menor a la anteriormente mencionada. Para el caso en el cual la temperatura del agua es mayor a M_s , el alambre sufrirá un paulatino cambio de fase martensita-austenita, con lo que el alambre recupera la deformación aparentemente plástica sufrida por efecto del resorte de tensión. Lo anterior ocasiona que el resorte se comprima y hace que el sujetador y el empaque se desplacen hacia adentro de la parte tubular del cuerpo de la válvula con lo que se permite el flujo del agua caliente hacia la regadera. En la Figura.3.20 se muestra una vista lateral y una vista de corte del sistema, mientras que el explosivo y su lista de partes correspondiente se incluyen en el apéndice I.

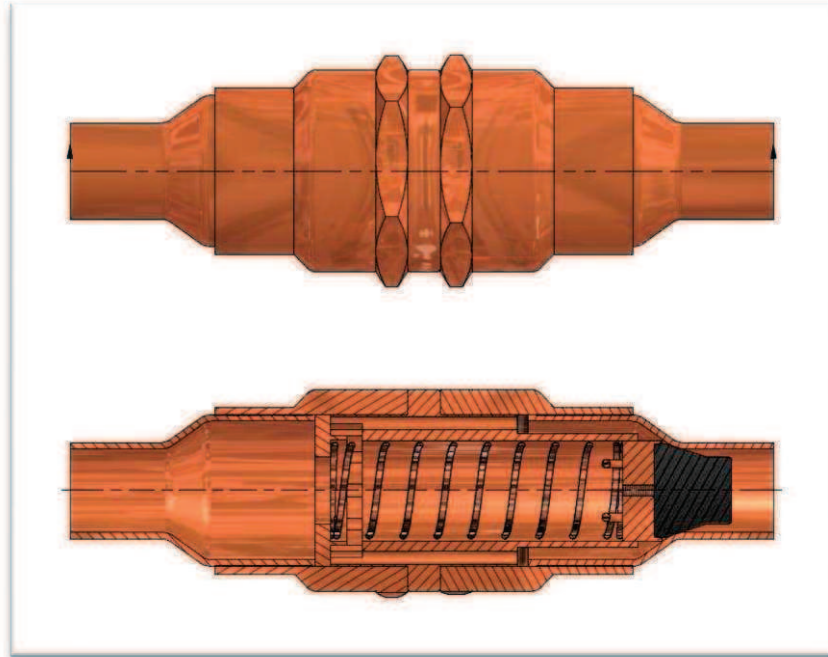


Figura 3.20. Vista lateral del ensamble de la válvula economizadora de agua que emplea un alambre con memoria de forma.

3.3 Diseño de una válvula economizadora de agua utilizando resortes de Ni-Ti.

Tomando en cuenta el diseño conceptual y el prototipo de la válvula economizadora de agua que utiliza alambre de Ni-Ti, se busco un prototipo alternativo de esta misma, pero esta vez en lugar de que el dispositivo termo-mecánico sea un alambre se contemplo el uso de dos resortes de Ni-Ti, con lo cual se espera obtener ciertas diferencias en la conformación y en el desempeño de dicho dispositivo con respecto al prototipo anteriormente mencionado. Del mismo modo que en el prototipo anterior, este prototipo también está diseñado con el objetivo de ser compatible con las instalaciones hidráulicas domésticas con el objetivo de que sea fácil de implementar y que su instalación sea lo más económica posible, en este caso el diseño incluye una entrada y dos salidas de agua, esto con la finalidad de que el agua fría pueda retornar hacia algún deposito, para lo que, en el diseño anterior es necesario de la ayuda de una derivación con una válvula que no permita el retorno del agua (válvula check).

Los principales objetivos de utilizar resortes de Ni-Ti como base de este segundo prototipo son el eliminar la necesidad de la válvula de no retorno, el poder obtener mayor elongación con un elemento de mucho menor longitud que el alambre, y, sobre todo, el crear una alternativa de solución que permita comparar ventajas y desventajas

entre ambos diseños con lo que se pretende evaluar de manera más eficaz la funcionalidad y la factibilidad de ambos prototipos, y de este modo tener más y mejores elementos de criterio para poder determinar la viabilidad económica y técnica de ambos diseños, puesto que actualmente en México, no se cuenta con una tecnología afín que utilice este tipo de aleaciones, hecho que obliga al diseñador a proponer cuando menos dos alternativas, ya que de lo contrario no se tendría punto de comparación para los mismos, y el conocer sus beneficios y sus oportunidades de mejora sería más difícil. A continuación se procederá a describir los elementos y el ensamble de los mismos.

3.3.1 Componentes y ensamblaje del prototipo alterno.

La válvula economizadora de agua que utiliza resortes de Ni-Ti posee una carcasa de acrílico dentro de la cual se encuentra el mecanismo principal así como algunos elementos diseñados para mejorar la hermeticidad de la misma, dicha carcasa será elaborada en acrílico por dos principales motivos, el primero es debido a que el acrílico es un material económico y fácil de trabajar, y el segundo es que, en un prototipo es de gran utilidad que se pueda observar a simple vista el comportamiento del mecanismo con el fin de determinar posibles mejoras futuras al mismo, y como es sabido, el acrílico puede ser traslúcido después de pasar por un cuidadoso proceso de pulido, lo que lo hace un material ideal para el efecto ya que también puede soportar las temperaturas de trabajo para las cuales fue diseñada la válvula. Cuenta con una base y cuatro paredes cuyos planos se incluyen en el apéndice II. Dicha carcasa se muestra en la Figura 3.21.

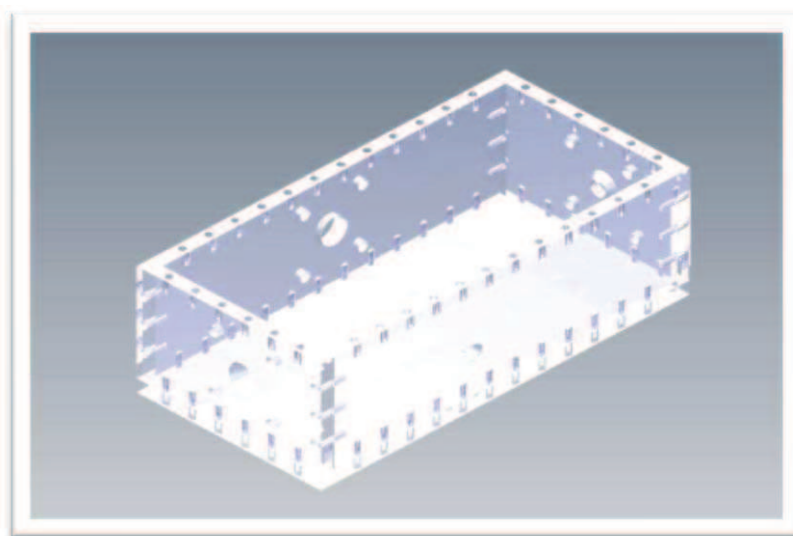


Figura 3.21. Carcasa De la válvula a base de resortes de Ni-Ti

Como se muestra en la Figura 3.22, la base central inferior es fijada a la carcasa por cuatro tornillos de 1/8" de diámetro y 1/4" de pulgada de longitud en la base y por un tornillo de 1/4" de diámetro y 1/2" de longitud en una de las paredes laterales, con la finalidad de brindarle apoyo al mecanismo principal, esta pieza puede fabricarse en acero inoxidable o cobre, debido a que tendrá contacto con el agua cuando la válvula se encuentre instalada. Cabe mencionar que en algunas imágenes la carcasa no se muestra de forma completa para evitar confusiones durante la explicación.

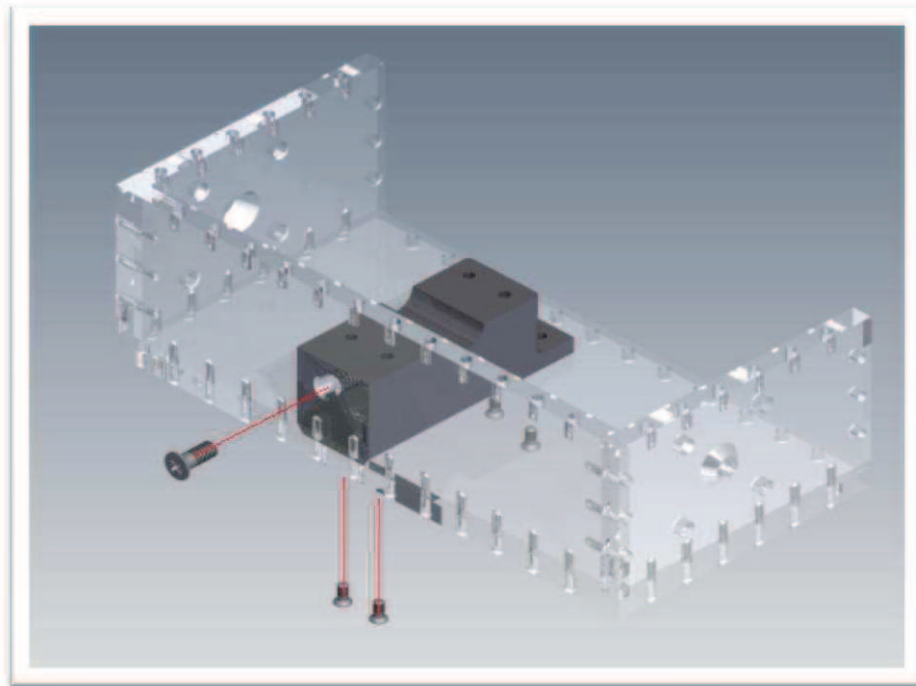


Figura 3.22 Ensamble de la base central inferior al cuerpo de la carcasa

A continuación, dos de los tornillos de sujeción de los resortes de Ni-Ti son colocados en la placa de resortes y en el asiento con sujetadores respectivamente, dichos tornillos poseen la función de fijar los extremos de los resortes de Ni-Ti permitiendo así que el resorte de expansión provoque una elongación aparentemente plástica en los resortes de Ni-Ti que mantiene abierta la salida al retorno, mientras que cuando el agua se encuentra a una temperatura menor que la temperatura ***M_s*** de la aleación y que de no ser así, los resortes se contraigan moviendo consigo el mecanismo principal y comprimiendo al resorte de expansión para abrir la salida que va hacia la regadera. En la Figura 3.23 se muestra la colocación de dichos tornillos.

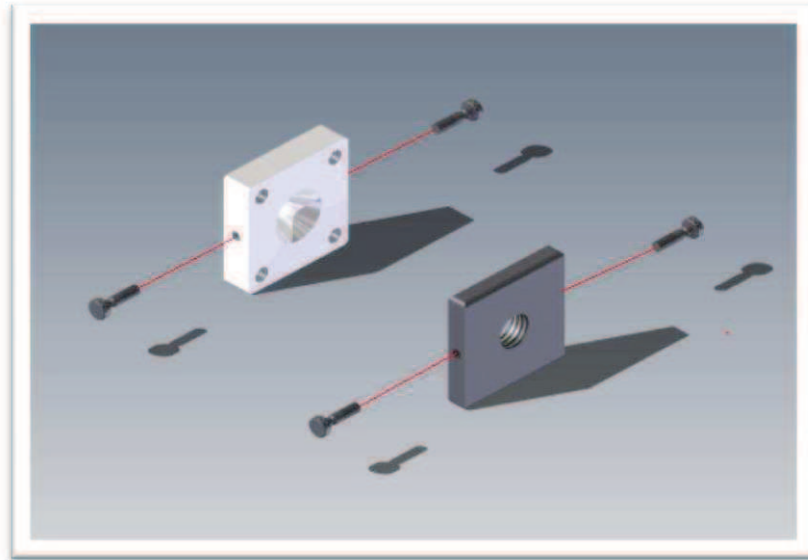


Figura 3.23. Ensamble de los tornillos sujetadores a la placa de resortes y al asiento con sujetadores

Por otra parte, a través de la pared frontal, posterior y en la pared lateral opuesta a donde se fijo la base central inferior, se atornillan los dos asientos y la placa de entrada con los tres conectores de rosca NPT, esto se hace por medio de cuatro tornillos de 3/16" de diámetro por 3/4" de longitud, los dos asientos pueden fabricarse en acero inoxidable o en cobre, poseen orificios cónicos en el centro, los cuales tienen la finalidad de aumentar el área de contacto al momento que los empaques obstruyan las salidas de agua caliente o fría, uno de estos asientos posee un barreno a cada costado con la finalidad de alojar a dos tornillos de sujeción. En la Figura 3.24 se muestra el ensamble de dicha pieza a través de una de las paredes, cabe mencionar que en los tres casos el ensamblaje es exactamente el mismo y en los tres casos el conector de cobre con rosca NPT se debe colocar en la parte exterior de la carcasa.

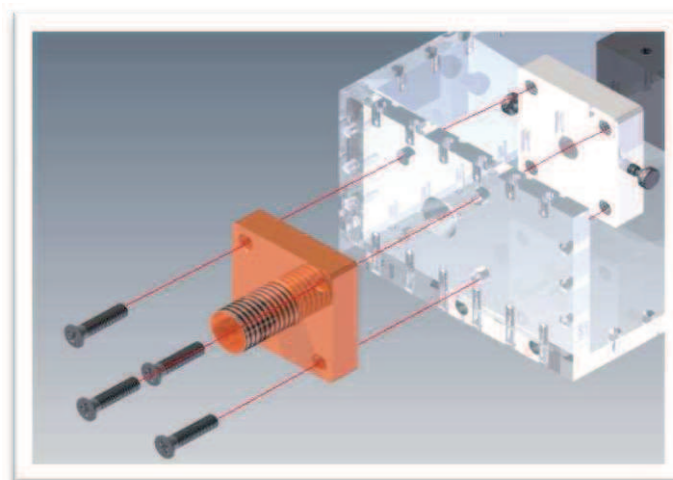


Figura 3.24. Ensamble asiento-carcasa- placa roscada

Con esto se tiene a la carcasa con la base central inferior y con el sistema de conectores y de asientos atornillados a la misma, en la Figura 3.25 se muestra la vista de la carcasa con los elementos anteriormente mencionados donde el asiento con sujetadores (1) queda colocado al frente, el asiento sencillo (2) en la parte posterior, la placa de entrada (3) a un costado de la base central inferior, y los conectores NPT (4) atornillados a los elementos anteriormente mencionados a través de la parte exterior de la carcasa. Posteriormente se proseguirá con el ensamble del mecanismo principal y sus componentes.

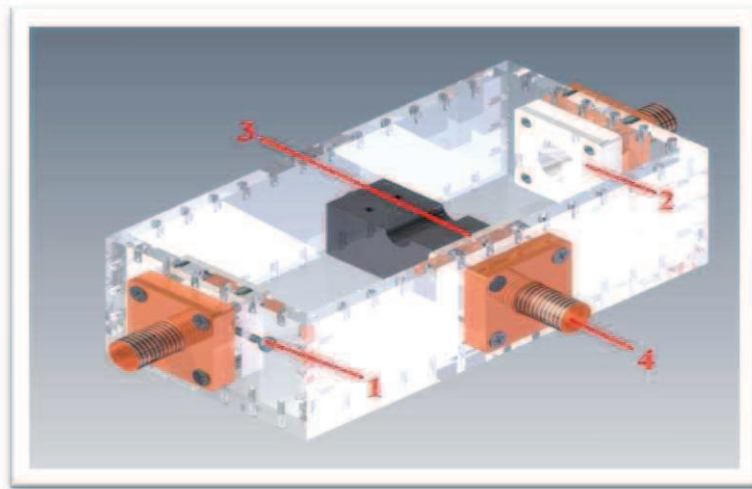


Figura 3.25. Carcasa con base inferior, asientos y pacas roscadas ensamblados a ella.

En el mecanismo principal de la válvula se cuentan todos aquellos elementos que estarán sujetos a la acción de retracción y elongación de los resortes, los cuales tienen como eje un poste de acero inoxidable de 7/16" de diámetro, el cual está roscado por ambas partes, y en cuya rosca más larga se coloca a tope la placa de resortes con los tornillos de sujeción previamente colocados como se muestra en la Figura 3.26

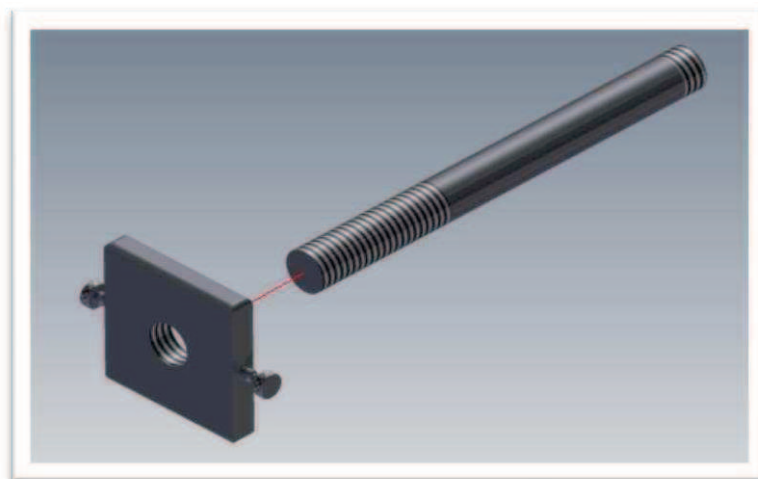


Figura 3.26. Ensamble poste-placa de resortes

Una vez colocada en posición la placa de resortes se procede a insertar los dos sujetadores de empaque en los extremos, antes de esto, es necesario colocar el resorte de expansión de tal manera que pueda correr a lo largo del poste tal y como se muestra en la Figura 3.27 Dicho resorte tiene la finalidad de provocar una elongación aparentemente plástica en los resortes de Ni-Ti cuando estos se encuentren en su fase martensítica, y, a su vez, dicho resorte será comprimido por los resortes de Ni-Ti cuando esto se encuentren en su fase austenítica, dicho resorte es de acero inoxidable con tratamiento térmico de templado y revenido.

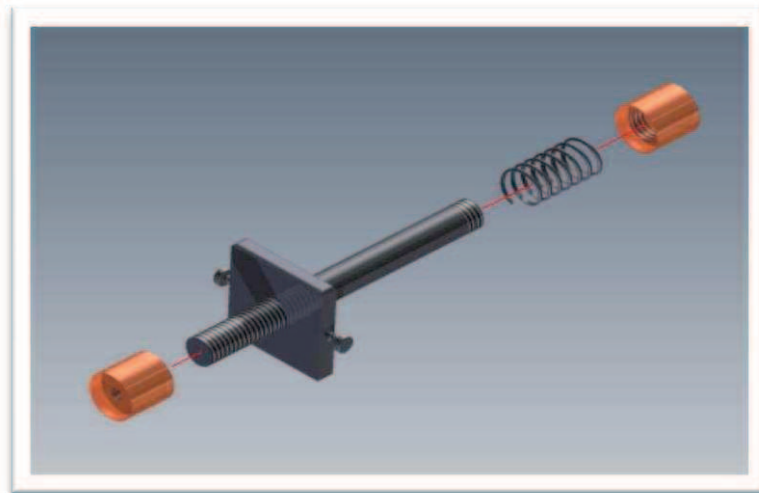


Figura 3.27. Incluir el resorte de compresión y de los sujetadores de empaque al ensamble

Ya colocados los dos sujetadores de empaque en cada extremo del poste es necesario fijar los empaques a los mismos, esto se hace por medio de un tornillo de 3/16" de diámetro el cual pasa a través del orificio central del empaque y se atornilla al sujetador de empaque. La Figura 3.28 muestra dicho ensamble.

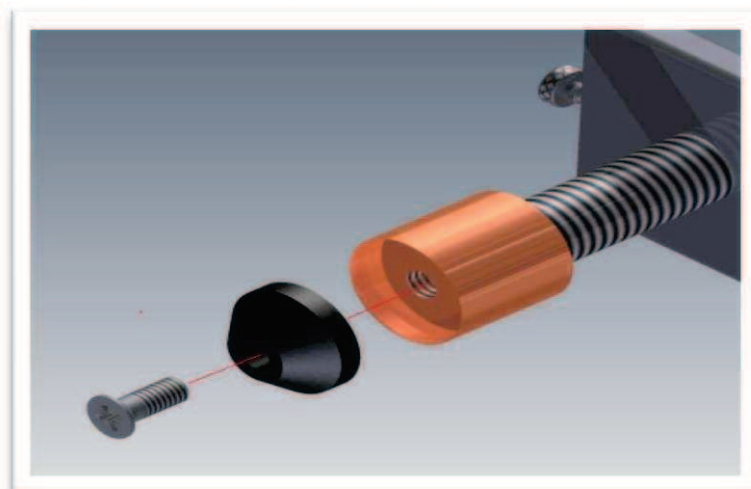


Figura 3.28. Fijación de los empaques a los sujetadores

Una vez fijados los empaques a los sujetadores se tiene el mecanismo principal totalmente ensamblado y listo para colocarse en la base central inferior. En la Figura 3.29 se muestra el mecanismo principal con todos sus elementos debidamente colocados y ensamblados.

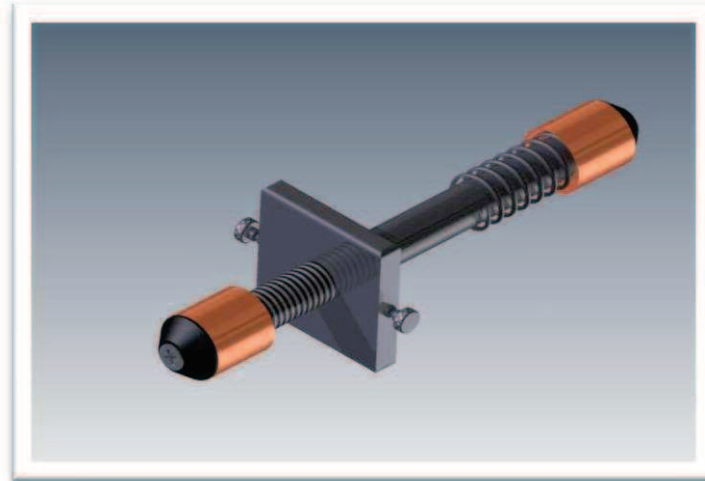


Figura 3.29. Mecanismo principal ensamblado

Cuando ya están ensamblados los componentes de la carcasa y el mecanismo principal, se puede colocar éste último en la media circunferencia de la base central inferior, esto se hace orientando la placa de resortes en dirección a la pared frontal de la carcasa la cual contiene el asiento con los tornillos sujetadores, posteriormente, como se muestra en la Figura 3.30, se coloca la base central superior, la cual se fija a la parte inferior por medio de cuatro tornillos de 1/8" de diámetro, con el objetivo de lograr que el movimiento del poste sea únicamente longitudinal.

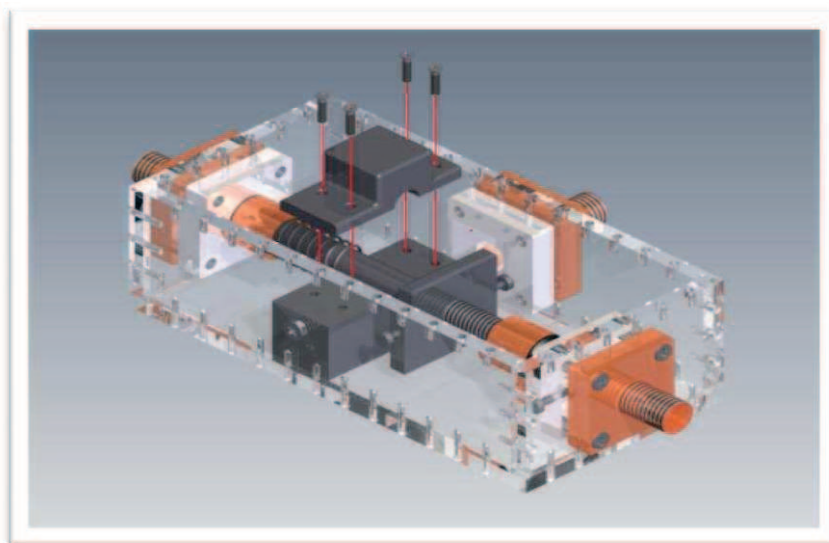


Fig. 3.30. Colocación del mecanismo principal en la base inferior y de la base superior.

Cuando el mecanismo principal ha quedado colocado en posición se debe de empujar el mecanismo de tal manera que se provoque la compresión del resorte de acero inoxidable, y una vez que el mecanismo principal se encuentre en dicha posición se deben colocar los dos resortes de Ni-Ti, (uno de cada lado de la placa de resortes) en los tornillos de sujeción tanto de dicha placa como del asiento que se encuentra frente a esta, posteriormente se libera el mecanismo y se permite que el resorte de expansión provoque una elongación aparentemente plástica en los resortes de Ni-Ti. En la Figura 3.31 se muestra uno de los resortes de Ni-Ti colocado en un tornillo sujetador.

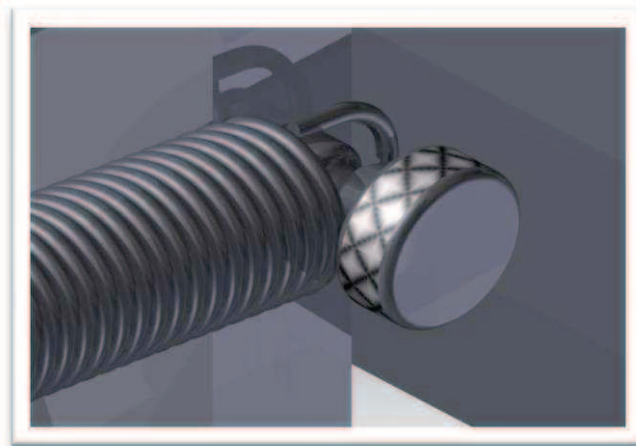


Figura 3.31. Fijación de los resortes de Ni-Ti por medio de los tornillos sujetadores

Una vez colocados los resortes y cerciorándose de que el empaque que se encuentra del lado del resorte de acero inoxidable se encuentra descansando sobre el asiento se coloca la tapa de la carcasa la cual se atornilla a las paredes de la misma por medio de tornillos de 1/8", así mismo se recomienda aplicar algún elemento sellador como silicón sobre la superficie de contacto entre la tapa y carcasa al momento de colocar la tapa. La colocación de dicha tapa se muestra en la Figura 3.32.

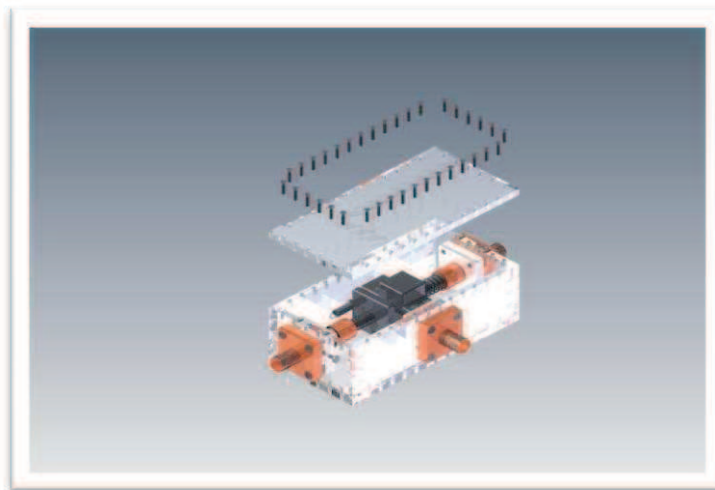


Figura 3.32. Colocación de la tapa a la carcasa.

3.3.2 Descripción del funcionamiento sistema.

La válvula economizadora de agua con resortes de Ni-Ti utiliza las propiedades termomecánicas de estos últimos en combinación con la acción de un resorte de expansión de acero inoxidable para crear un mecanismo de dos posiciones principales, en una de ellas, cuando el agua está fría (por debajo de la temperatura A_s de la aleación), el resorte de expansión ocasiona una elongación aparentemente plástica en los resortes de Ni-Ti lo que ocasiona que la salida que se encuentra del mismo lado que dichos resortes permanezca abierta mientras que la salida que se encuentra en la pared opuesta de la carcasa se encuentra obstruida por el empaque, por otra parte, cuando el agua dentro de la válvula alcanza una temperatura igual o mayor que A_s , los resortes de Ni-Ti recuperan paulatinamente la deformación aparentemente plástica sufrida en su fase martensítica, lo que causa la compresión del resorte de expansión y que el empaque que se encuentra del lado de los resortes de Ni-Ti descanse en el asiento, con lo cual queda cerrada la salida del agua fría, a la cual se conectaría la línea de retorno.

Cabe mencionar que, para este caso, A_s es de aproximadamente 30°C y A_f posee un valor de aproximadamente 45°C.

En la Figura 3.33 se muestra el segundo prototipo de la válvula economizadora de agua ya ensamblado. Los planos y el dibujo explosivo de la misma se muestran en el anexo, mientras que en el anexo se incluyen algunas propiedades físicas y mecánicas de la aleación de la que están conformados los resortes de Ni-Ti.

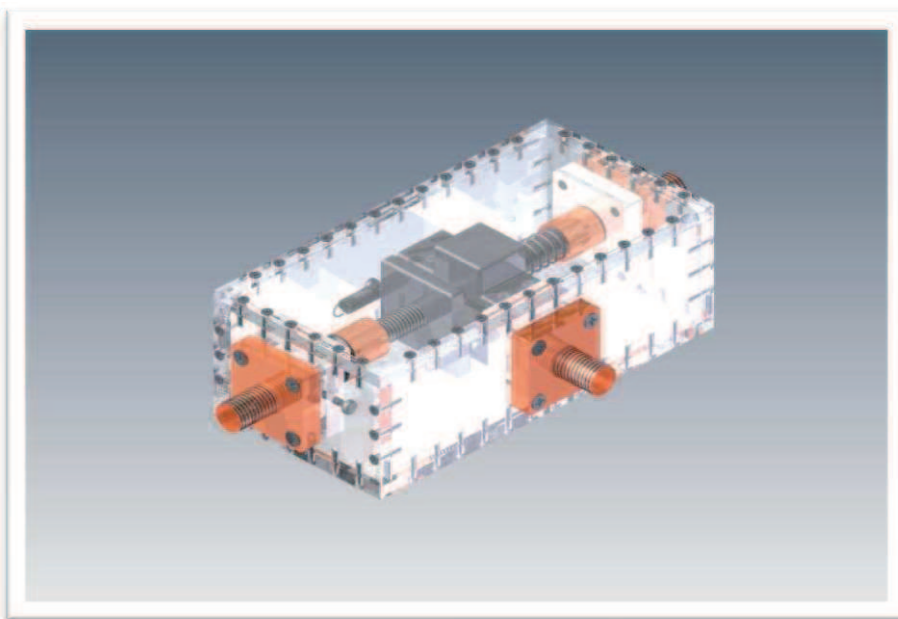


Figura 3.33 Válvula reguladora de agua a base de resortes de Ni-Ti ensamblada



Como se puede observar, los prototipos anteriormente mencionados trabajan en base a las particulares propiedades termo-mecánicas de las AMF, en este caso en particular de aleaciones de Ni-Ti, lo cual permitió desarrollar sistemas muy simples que sin embargo son sensibles a los constantes cambios de temperatura de su entorno, siendo capaces de responder a ellos, y que no requieren la ayuda de ningún dispositivo eléctrico o electrónico para dicho efecto. Este hecho en sí mismo destaca el potencial de aplicación de dichas aleaciones, y como se puede ver en el primer capítulo de este trabajo de tesis, en muchos países alrededor del mundo se han desarrollado diversas tecnologías para múltiples ámbitos que van desde el desarrollo de tecnologías espaciales hasta el desarrollo de nuevos elementos que sirvan para simplificar la vida cotidiana del ser humano, por lo que en los países desarrollados, en estos momentos, existe una tendencia a orientar enormes esfuerzos tanto científicos como económicos al desarrollo de aplicaciones que incluyan este tipo de materiales, este hecho viene sucediendo desde comienzos de los años 60's en países como estados unidos y Japón, y es preocupante que en nuestro país existan muy pocos investigadores que posean los conocimientos necesarios para impulsar un desarrollo tecnológico en este ramo, puesto que las aplicaciones que hoy en día existen son cada vez más variadas y se orientan cada vez más a desarrollar aplicaciones que se incluyan en los grandes mercados como es el caso de los nuevos sistemas de aire acondicionado que se incluyen en algunos de los nuevos modelos comerciales de automóviles.

Actualmente nuestro país existen pocos investigadores que se han dedicado a estudiar a detalle las propiedades y características de esta clase de materiales, y menos aún investigadores que hayan desarrollado prototipos que estén orientado a explotar dichas propiedades, lo que se traduce en un gran riesgo de estar en una situación de dependencia tecnológica en este ramo, por lo cual es importante que los investigadores, ingenieros, y estudiantes de este país tomen conciencia de la necesidad existente de ampliar los esfuerzos por desarrollar prototipos que nos permitan empezar a proponer soluciones a los problemas locales que incluyan nuevas tecnologías, ya que de este modo se previene a futuro que la dependencia tecnológica que hoy padecemos se amplíe a los nuevos campos de desarrollo tecnológico. Es por ello que en este trabajo de tesis, se busco que el funcionamiento de ambos prototipos se basara en aprovechar las propiedades de las AMF, lo cual hasta hoy en día sigue siendo considerada como una tecnología no convencional, pero que debido a las tendencias de los países desarrollados, esto está próximo a cambiar de manera radical en un futuro a mediano plazo.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



En el capítulo anterior fueron descritos dos prototipos de válvulas economizadoras de agua distintos, así como el principio de operación de cada uno de ellos pero no se han descrito las características técnicas de los elementos termo-mecánicos ni se han expuesto los criterios de diseño que se deben de tomar en cuenta para el desarrollo de dichos prototipos. Cabe mencionar que si bien los elementos termo-mecánicos son distintos entre ambos prototipos, ambos están fabricados de una AMF a base de Ni-Ti, lo que crea la necesidad de contar con un modelo matemático que nos permita encontrar las relaciones existentes entre la carga, la temperatura y el desplazamiento que dichos prototipos pueden entregar, así mismo se debe determinar que los elementos mecánicos convencionales no se encuentren fuera de los parámetros de temperatura, elongación y carga que ofrecen las particulares características de dicho material, del mismo modo, se buscara hacer una comparación entre ambos modelos con el objetivo de poder determinar las ventajas y desventajas que cada uno posee, y de esta manera proponer soluciones a las deficiencias que los mismos puedan tener con el objetivo de plantear soluciones de rediseño que permitan optimizar el comportamiento de los mismos.

4.1 Modelo matemático.

Como se menciono anteriormente, es necesario contar con un modelo matemático que nos permita determinar ciertas características de los elementos fabricados con AMF, dentro de los modelos expuestos en la literatura, se encontró el modelo ingenieril desarrollado por Cortés capaz de proporcionar la información requerida para determinar el comportamiento termo-mecánico de los componentes de Ni-Ti. Dicho modelo aproxima el comportamiento de las AMF por medio de parábolas ajustadas con valores experimentales y permite simular el comportamiento en estudio ya sea para carga, deformación o temperatura constante o variable [9].

El modelo desarrollado por Cortés se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\sigma_A}{f(K_2 - k_1) + K_1} = \epsilon^n \quad (4.1)$$

Donde ϵ es la deformación sufrida por el elemento de Ni-Ti, σ_A es el la carga aplicada a dicho elemento, f es una función de Boltzmann, la cual se define como un función del esfuerzo y de la temperatura, K_1 y K_2 que son los valores extremos de de K correspondientes a una temperatura baja y otra alta respectivamente y $n=1$ por simplicidad.



f es definida como una función, de Boltzmann, de la temperatura y el esfuerzo de la siguiente manera:

$$f = \frac{e^{\left(\frac{T-M_s-T_c}{T_a}\right)}}{1+e^{\left(\frac{T-M_f-T_c}{T_a}\right)}} \quad (4.2)$$

Donde: T es la temperatura, M_s es la temperatura de inicio de la transformación martensítica, M_f es la temperatura de finalización de la transformación martensítica, T_c y T_a se definen como:

$$T_c = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^E}} \quad 4.3.a)$$

$$T_a = \frac{\sigma_A}{2 \frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^E} \ln(99)} \quad 4.3.b)$$

Donde $\frac{\partial \sigma_c}{\partial M_s^E}$ es la relación de Clasius-Clapeyron, que para el caso del Ni-Ti tiene un valor de $6,9 \frac{MPa}{^\circ C}$

Así mismo, las constantes K_1 y K_2 de la ecuación 4.1 son definidas de la siguiente forma:

$$K_1 = \frac{0.01K_f - 0.99K_i}{(0.01)^2 - (0.99)^2} \quad 4.4.a)$$

$$K_2 = \frac{0.99K_f - 0.01K_i}{(0.99)^2 - (0.01)^2} \quad 4.4.b)$$

|

Done, a su vez, estas constantes K_i y K_f son determinadas por los valores n , α , E y σ_A como se muestra en las ecuaciones 4.5.a) y 4.5.b).

$$K_i = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^n (\sigma_A)^{1-n} \quad 4.5.a)$$

$$K_f = \left(\frac{E}{\alpha}\right)^n \frac{(\sigma_A)^{1-n}}{2} \quad 4.5.b)$$

Donde α , E y n son parámetros que se toman del diagrama esfuerzo-deformación obtenidos de manera experimental, para este caso se debe tener en cuenta que dicho diagrama debe pertenecer a una muestra cargada y descargada a una temperatura mayor a la A_f del material. En la Fig.4.1 se muestra una serie de este tipo de diagramas a distintas temperaturas, dichos diagramas fueron obtenidos de una serie de pruebas realizadas a un alambre de Ni-Ti sometido a tensión simple y a distintas temperaturas, dichos diagramas fueron obtenidos de una serie de pruebas realizadas en el Instituto de Ciencias de Materiales en la Universidad de Tsukuba, en Ibaraki, Japón [9].

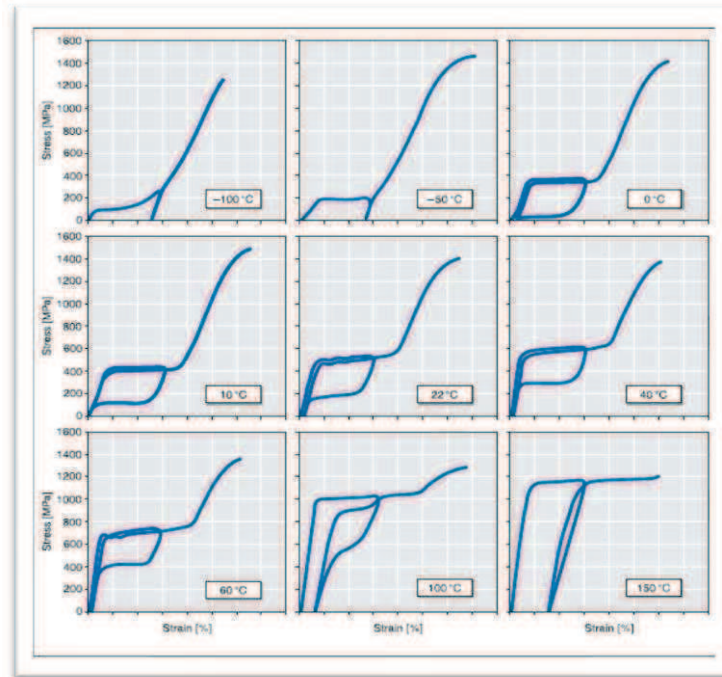


Figura 4.1. Diagramas esfuerzo-deformación obtenidos experimentalmente de un alambre de Ni-Ti sometido a tensión simple a distintas temperaturas [9].

De la Figura 4.1 podemos notar como en los diagramas obtenidos de 0 a 60°C se forma el llamado lazo súper elástico, el cual se presenta en un determinado rango de temperaturas superiores a la A_f del material, esto nos indica que la deformación es totalmente recuperada. Por otro lado, en los diagramas correspondientes a -100, -50, 100 y 150°C las curvas esfuerzo-deformación presentan una deformación que parece permanente pero que desaparece al calentar la muestra por encima de A_f lo cual indica que el material se encuentra en fase martensítica. Para determinar los parámetros del modelo empleado, es necesario realizar una prueba esfuerzo-deformación estando el material totalmente en fase martensítica mientras que la otra prueba debe hacerse a la temperatura más alta ($T > A_f$) a la que se espera llevar al material.

En forma genérica, se puede considerar que el comportamiento esfuerzo-deformación, ya sea en la parte de carga o en la de descarga, para materiales con memoria de forma policristalinos puede ser aproximado con parábolas que se van achatando conforme la temperatura de prueba disminuye. Dicho comportamiento puede ser aproximado con la expresión:

$$\epsilon = K\sigma_A^n \quad (4.6)$$

Donde K está parametrizada por los valores críticos $K1$ y $K2$ que se mencionaron en las ecuaciones 4.4.a y 4.4.b. En la figura 4.2 se muestran una serie de curvas esfuerzo-

deformación para distintas temperaturas y deformación-temperatura para un valor de carga constante, obtenidas empleando el modelo de la ecuación 4.1.

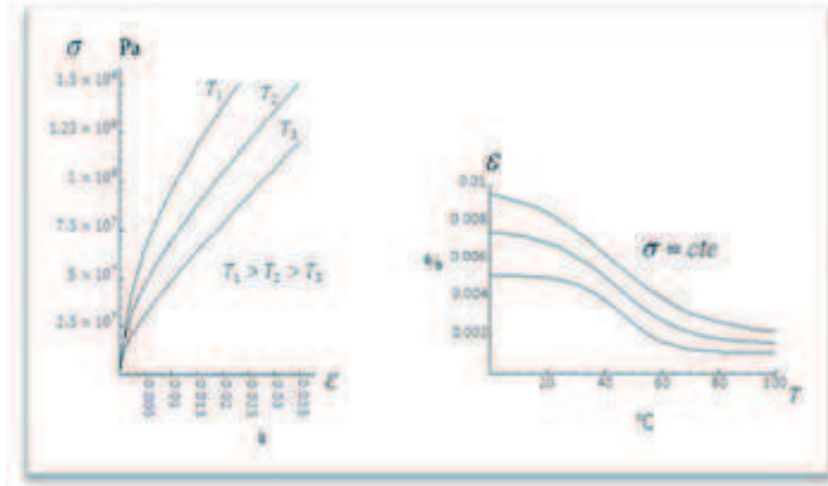


Figura 4.2. Comportamiento mecánico empleando el modelo propuesto por Cortés [3]

Como se ha mencionado anteriormente, las dos propuestas de diseño descritas en este trabajo de tesis poseen diferentes elementos termo-mecánicos y su conformación también es distinta, lo que implica la necesidad de variar algunos de los criterios de diseño para ambos casos ya que, aunque la aleación de la que dichos termo-actuadores están compuestos es muy similar, existen distinciones entre los parámetros de trabajo de ambos elementos. En el caso del primer diseño se tiene a un alambre como termo-actuador mientras que en el segundo, se tiene un par de resortes. En esta sección se procederá a describir los criterios de diseño utilizados para cada caso.

4.2 Criterios utilizados para el diseño que utiliza alambre de Ni-Ti

Los diseños fueron concebidos de tal manera que se ajustaran a las características de los elementos de Ni-Ti, ya que actualmente en el extranjero ya se producen ciertos elementos estandarizados de este material.

Una de las formas más comunes y económicas en las cuales se puede encontrar el Ni-Ti comercialmente es en forma de alambre. Al ser un producto estándar, cuenta con propiedades bastante controladas por los fabricantes, aunque, debido a la naturaleza altamente anisotrópica del material en cuestión propiedades tales como el módulo elástico del material no pueden ser especificadas con precisión, es por esto que, en orden de prevenir una deformación plástica permanente o incluso la ruptura del alambre es necesario tomar como parámetro valores que se encuentren por debajo de los mínimos indicados por el fabricante.

En la tabla 4.1 se muestra una tabla que describe las propiedades físicas más significativas de una aleación de Ni-Ti, de la cual se tomaron algunos datos como referencia para este diseño.

Tabla 4.1 Propiedades físicas de la aleación del alambre de Ni-Ti empleado [33].	
PROPIEDADES MECÁNICAS	
ESFUERZO ÚLTIMO DE TENSIÓN	1110MPa
ELONGACIÓN TOTAL	10%
MODULO ELASTICO	28-41MPa
PROPIEDADES DE MEMORIA DE FORMA	
MESETA DE ESFUERZO DE CARGA	3% APROXIMADO
TENSION MINIMA	70MPA
DEFORMACIÓN RECUPERABLE MÁXIMA	8%
TEMPERATURA Af	35°C
COMPOSICIÓN (SEGÚN LOS REQUERIMIENTOS DE LA NORMA ASTM F2063)	
ELEMENTO	PORCENTAJE EN PESO
NIQUEL	54.5
TITANIO	45.43
OXÍGENO	0.05
CARBONO	0.02

Para poder utilizar el modelo descrito anteriormente es necesario conocer la carga a la que el alambre estará sometido, y, como se puede observar en la Fig.4.3, la carga que el alambre recibe proviene de un resorte de expansión, por lo que podemos determinar que el alambre estará sometido a un esfuerzo variable debido a que los resortes poseen una constante de proporcionalidad la cual indica entre más se comprima o elongue un resorte mayor será la carga que éste aplique.

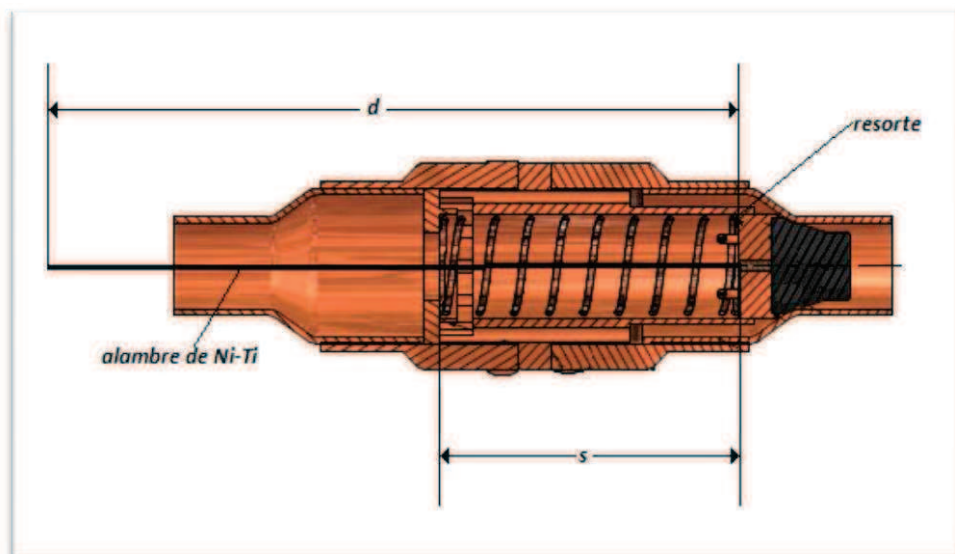


Figura 4.3. Diagrama esquemático de la operación del diseño que utiliza alambre de Ni-Ti.



De la Figura 4.4 podemos observar que d es la longitud del alambre cuando éste se encuentra en su fase martensítica y s es la longitud del resorte plenamente elongado. Lo anterior significa que cuando el alambre se encuentra a temperatura ambiente, inferior a A_s , sufre una elongación producida por la carga que el resorte imprime sobre el mismo, y a su vez, cuando el alambre se encuentra a una temperatura igual o superior a A_s , tiende a recuperar la deformación impuesta por el resorte de manera paulatina, lo que genera una contracción del mismo y que a su vez, entre mayor sea mayor será la fuerza que éste imprima al alambre. En forma general, el esfuerzo inducido sobre el alambre puede expresarse como:

$$\sigma_A = \frac{F}{A} \quad (4.7)$$

Donde: σ_A es el esfuerzo que actúa sobre el alambre, F es la fuerza imprimida por el resorte y A es el área transversal del alambre pero como se mencionó anteriormente, la fuerza que el resorte imprime varía según la compresión que reciba del alambre al aumentar su temperatura, por lo que la fuerza la podemos expresar como:

$$F = M\Delta s \quad (4.8)$$

Donde: M es la constante del resorte y Δs es la compresión que sufre el resorte respecto a su longitud libre, es decir sin carga.

Sustituyendo F en la ecuación 4.7 podemos definir el esfuerzo sufrido por el alambre como:

$$\sigma_A = \frac{M\Delta s}{A} \quad (4.9)$$

Sustituyendo σ_A en la ecuación 4.1 la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\epsilon^n} = \frac{\frac{M\Delta s}{A}}{f(k-k_1)+k_1} = \left(\frac{\Delta s}{d_0}\right)^n \quad (4.10)$$

Donde: d_0 es la longitud inicial del alambre con memoria de forma.

De esta manera se tiene una ecuación que permite modelar el comportamiento del primer diseño de la válvula economizadora de agua partir del modelo descrito por Cortés [9]. Dicha expresión es una ecuación no lineal cuyos datos de entrada son:



- El área **A** de la sección transversal del alambre.
- La constante **M** del resorte.
- La longitud del alambre en estado martensítico d_0 en reposo.
- Los parámetros **E**, **α** , y **n** del material.
- El valor de la relación de Clasius-Clapeyron.
- Las temperaturas **Ms**, **Mf** y **Af** del material.
- La distancia máxima que se puede comprimir el resorte para determinar la **F** máxima del resorte.

Una vez obtenidos dichos datos la ecuación puede ser resuelta, se debe recordar que **E**, **α** , y **n** deben de ser determinados experimentalmente mientras que las temperaturas críticas **Ms**, **Mf** y **Af** así como el diámetro de la sección transversal del alambre son datos que son proporcionados por el fabricante, así mismo el área de la sección transversal del alambre y la constante del resorte pueden ser calculadas con facilidad o bien en el caso de la constante del resorte, obtenida experimentalmente.

La constante **M** del resorte puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$M = \frac{GD_w}{8N_a C^3} \quad (4.11)$$

Donde:

- N_a** es el número de espiras activas del resorte.
- G** es el módulo de elasticidad transversal del material que se obtiene de la tabla 4.2.
- D_w** es el diámetro del alambre que se muestra en la Figura 4.5
- D_m** es el diámetro medio del resorte que también se muestra en la Figura 4.5.
- C** es el índice del resorte y es la relación del diámetro medio dividido entre el diámetro del alambre, es decir **D_m/D_w**.

Tabla 4.2 Propiedades de los metales más comúnmente utilizados para la elaboración de resortes [3].

Nombre y Nomenclatura	Módulo de elasticidad lineal en [GPa]	Módulo de elasticidad transversal [GPa]	Métodos de fabricación y usos principales
ASTM A227 (C>0.45%)	206.8	79.3	Estirado en frío. Resortes de bajo costo.
ASTM A679 (C>0.65%)	206.8	79.3	Estirado en frío. Resortes de calidad superior.

ASTM A229 (C>0.55%) Revenido en aceite	206.8	79.3	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Usos generales.
ASTM A230 (C>0.60%) Revenido en aceite	206.8	79.3	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Resorte de tensión uniforme.
Aleación ASTM A231	206.8	79.3	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Para cargas de impacto.
Aleación ASTM A401	206.8	79.3	Estirado en frío con tratamiento térmico previo. Para cargas de impacto.
Acero inoxidable ASTM A313	193.1	68.9	Estirado en frío. Resistente a corrosión y al calor para usos generales.
Bronce ASTM B159	103.4	43.1	Estirado en frío. Resistente a corrosión.

La Figura.4.4, muestra la vista lateral del resorte de compresión así como la sección de corte de la misma donde se indican los parámetros de diseño tales como: el diámetro medio y el diámetro del alambre para efectuar el cálculo de su constante.

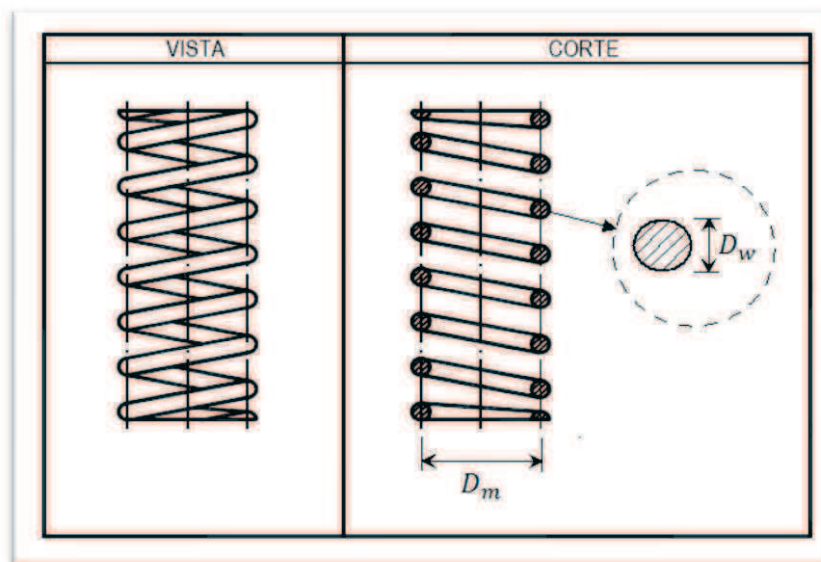


Figura 4.4. Esquema general de un resorte helicoidal donde se muestran los parámetros geométricos principales [3]

Para calcular la constante M del resorte utilizado en este prototipo, se utilizaron las dimensiones que se muestran en el plano correspondiente en el anexo II así como los datos correspondientes a la aleación de acero inoxidable ASTM A313 como referencia para el valor del módulo transversal G , de lo que se tiene que:

$$Dw = 1.27 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$Dm = 0.01708 \text{ m}$$

$$G = 69.8 \times 10^9 \text{ Pa}$$



$$Na = 7$$

Sustituyendo dichos valores en la ecuación 4.11 se tiene:

$$M = \frac{(68.9 \times 10^9 \frac{N}{m^2})(1.27 \times 10^{-3} m)}{(8)(7) \left(\frac{.01708 m}{1.27 \times 10^{-3} m} \right)^3} = 649.41 N/m$$

Como podemos observar en la Tabla 4.1, el esfuerzo mínimo para que se pueda causar una deformación aparentemente plástica en el alambre es de 70MPa, pero a su vez, dicho esfuerzo no debe exceder los 1100MPa para evitar deformaciones irreversibles en el alambre, así mismo podemos observar que la deformación recuperable máxima para un alambre policristalino de esta naturaleza es del 8% de su longitud cuando este se encuentra en su fase martensítica. De estos datos podemos determinar que, la compresión máxima que sufrirá el resorte a causa de la contracción debida a la transformación martensita-austenita es igual al 8% de la longitud total del alambre en fase martensítica, por lo que tenemos que:

$$s_{compresion} = 0.08d_0 \quad (4.12)$$

Teniendo en cuenta que $d_0 = 0.4m$, que la longitud de compresión equivale a $0.032m$, y el valor obtenido de la constante M del resorte, se tienen los datos necesarios para calcular la fuerza máxima de empuje generada por el resorte cuando la fracción volumétrica transformada del alambre es igual o superior al 90% y con ella determinar si no se exceden los parámetros de carga mencionados anteriormente.

Para ello es necesario calcular el área de la sección transversal del alambre como se muestra a continuación.

$$A = \pi r^2 \quad (4.13)$$

Donde: A es el área transversal del alambre y r es el radio de dicha sección, por lo que sustituyendo éste último en la ecuación 4.13 el área queda definida como:

$$\pi(0.254 \times 10^{-4} m)^2 = 2.0268 \times 10^{-7} m^2$$



Una vez obtenida la constante M del resorte, el área transversal del alambre y la distancia de compresión máxima debida a la transformación austenítica del alambre, podemos calcular la carga máxima que el alambre sufrirá cuando se encuentre a una temperatura igual o superior a A_f tomando como referencia la ecuación 4.9, de la cual se tiene que

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M\Delta s_{max}}{A} \quad (4.14)$$

Y sustituyendo los datos obtenidos anteriormente tenemos que:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\left(649.41 \frac{N}{m}\right)(0.032m)}{2.0268 \times 10^{-7} m^2} = 122.5301 MPa$$

Como se puede observar, el valor obtenido está dentro de los parámetros especificados por el fabricante que se muestran en la Tabla 4.1, con ello podemos asegurar que el alambre no sufrirá rupturas ni deformaciones permanentes debido a una carga excesiva y, debido a ello podemos asegurar que el alambre de Ni-Ti fue elegido correctamente para operar en el rango de temperatura y de carga para el que es requerido.

El empaque utilizado para el diseño de la válvula fue seleccionado en base a los empaques para válvulas y grifería doméstica ya que es mucho más económico que fabricar uno específicamente para este prototipo. El material de fabricación del empaque seleccionado es el caucho sintético, también conocido comercialmente como BUNA, el cual es elaborado a partir de una mezcla de estireno y butadieno.

La elección de este tipo de empaque es debida a que es muy fácil de encontrar en el mercado, es una opción muy económica y cumple con los parámetros necesarios para lograr un buen desempeño dentro del dispositivo, las propiedades mecánicas de este material se enlistan a continuación.

- a) Presenta buena resistencia a la abrasión
- b) Excelente resistencia al impacto
- c) Un rango de temperatura de servicio que va desde los $-10^{\circ}C$ hasta los $70^{\circ}C$
- d) Una buena resistencia al agua
- e) Resistencia a ácidos diluidos y al cloro

Es por estas razones, así como por la facilidad de adquisición y bajo costo que este tipo de empaques fueron seleccionados para formar parte del prototipo. Los demás componentes de este prototipo se diseñaron para ser fabricados en cobre, puesto que es un material activo que presenta escasa oxidación al contacto con el agua, además

de que es un material muy utilizado en instalaciones domésticas y por lo tanto es más sencillo su acoplamiento a una tubería doméstica convencional sin necesidad de aditamentos excesivos.

Esta válvula es unidireccional, es decir, no tiene un retorno por donde desahogar el agua fría una vez que esta llega a la válvula, por lo cual para su instalación y correcto funcionamiento es necesario añadir en la instalación una válvula de no retorno que permita enviar el agua hacia la cisterna o hacia otro dispositivo de almacenamiento por medio de una tubería auxiliar, como se muestra en el esquema de la Figura. 4.5

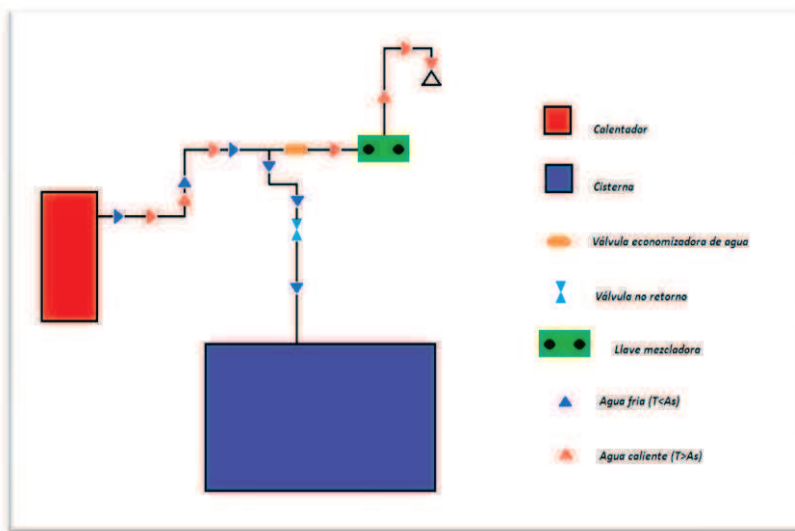


Figura 4.5. Diagrama esquemático de la instalación requerida para el funcionamiento de una red hidráulica que contenga una válvula economizadora de agua que emplea un alambre con memoria de forma.

A continuación, se muestran algunas fotografías tomadas a los componentes de este dispositivo cuyo prototipo fue elaborado con las especificaciones que se muestran en los planos del apéndice I.



Figura 4.6. Fotografía del cople de turcas fabricado como parte del prototipo del primer diseño



Figura 4.7. Resorte a compresión que es deflectado debido a la contracción del alambre con memoria de forma, al aumentar o disminuir la temperatura.



Figura 4.8. Explosivo del prototipo de válvula economizadora de agua que trabaja con un alambre con memoria de forma



Figura 4.9. Fotografía del prototipo ensamblado.

En este primer prototipo se detectaron ciertas ventajas y desventajas, las cuales se mencionan a continuación.

Ventajas:

- El desarrollo del prototipo es económico.
- El cuerpo de la válvula es de dimensiones reducidas (menos de 14cm).
- El Alambre utilizado es relativamente fácil de adquirir.
- El diseño no requiere de muchos elementos.
- La mayoría de los elementos del prototipo son fáciles de producir, por lo que no requieren de maquinaria muy especializada para su fabricación.
- La utilización de piezas estandarizadas como son el empaque, las tuercas y los coples reductores reducen el número de piezas a maquinar y reduce el costo.
- El dispositivo está diseñado para poder conectarse fácilmente a una red doméstica típica

Desventajas:

- Debido a la longitud del alambre, es necesario fijarlo a un punto posterior en la tubería.
- Al no contar con una desviación o retorno para el agua fría crea la necesidad de implementar una válvula no retorno a la instalación auxiliar, lo que encarece el costo de la misma.

4.3 Criterios utilizados para el diseño que utiliza resortes de Ni-Ti

Con el objetivo de explorar distintas alternativas para desarrollar una válvula economizadora de agua a base de materiales con memoria de forma, se desarrolló un



segundo diseño el cual tiene como termo-actuadores un par de resortes de expansión fabricados de una aleación de Ni-Ti. Dicho diseño fue descrito en el capítulo anterior pero debido a que un resorte posee distintos parámetros y cualidades a los de un alambre, fue necesario tomar en cuenta otros criterios para la utilización de los mismos, es por este motivo que en esta sección se explica los criterios tomados en cuenta para la implementación de estos resortes.

El principal motivo de que se haya elegido al resorte como el elemento termo-mecánico del segundo diseño es que, a comparación con otros elementos ampliamente fabricados con AMF como son el alambre, las placas y los anillos entre otros, es que el resorte posee una capacidad de elongación superelástica mucho mayor que cualquier otro de los elementos comúnmente fabricados. Así mismo, los resortes con memoria de forma son los elementos más económicos después del alambre.

Los resortes con memoria de forma han sido ampliamente utilizados en distintas aplicaciones, sustituyendo solenoides y sistemas mecánicos conectados a sensores de temperatura. Uno de estos casos es la implementación de ellos en el sistema de aire acondicionado de algunos automóviles o como sustituto de algunos motores en diseños robóticos, de lo cual, se ha observado que el poder implementar este tipo de elementos a un diseño proporciona entre otras, las ventajas que se enlistan a continuación [34]:

- a) Longitud de carrera en comparación con el peso.
- b) Entregan mayor fuerza de salida por unidad de peso.
- c) Simplifica los diseños convencionales.
- d) Presentan un tiempo de respuesta muy bajo a temperaturas específicas.
- e) No muestran sensibilidad a una amplia gama de condiciones que se pueden presentar en el entorno.
- f) Se pueden utilizar en ambientes donde la higiene debe ser crítica.
- g) Mantienen una operación silenciosa.

Para entender la diferencia entre un resorte convencional y uno elaborado con una AMF, es necesario saber que este tipo de resortes no posee una constante de proporcionalidad estable, sino que dicha constante está en función de factores como lo son la temperatura, la carga que el resorte reciba, la fase en la que el material se encuentre y la histéresis transformacional. Debido a lo anterior los valores de la constante pueden ser proporcionados por el fabricante, o bien, determinarse experimentalmente, empleando métodos experimentales convencionales.

Uno de los métodos más empleados para determinar la constante de un resorte con memoria de forma consiste en someter un alambre a un baño de agua en un vaso de precipitado el cual debe colocarse sobre una mesa de temperatura regulable. Al alambre se le debe colgar peso por un extremo, dicho peso debe ser suficiente para propinar al resorte una elongación tal que sean fácilmente distinguibles y medibles las elongaciones y contracciones de dicho alambre cuando este sea sometido a cambios de temperatura. Por el otro extremo el alambre debe de sujetarse a un cable robusto que a su vez debe de estar sujeto de una barra de apoyo, y por último se debe tener un instrumento que permita medir la elongación y contracción del resorte durante la prueba. Una vez dispuesto este arreglo se debe proceder a hacer mediciones aumentando y después disminuyendo paulatinamente la temperatura del agua, la prueba debe de realizarse en ambos sentidos puesto que debido a la histéresis transformacional las temperaturas críticas de inicio y fin de transformación varían según el sentido de dicha transformación. El esquema del arreglo anteriormente descrito se muestra en la Fig.4.10 [35,36].

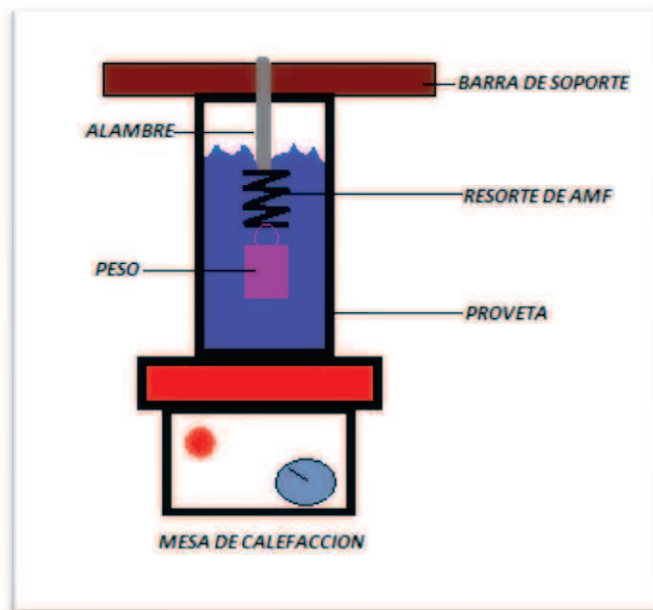


Figura 4.10. Esquema del arreglo experimental para determinar los valores críticos de la constante de un resorte con memoria de forma [35].

Tomando en cuenta la figura anterior se puede establecer una relación entre la fuerza ejercida por el resorte, el peso que ha sido sujetado al extremo del resorte y las propiedades físicas de volumen y peso específico del agua a la temperatura que se realizó la medición, para tal efecto es de gran importancia el tener valores



precisos de la temperatura del agua y de la distancia de elongación al momento que una medición es realizada. Esta relación se expresa como [35]:

$$F = (W) - (V\gamma) \quad (4.15)$$

Donde: W es el peso que cuelga del resorte, V es el volumen que dicho peso ocupa y γ es el valor del peso específico del agua a la temperatura a la cual fue tomada la medición.

Una vez determinada la fuerza generada por el resorte para cada temperatura medida se tiene dicha fuerza puede ser expresada de manera muy similar a la de un resorte convencional, es decir:

$$\Delta F = M\Delta s \quad (4.16)$$

Donde: ΔF es la variación de la fuerza ejercida por el resorte en función de la temperatura, M es el constante a determinar y Δs es la variación de la elongación del resorte a través de distintas temperaturas [35].

Despejando M de la ecuación anterior tenemos que:

$$M = \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad (4.17)$$

Debido a todos los factores que pueden afectar el valor de M , ésta se vuelve muy inestable al cambiar la temperatura, e, incluso, debido a la histéresis transformacional, el valor de M varía dependiendo de si la temperatura va aumentando o disminuyendo. En la Fig.4.11, Se muestra una gráfica que muestra el valor de M vs la temperatura [35].

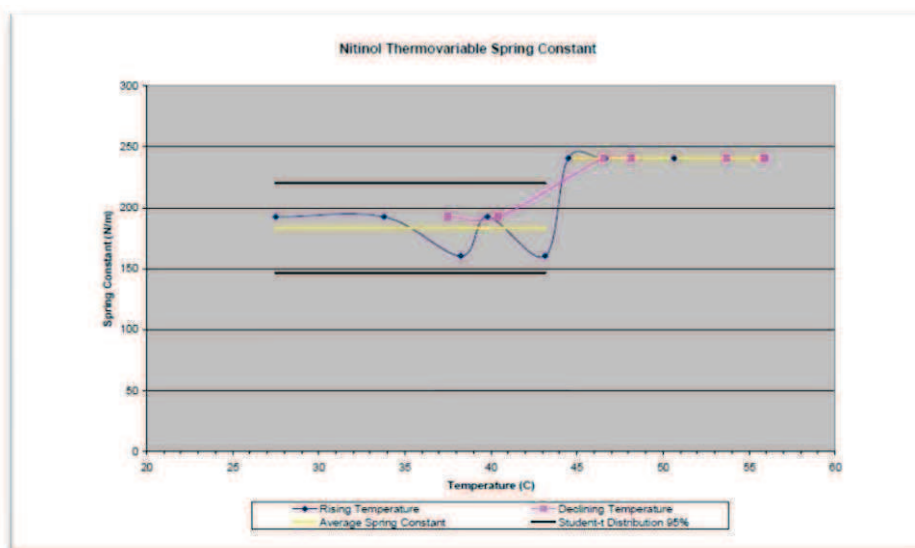


Figura 1.11. Gráfica M vs T para un resorte con memoria de forma



Como se puede observar en la Figura.4.11 es necesario obtener dos constantes, una para cuando el material está en martensita, y otra para cuando el material se encuentra en austenita. Para ello, se promedian los valores obtenidos de la prueba anteriormente descrita, así mismo podemos observar que en el caso de la austenita, los datos obtenidos en la prueba son muy cercanos al promedio obtenido de ellos, pero en la martensita dichos datos se encuentran muy dispersos de lo que su promedio marca, a su vez se puede observar claramente como existe una gran dispersión de estos valores en un rango de temperatura que va de los 35 a los 47°C aproximadamente. Dicha variación es asociada a la histéresis transformacional, y con ello, se hace evidente que, aunque a primera vista, el comportamiento de un resorte convencional y uno con memoria de forma es muy similar, existen factores que hacen que el predecir en todo momento la operación de un resorte con memoria de forma sea un proceso bastante complejo.

Debido a lo anterior, la constante de los resortes elaborados con AMF no es muy utilizada como un parámetro para efectos prácticos de diseño, en vez de ello se utilizan parámetros como lo son, la fuerza a la que dicho resorte va a estar sometido, las temperaturas críticas de transformación del material y los módulos promedio de elasticidad transversal (uno para la fase martensítica y otro para la austenítica).

El mecanismo de este segundo diseño es en sí un mecanismo de dos vías. Para ilustrar de forma clara como será el comportamiento de un resorte elaborado con AMF en un mecanismo de dos vías se plantea un sistema básico en donde a dicho resorte se le coloca una masa encima, de tal manera que el peso de la misma actúa como una fuerza que tiende a comprimir al resorte, la deflexión que dicha fuerza cause variará con la temperatura por lo que podemos decir que existen dos valores críticos de dicha deflexión, uno para cuando la temperatura sea igual o mayor a $A_f (\delta_H)$ y otro para cuando la temperatura sea igual o menor a $M_f (\delta_L)$. Conforme la temperatura se eleve o disminuya dicho mecanismo presentará dos estados, que en la Fig. 4.14 se denominan A y B, y la carrera o longitud de acción del resorte (s) se expresará como la diferencia de la longitud entre ambos estados [34].

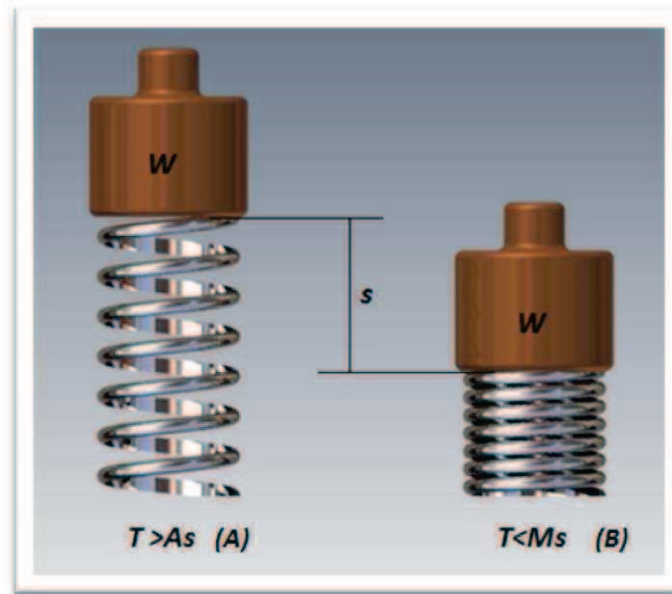


Figura 4.13. Diagrama esquemático de un actuador simple de dos vías que tiene como base un resorte elaborado con una AMF [34]

En el diagrama esquemático de la Fig.4.14 se muestra como se vería el comportamiento de este fenómeno en una gráfica deflexión vs fuerza.

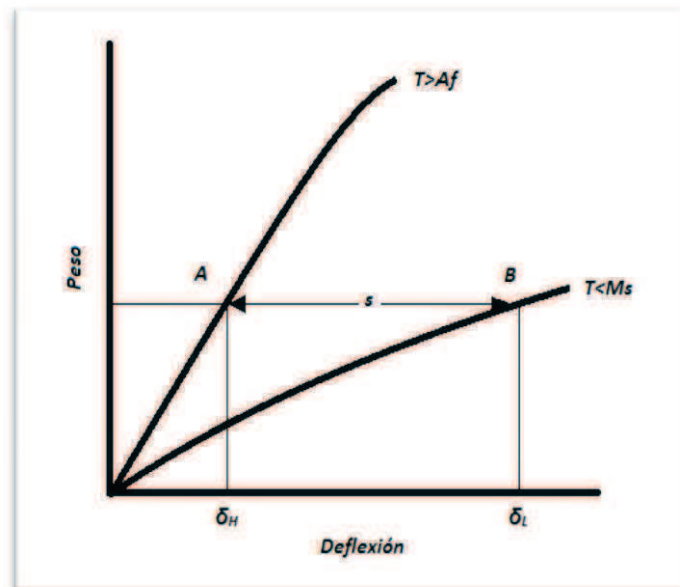


Figura 4.14 Diagrama esquemático del comportamiento de un actuador simple de dos vías [35].

Como se puede observar en el diagrama de la figura anterior, cuando el resorte se encuentra en su fase martensítica presenta una deflexión mayor que cuando se encuentra en su fase austenítica, y dicho comportamiento nos permite establecer dos

puntos críticos en el comportamiento de este sencillo actuador, pero debido a que el utilizar un peso muerto para desarrollar actuadores funcionales es poco práctico, en este diseño se sustituye dicho peso por la acción de un resorte a compresión, dicho resorte puede ser de una cierta gama de aleaciones convencionales, como por ejemplo, la aleación seleccionada anteriormente para el resorte del primer diseño, por supuesto, esto implica que la carga que los resortes de Ni-Ti ya no será constante como en el caso anterior, sino que variará según la longitud a la cual se comprima o se expanda el resorte convencional. Poder determinar el valor de dicha fuerza es esencial para poder obtener datos como la deflexión que el resorte puede sufrir en ambas fases de transformación, dicha fuerza puede ser expresada como se hizo anteriormente en la ecuación 4.16 obteniendo la constante k con la ecuación 4.11.

En la Fig. 4.15 se muestra el mecanismo principal en sus dos estados finales, donde se puede observar que, cuando los resortes de Ni-Ti se encuentran en su fase martensítica son deflectados debido a la carga ejercida por la acción del resorte de expansión convencional, mientras que, por el contrario cuando los resortes de Ni-Ti se encuentran en su fase austenítica el resorte de expansión es comprimido por la acción de los resortes de Ni-Ti.

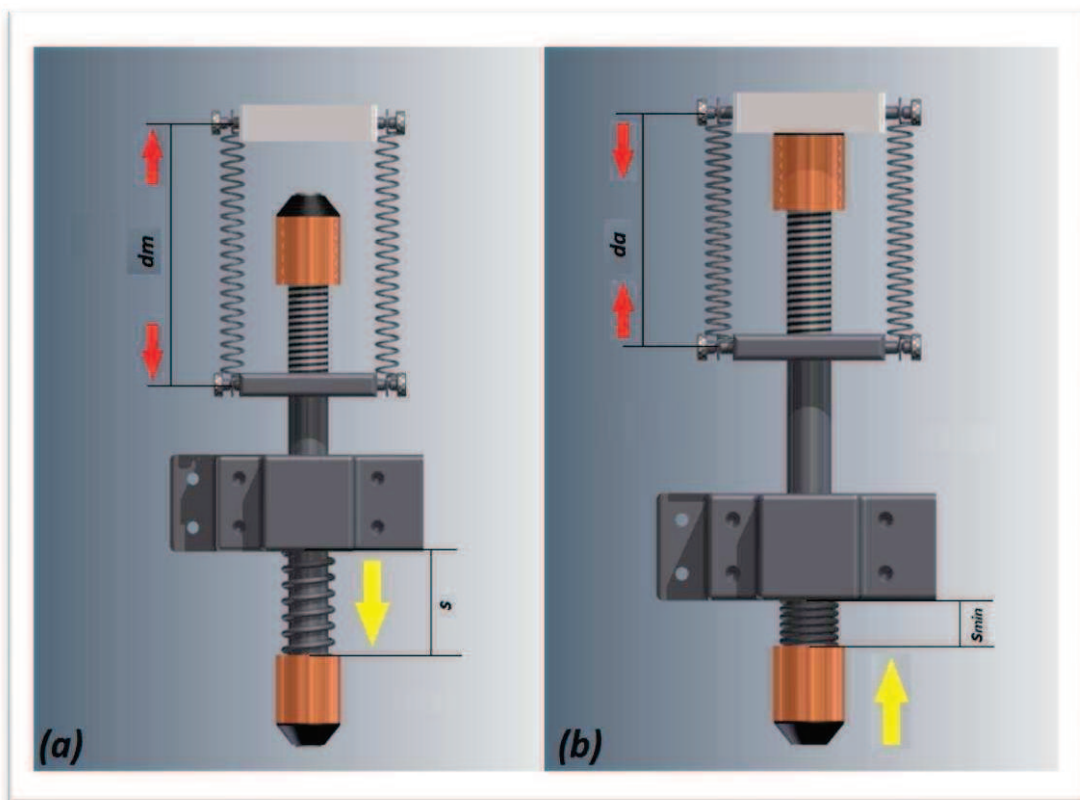


Figura 4.15 a) Estado del mecanismo principal cuando los resortes de Ni-Ti se encuentran a una $T < A_s$.

b) Estado del mecanismo principal cuando los resortes de Ni-Ti se encuentran a una $T > A_f$.

Debido a las diferencias entre este dispositivo y el actuador descrito con anterioridad queda claro que no se pueden describir ambos comportamientos de la misma manera debido a la fuerza variable del resorte convencional. El diagrama de la Fig.4.16 muestra de manera esquemática el comportamiento de un resorte elaborado con una AMF que está sometido a una carga variable.

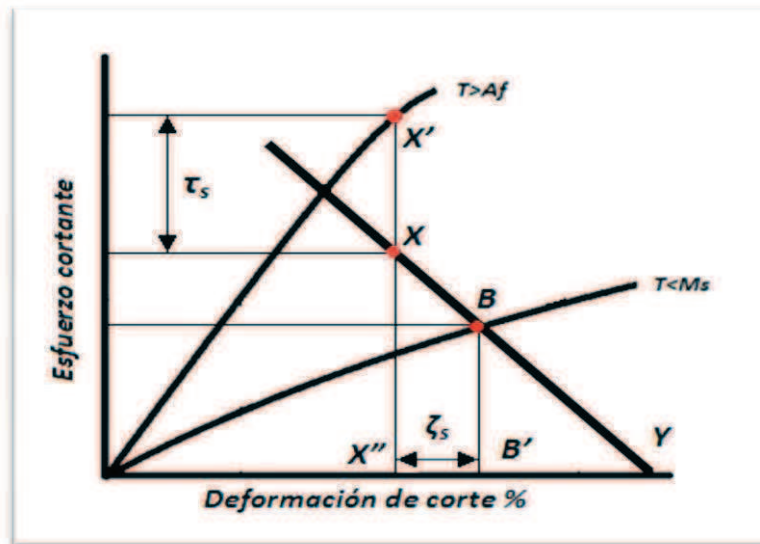


Figura 4.16. Gráfica esquemática del comportamiento esfuerzo vs deformación de corte de un actuador de dos vías con carga variable [35].

Donde τ_s es la magnitud del cambio del esfuerzo cortante a compresión producido durante la transformación a austenita del resorte de Ni-Ti, ζ_s es la magnitud del cambio de la deformación de corte del mismo medida en puntos porcentuales, Y es la máxima deformación cortante alcanzada por el resorte convencional, B indica el estado esfuerzo-deformación de corte experimentada por el resorte Ni-Ti cuando el actuador se encuentra en la posición de deflexión máxima, B' indica el valor de la deformación de corte que se encuentra si se dibuja una línea vertical desde el punto B y que haga intersección con el eje que representa la deformación de corte, X indica el estado esfuerzo-deformación de corte cuando el actuador ha alcanzado la posición de deflexión mínima, a partir de el punto X se traza una línea vertical que haga intersección con la curva generada por el comportamiento del resorte de Ni-Ti a una $T > Af$ de donde se obtiene el punto X' , así mismo dicha línea se dibuja en sentido contrario hasta hacer intersección con el eje que representa la deformación de corte y se obtiene el punto X'' . Cabe mencionar que los puntos, X y B se obtienen de forma experimental ya que varían según la conformación de cada actuador.



A partir del valor de los puntos anteriormente descritos es posible determinar la deflexión del resorte de Ni-Ti, que en este caso al estar sujeto a una elongación variable se define como:

$$\delta_{max} = \frac{S_{efectiva} X'' Y}{B' X''} \quad (4.18)$$

Donde $S_{efectiva}$ es la máxima deflexión sufrida por el resorte de expansión, que observando la Fig.4.15 se puede expresar como:

$$S_{efectiva} = S - S_{min} \quad (4.19)$$

Es necesario mencionar que para calcular la deflexión máxima de deben tomar los valores correspondientes al eje que representa el porcentaje de la deformación de corte de los valores X'' , Y , y B' .

Otro parámetro que puede ser determinado a partir de los puntos mostrados en la Fig.4.16 es la carga máxima sufrida por los resortes de Ni-Ti la cual se determina a partir de la siguiente expresión:

$$P_{max} = \frac{F_{max} X' X''}{X X'} \quad (4.20)$$

Donde P_{max} es la fuerza máxima sufrida por los resortes de Ni-Ti y F_{max} Es la máxima fuerza que puede ser generada por el resorte de expansión, para ello es necesario calcular la constante del resorte convencional en base a la ecuación 4.11 y de las dimensiones mostradas en el plano correspondiente a dicho resorte, de lo cual se tiene:

$$Dw = 1.6002 \times 10^{-3} \text{m}$$

$$Dm = 0.01133 \text{m}$$

$$Na = 5$$



$$G = 68.9 \text{ GPa}$$

$$C = 8.3175$$

$$k = \frac{\left(68.9 \times 10^9 \frac{N}{m^2}\right) (1.6002 \times 10^{-3} m)}{(8)(7) \left(\frac{.0133 m}{1.6002 \times 10^{-3} m}\right)^3} = 4790.2 N/m$$

Como se menciona anteriormente, para determinar la F_{max} que el resorte puede generar es necesario determinar $s_{efectiva}$ la deflexión máxima del mismo, la cual esta definida en la ecuación 4.19. donde:

$$s = 0.0310 m$$

$$s_{min} = .0132 m$$

Por lo tanto, se tiene que la fuerza máxima ejercida por el resorte de es:

$$F_{max} = 4790.2 \frac{N}{m} (0.0310 m - 0.0132 m) = 85.262 N$$

Una vez conociendo la fuerza máxima, la deflexión máxima, y los valores indicado en la Fig.4.16 es posible resolver las ecuaciones 4.18 y 4.20, dichas ecuaciones son de gran utilidad ya que nos permite determinar los valores críticos de deflexión y fuerza de mecanismos de dos vías a base de resortes elaborados con AMF actuadores de dos vías como es el caso del mecanismo principal de la válvula.

Como se puede observar en la Fig. 4.17, Cuando la temperatura del agua proveniente del calentador es inferior a la temperatura crítica A_s de los resortes de Ni-Ti, estos se deflecan debido a la fuerza proveniente del resorte convencional, dicha deflexión no llega a su punto máximo ya que se encuentra restringida debido a que el empaque que se encuentra del lado del resorte convencional descansa sobre el asiento de la pared de la carcasa, el objetivo de restringir deflexión máxima es que el resorte convencional continúe ejerciendo fuerza sobre el empaque con el objetivo de que el dispositivo

presente la hermeticidad adecuada, mientras que el empaque encargado de cerrar la salida de agua fría (la cual debe de ir conectada a una tubería de retorno) permanezca alejado de su asiento correspondiente y permita el paso del agua fría por esta salida.

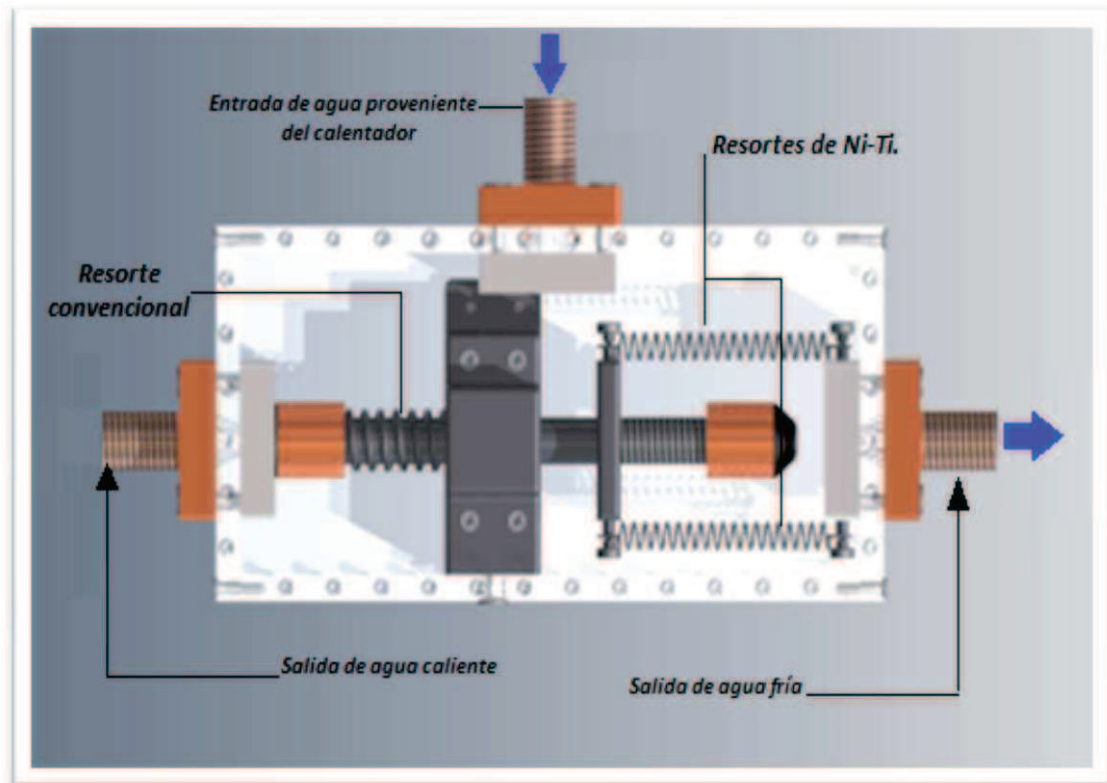


Figura. 4.17. Posición final del mecanismo cuando la temperatura del agua proveniente del calentador es menor a la temperatura crítica A_s de los resortes de Ni-Ti.

En cambio, en la Fig.4.18 se muestra el segundo estado del mecanismo principal dentro de la carcasa el cual se produce cuando el agua que entra proveniente del calentador entra con una temperatura mayor que la temperatura crítica A_s de los resortes de Ni-Ti lo que ocasiona que dichos resortes tiendan a recuperar de forma paulatina su forma original y esto a su vez provoca la contracción del resorte de expansión hasta un punto cercano a su compresión máxima.

Dicha posición permite que la salida de agua caliente (la cual debe de ir conectada a la entrada de agua caliente de la llave mezcladora) quede abierta permitiendo el paso del agua hacia la misma, mientras que la salida del agua fría queda bloqueada por el empaque opuesto.

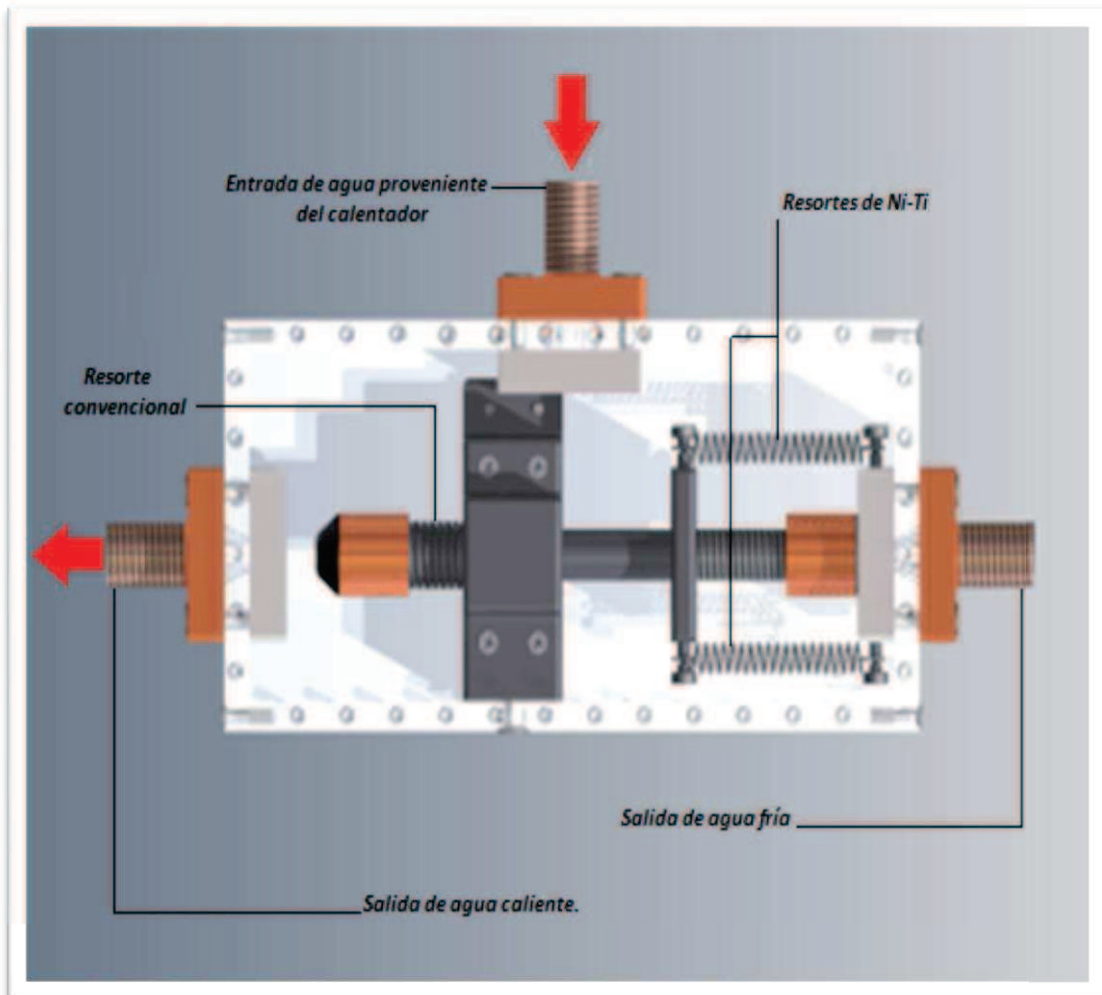


Figura 4.18. Posición final del mecanismo cuando la temperatura del agua proveniente del calentador es menor a la temperatura crítica A_s de los resortes de Ni-Ti.

Como se puede observar, a diferencia del primer diseño, esta válvula cuenta con una entrada de agua, la cual debe de ir conectada a la tubería que va conectada con el calentador, mientras que la salida de agua fría debe de conectarse a la tubería de retorno, mientras que la salida de agua caliente debe de conectarse lo más cerca posible de la entrada del agua caliente de la llave mezcladora, para ello, cuenta con tres placas de cobre que contienen una sección tubular con rosca tipo NPT, que es la más utilizada en accesorios de instalaciones hidráulicas domésticas, esto con la finalidad de facilitar la conexión de la válvula a una red doméstica convencional lo que, a diferencia de el diseño anterior, elimina la necesidad de incluir una válvula de no retorno a la red hidráulica. En la Fig. 4.19 se muestra de manera esquemática como es que esta válvula debe de conectarse a dicha red.

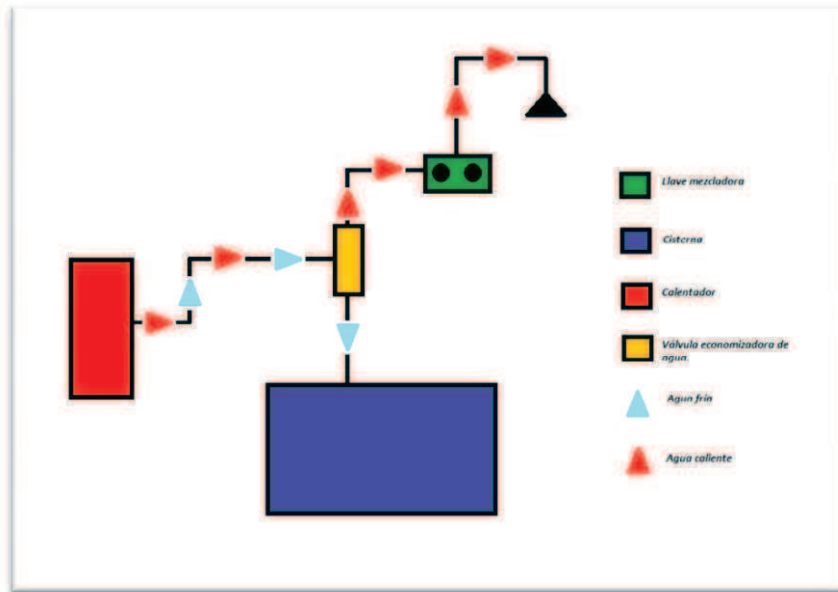


Figura 4.19. Diagrama esquemático de la instalación requerida para el funcionamiento de una red hidráulica doméstica que contenga una válvula economizadora de agua que trabaje mediante un actuador de dos vías a base de Ni-Ti.

Debido a que el desarrollo de esta válvula está financiada por la Universidad Nacional Autónoma de México a través el proyecto PAPIIT titulado “Estudio y desarrollo de aplicaciones empleando materiales con memoria de forma” con clave IN111310, el cual está planificado para llevarse a cabo en un plazo de tres años, es por ello, que al momento de finalizar este trabajo de tesis aun no se cuenta con un prototipo de este segundo diseño construido con el cual se puedan hacer pruebas experimentales y comparar el desempeño de ambos, aun así, es necesario mencionar que en este segundo diseño se trataron de eliminar algunas desventajas detectadas en el primer diseño, por lo que se espera que, al momento de la construcción del prototipo de este segundo diseño, éste presente ciertas ventajas y desventajas específicas en comparación con el diseño anterior.

Las principales ventajas que se espera obtener de este diseño sobre el que trabaja a base de un alambre de Ni-Ti son:

- Eliminar la necesidad de un retorno al contar con dos salidas distintas
- Maximizar el efecto de la deformación recuperable debido a la acción de retracción de las espiras activas.
- Eliminar la necesidad de fijar un extremo del actuador a la tubería
- Obtener un tiempo de respuesta más rápido a los cambios de temperatura
- Que el diseño sea más apropiado para trabajo de ciclado



Así mismo, también se esperan ciertas desventajas con respecto al diseño anterior, como son:

- Aumento en el costo del desarrollo del prototipo
- Aumento en el número de piezas a maquinar.
- Disminución de la carga entregada por unidad de peso

Aunque al momento de concluir este trabajo de tesis no se cuenta con un prototipo construido del segundo diseño, es evidente que elaborar más de una propuesta de diseño es de gran utilidad, ya que al desarrollar más de una propuesta se alcanza una mejor comprensión del problema abordado y acentúa el hecho de que el desarrollar una válvula economizadora de agua utilizando materiales con memoria de forma es económica y técnicamente factible.



CONCLUSIONES



Conclusiones

Se diseñaron dos válvulas que aprovechan las propiedades de los materiales con memoria de forma para evitar el desperdicio de agua en regaderas tanto domésticas como industriales.

Las válvulas diseñadas pueden ser consideradas como sistemas de automatización inteligentes debido a que contienen un elemento que funciona como sensor y actuador a la vez.

Las válvulas diseñadas tienen las siguientes ventajas respecto a otros dispositivos similares:

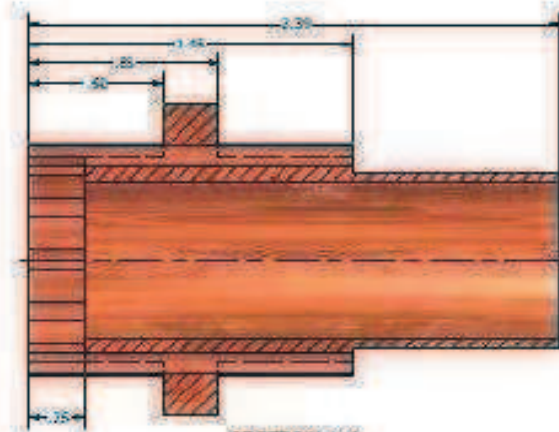
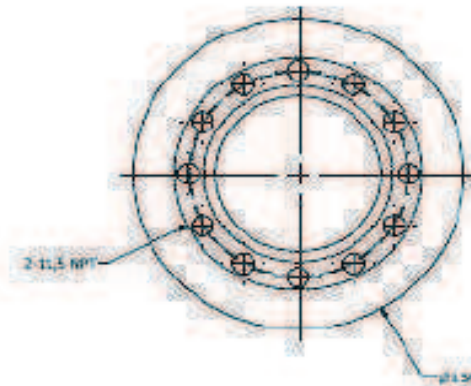
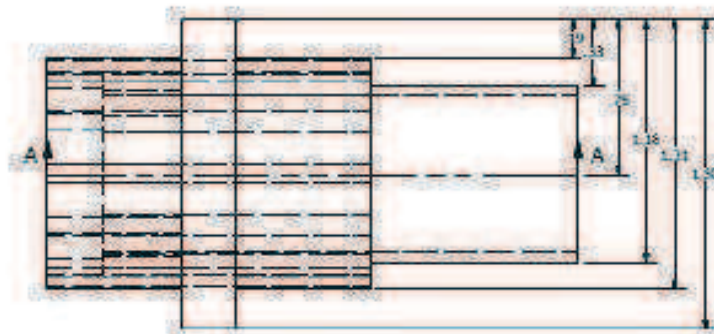
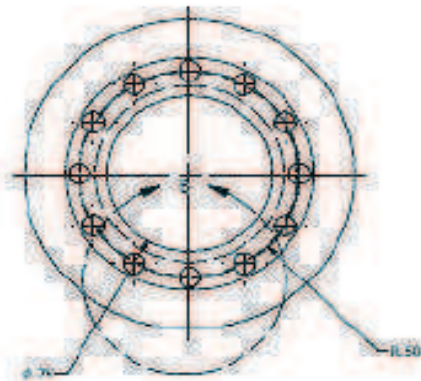
- a) Son considerablemente más sencillos en su arquitectura que los sistemas de automatización convencionales.
- b) Son menos delicados que los sistemas convencionales sobre todo considerando el ambiente en el que operarán.
- c) Resultan considerablemente más económicos que los sistemas convencionales debido a que sus piezas pueden ser fabricadas masivamente.
- d) Su mantenimiento es muy simple.
- e) No emplean componentes eléctricos que pueden representar un peligro para el usuario o de los propios componentes al entrar en contacto con el agua.

Así mismo, se construyó el prototipo de una de las válvulas diseñadas lo cual permitió evaluar de manera muy general el costo que tendría su fabricación y por lo tanto su escalamiento industrial.

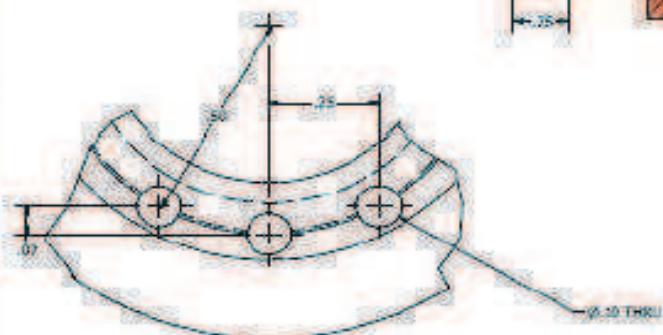
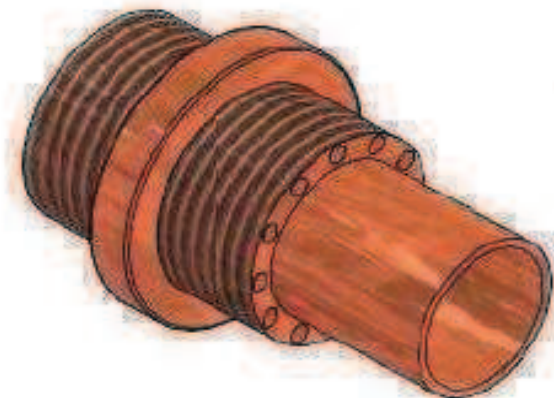
Finalmente, se puede asegurar que el presente trabajo representa el estudio de factibilidad técnica de la fabricación de válvulas economizadoras de agua que emplean materiales con memoria de forma. No obstante, es importante mencionar que es necesario realizar un estudio de factibilidad económica que permita definir con toda precisión los costos de fabricación de las válvulas diseñadas así como los procesos de manufactura y los materiales a emplear que resulten más económicos manteniendo la calidad necesaria para su implementación en la realidad.

APENDICE I

**PLANOS Y EXPLOSIVO DE LA VÁLVULA REGULADORA A BASE DE
ALAMBRE DE Ni-Ti**

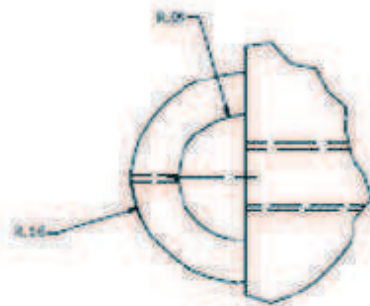
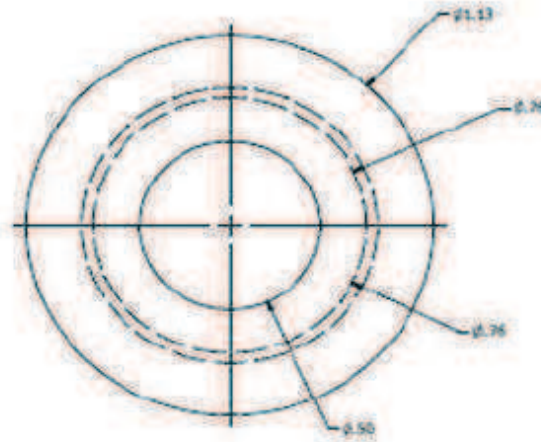
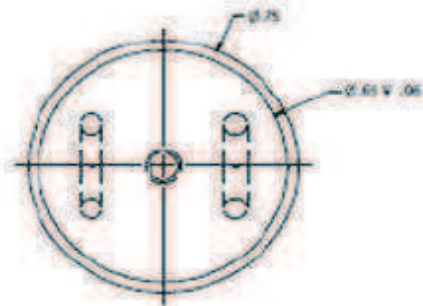
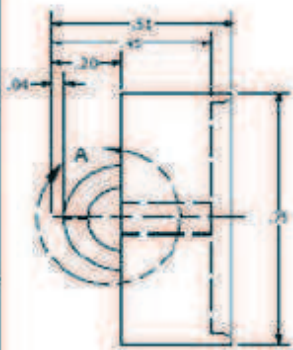


SECTION A-A
SCALE 2.5: 1

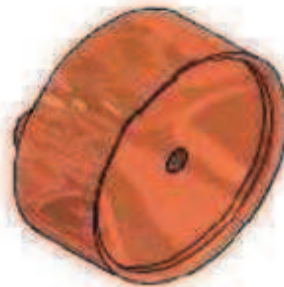
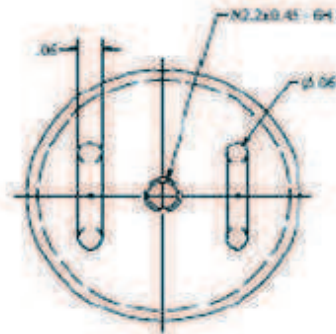


DETAIL B
SCALE 5: 1

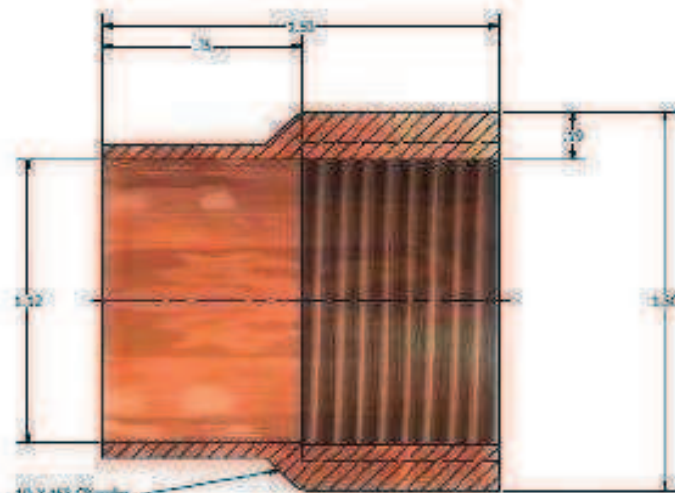
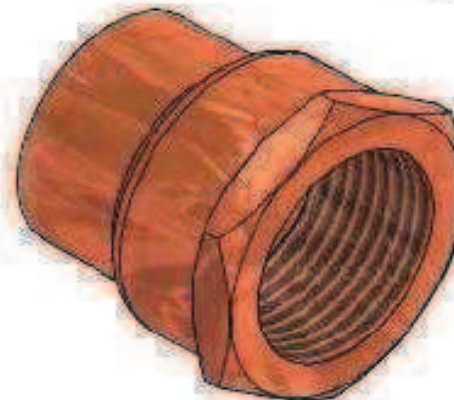
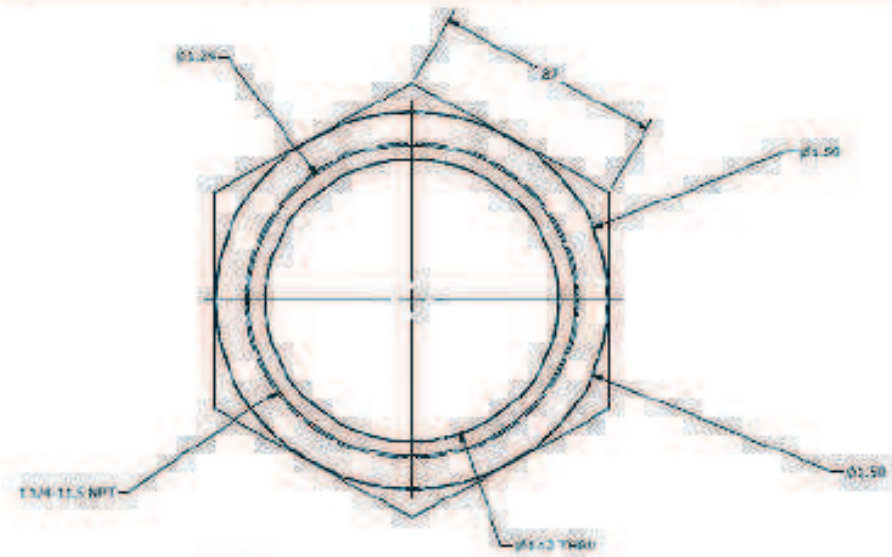
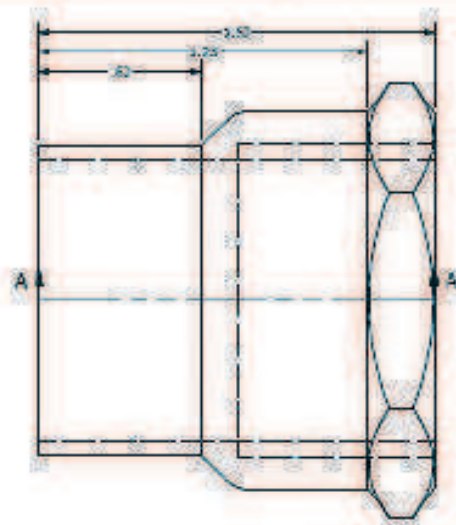
 <p>Ministerio de Energía y Agua REPÚBLICA DE ESPAÑA</p>		<p>COPLE DE TUERCAS</p> <p>Esta pieza es el cuerpo de la válvula y a su vez permite acoplar las dos tuercas para su uso, por esta pieza también es retenido el flujo del fluido que se desea controlar.</p>	
		<p>Revisor: B.L.T.</p> <p>Escala: 2.5: 1</p> <p>No. plano: 5</p>	<p>Revisor: J.C.P.</p> <p>Cada: 10</p> <p>Materia: Cu.</p>
		<p>No. Partes: 1</p>	<p>Fecha: 20/05/2010</p>





DETAIL A
SCALE 5 : 1

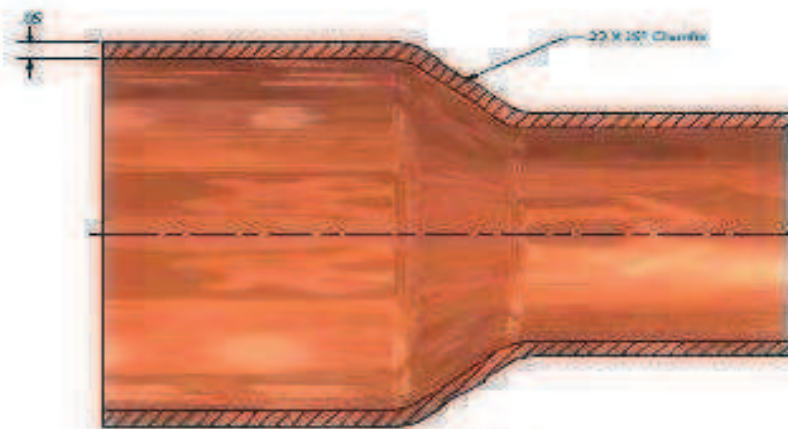
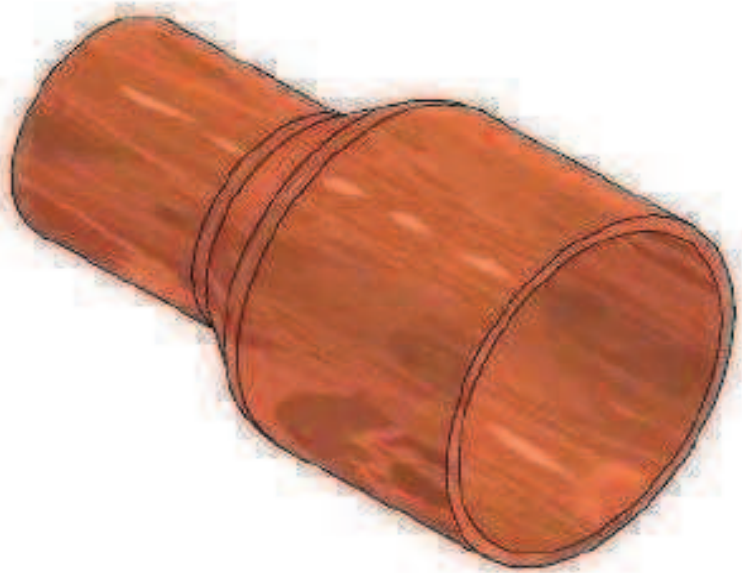
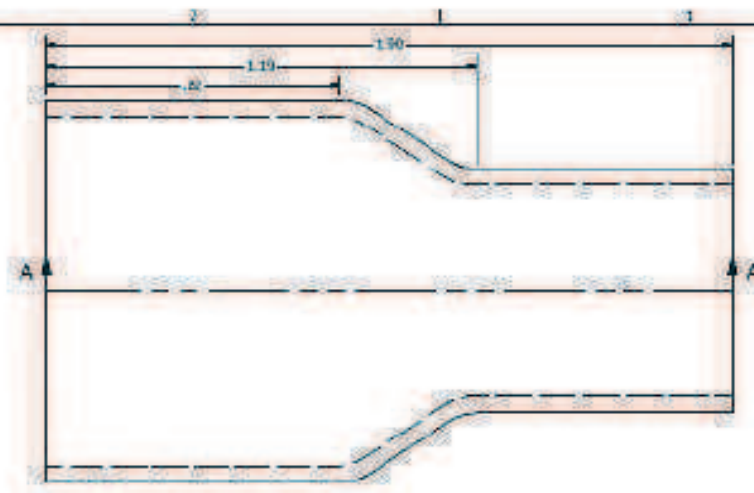
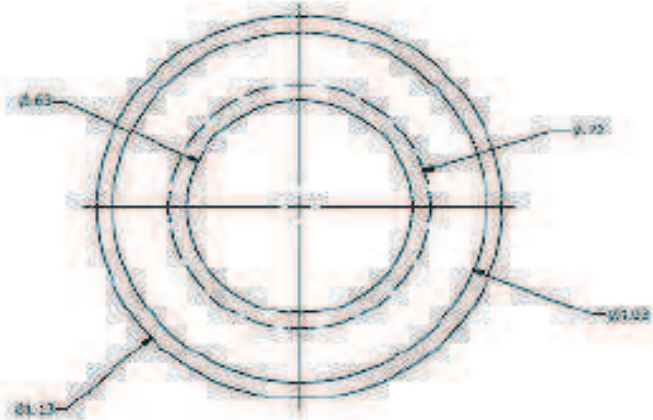


 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA DE MÉXICO		SUJETADOR DE EMPAQUE Y BASE DE RESORTE	
		La base del resorte se encarga de brindar apoyo al resorte interior que el sujetador de empaque es la pieza que sujeta al empaque al mismo tiempo que es la que hace compresión sobre el resorte al colocarse el cilindro de N. 2.	
Diseño: R.T.	Revisó: J.C.P.		
Escala: 1 : 1	Cota: 0		
No. plano: 8	Materia: Cu	No. hojas: 1	Fecha: 22/09/2010



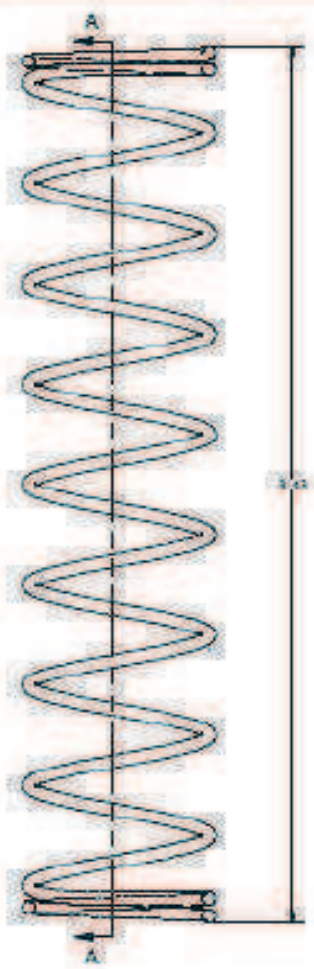
SECTION A-A
SCALE 3 : 1

 GOBIERNO FEDERAL SECRETARÍA DE ECONOMÍA		TUERCA UNIÓN	
		Esta tuerca se utiliza en unión con el cono de serraje y el cono reducida soldándose a alta presión.	
Realizó: RLT	Revisó: J.C.V.		
Escala: 3 : 1	Cota: in		
No. plano: 6	Materia: Cu	No. Partes: 2	Fecha: 20/09/2010

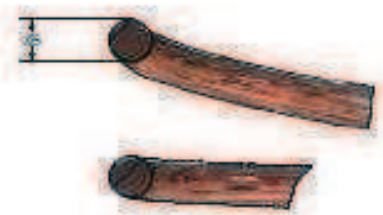
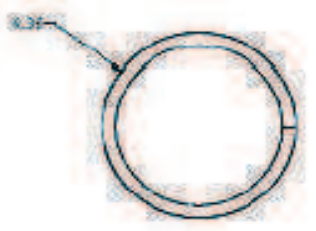
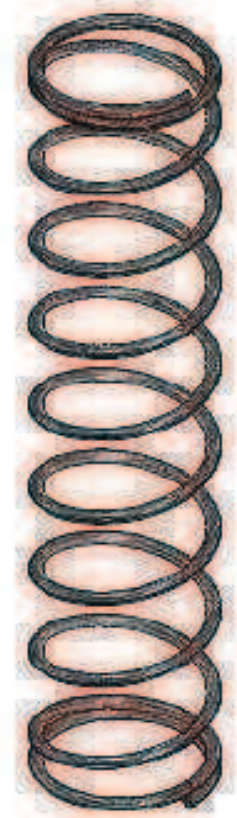


SECTION A-A
SCALE 4:1

 INSTITUTO NACIONAL ACADEMIA DE CIENCIAS	 INSTITUTO NACIONAL ACADEMIA DE INGENIEROS	COPLE REDUCTOR	
		El cople reductor se solda a la brama unido al cople a la tuberia estandar de cobre de 1.75", con ello se permite reducir el diametro a una instalacion hidraulica de menor diametro.	
Dibujo: RLT	Dibujo: J.C.P.		
Escala: 4:1	Codigo: 00		
No. parte: 2	Material: Cu	No. Partes: 2	Fecha: 20/09/2010

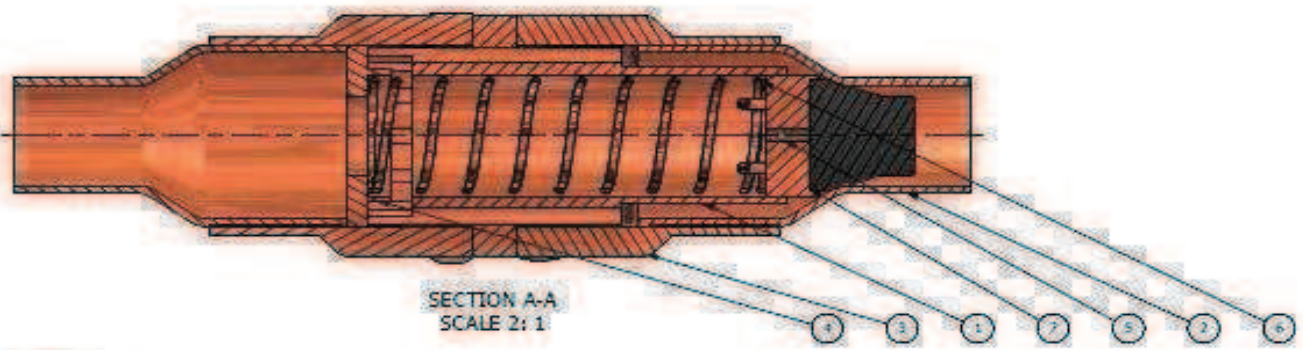
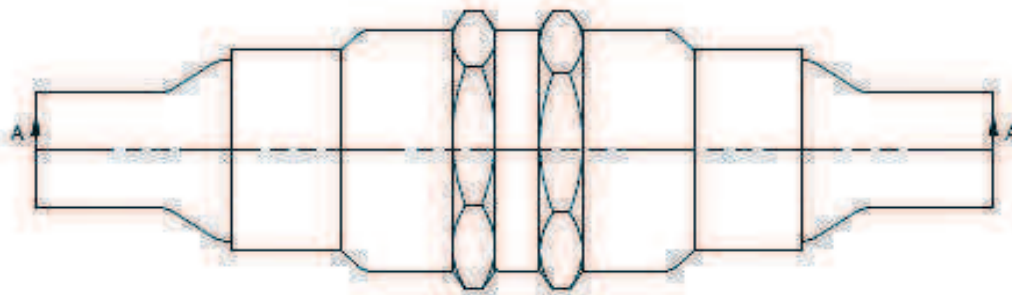


SECTION A-A
SCALE 3: 1

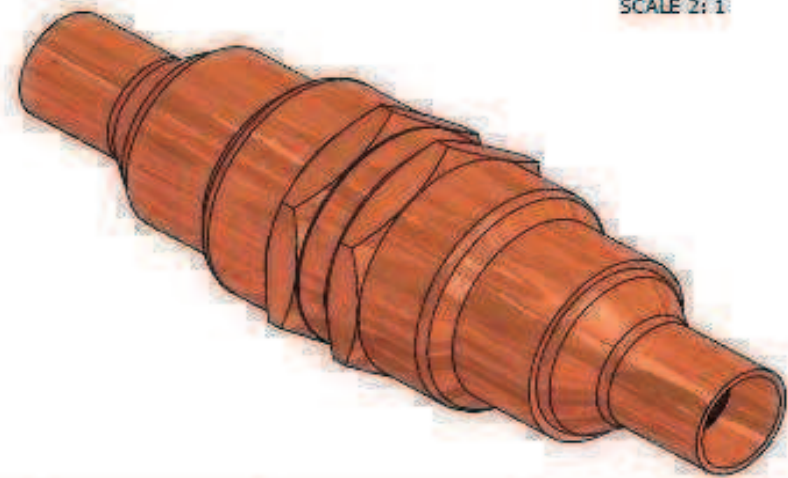


DETAIL B
SCALE 10 : 1

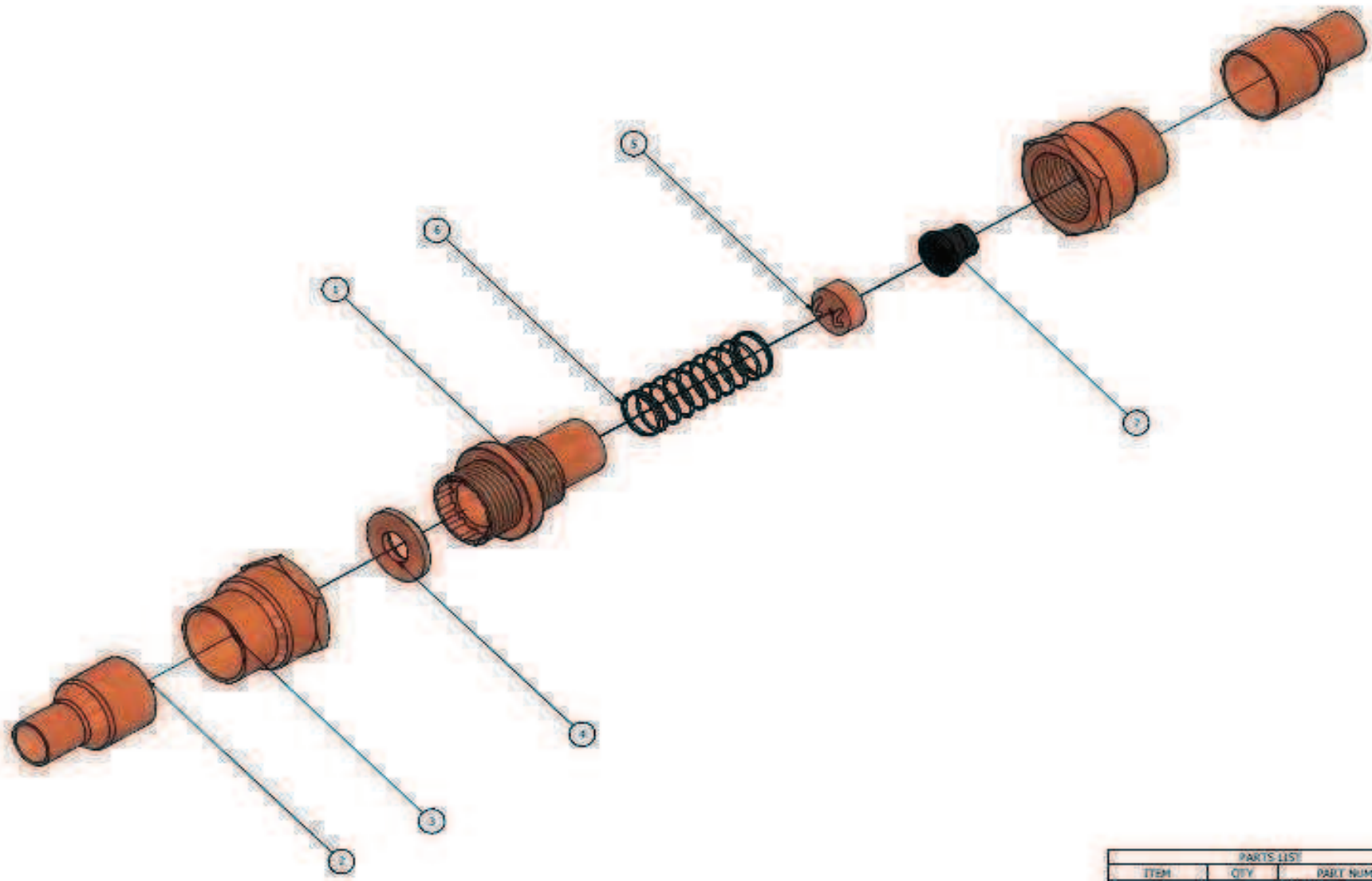
 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	 Resorte: C.C.P.	RESORTE DE COMPRESIÓN El resorte es el encargado de ejercer la presión suficiente para que selle el empuje de la válvula y de provocar levantamiento del elemento de 10-11	
	Escala: 3 : 1 No. piezas: 9	Cota: 10 Material: Acero C-25	No. Partes: 1



SECTION A-A
SCALE 2:1



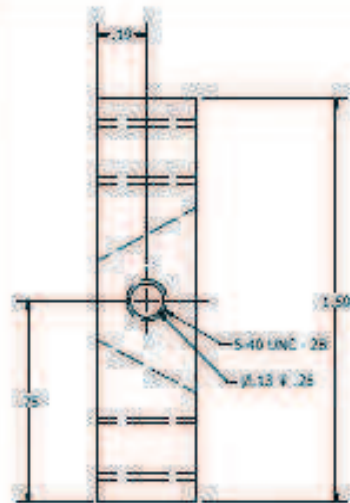
PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	cojete de tuercas
2	2	rodillos
3	2	luzca unkos
4	1	base de resorte
5	1	sueltador de empaque
6	1	resorte de compresion
7	1	empaque



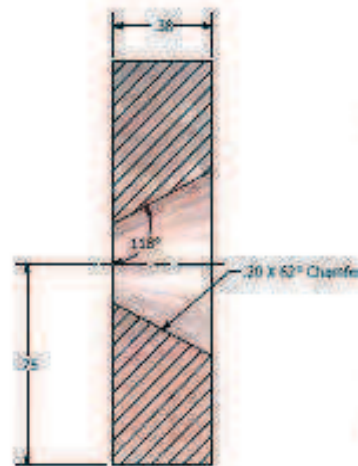
PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	capo buroca
2	2	capo reductor
3	2	base resorte
4	1	base de resorte
5	1	base de resorte
6	1	resorte de tension
7	1	empaque

APENDICE II

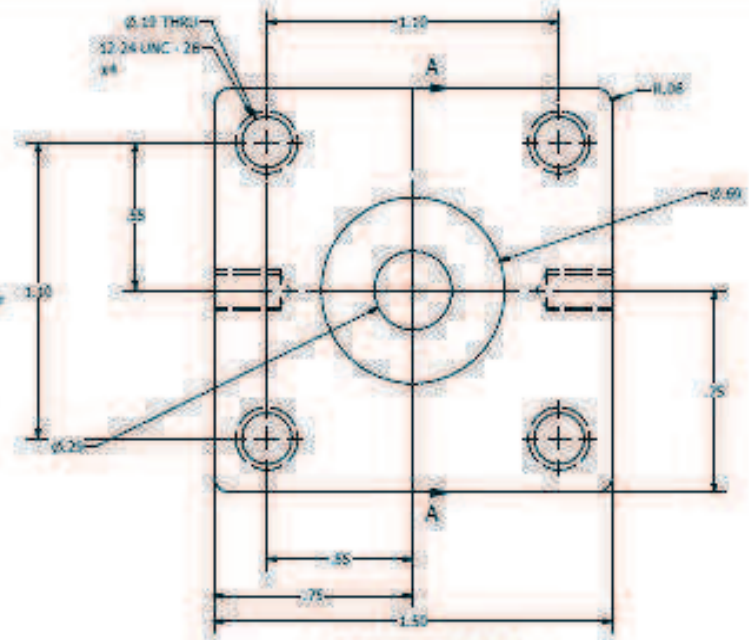
**PLANOS Y EXPLOSIVO DE LA VÁLVULA REGULADORA A BASE
DE RESORTES DE Ni-Ti**



VISTA LATERAL IZQUIERDA



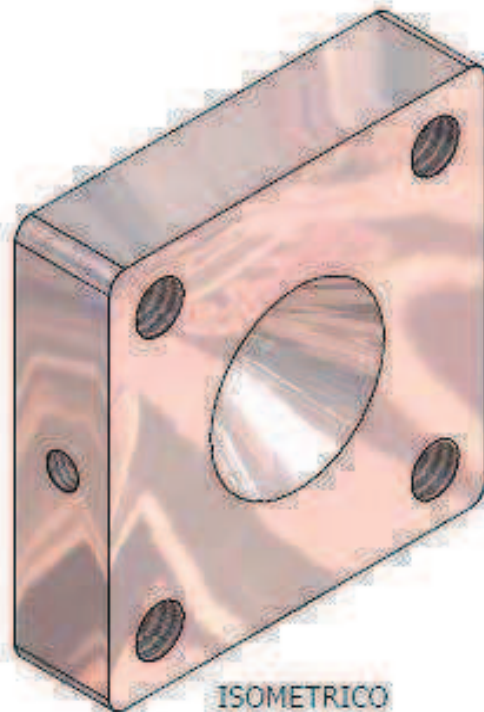
SECTION A-A
SCALE 3:1



VISTA FRONTAL

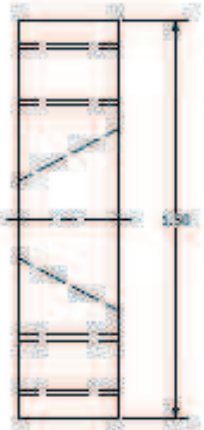


VISTA INFERIOR

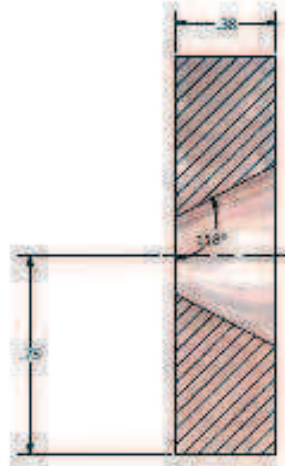


ISOMETRICO
ESC: 4:1

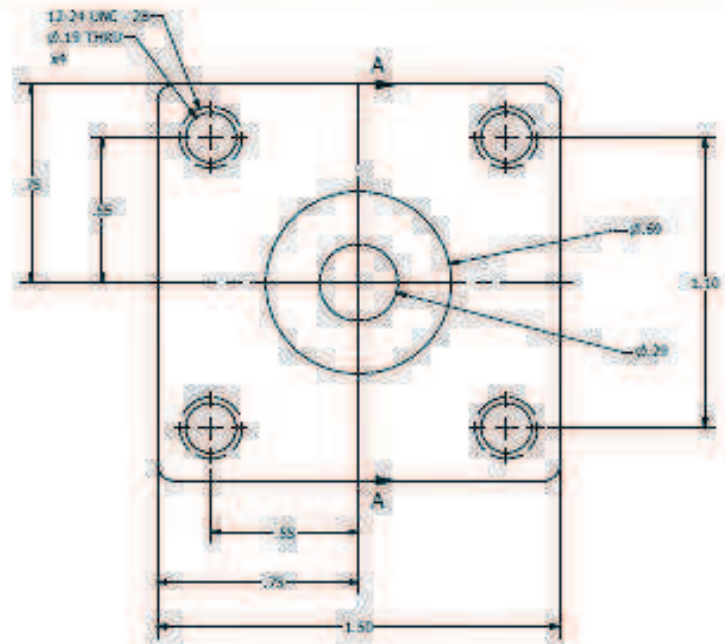
		ASIENTO CON SUDADORES:	
		El asiento con sudadores se ensambla a la pared frontal junto con la placa rosca, a sus costados cuenta con barrenos que alojara a dos de los tornillos que sirven para sujetar a los resortes de Ni Ti. Además, en esta placa es donde se asentará uno de los empujes.	
Realizó: RLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 3:1	Código:		
Nº. plano: 1	Materia: Al	Nº. Partes: 1	Fecha: 21/05/2011



VISTA LATERAL IZQUIERDA



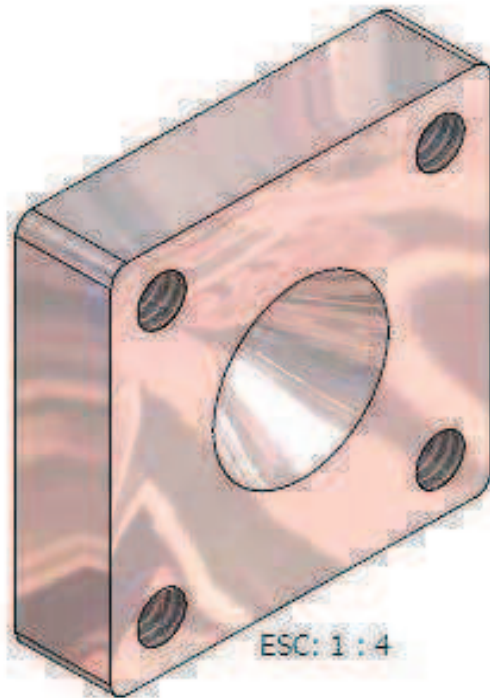
SECTION A-A
SCALE 3 : 1



VISTA FRONTAL

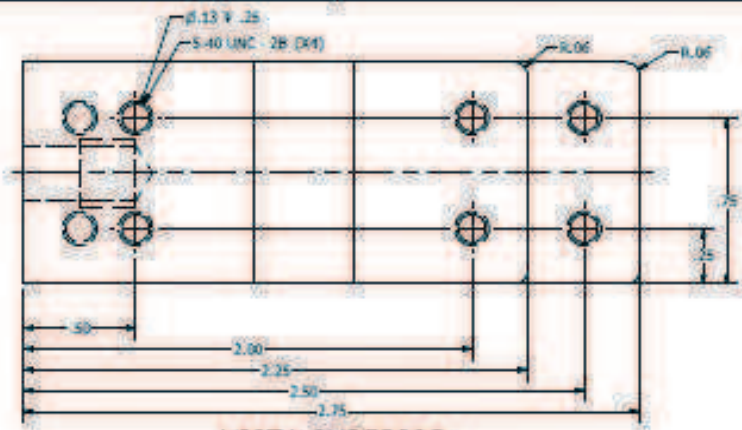


VISTA INFERIOR

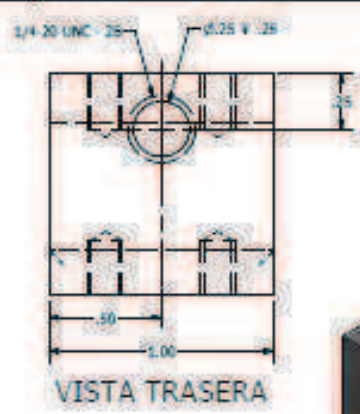


ESC: 1 : 4

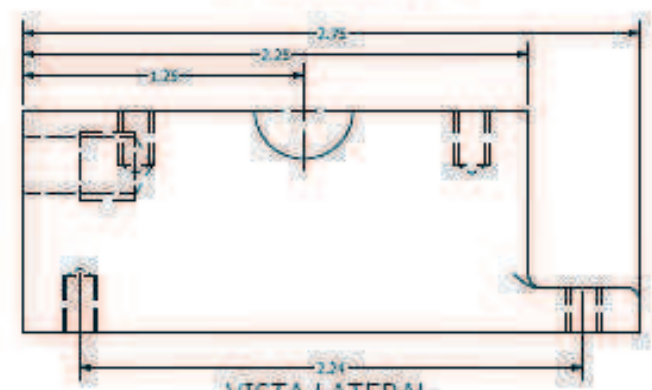
ASIENTO SENCILLO			
El asiento sencillo se ensambla a la pared posterior junto con la placa rosada, estas se fijan a través de la pared posterior por medio de cuatro tornillos, además, en esta placa es donde se asentará uno de los empaques.			
Diseño: RLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 3 : 1	Cota: in		
No. plano: 2	Materia: Al	No. Partes: 1	Fecha: 21/05/2011



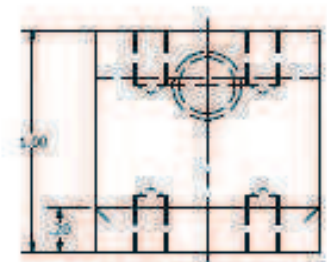
VISTA SUPERIOR



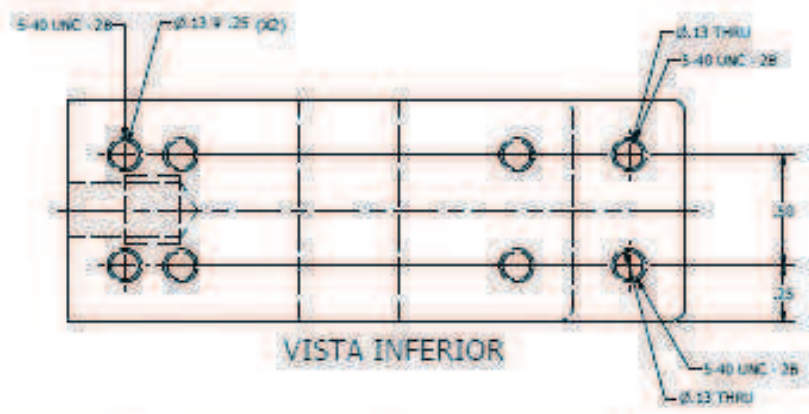
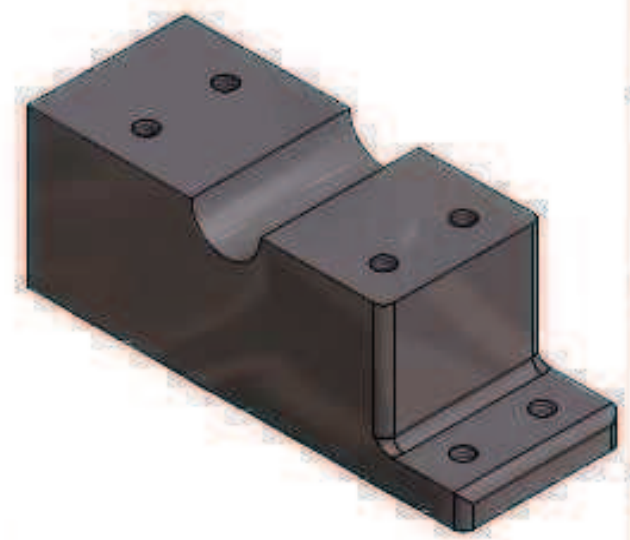
VISTA TRASERA



VISTA LATERAL IZQUIERDA

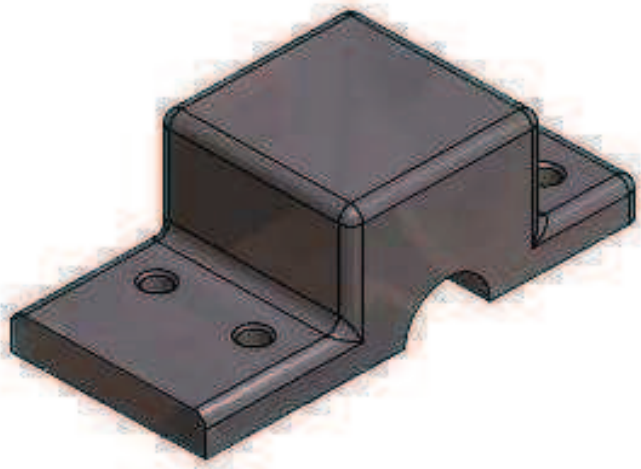
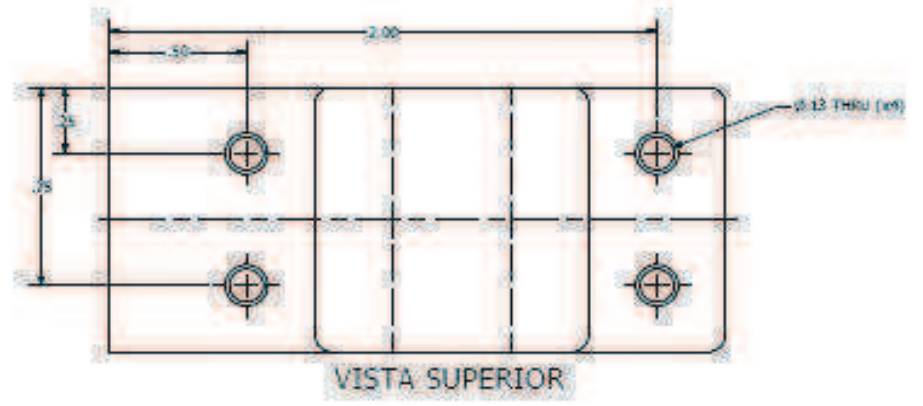
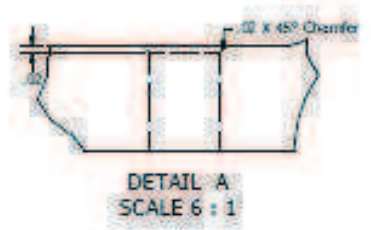
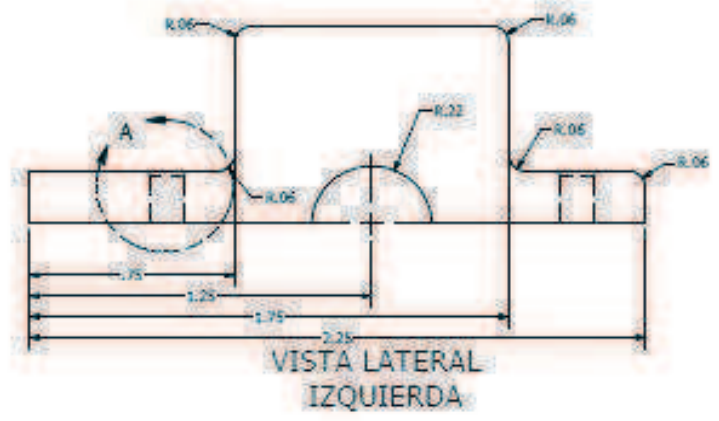
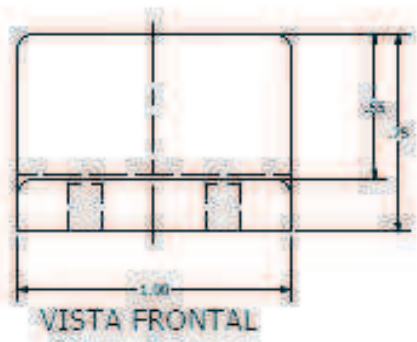


VISTA FRONTAL



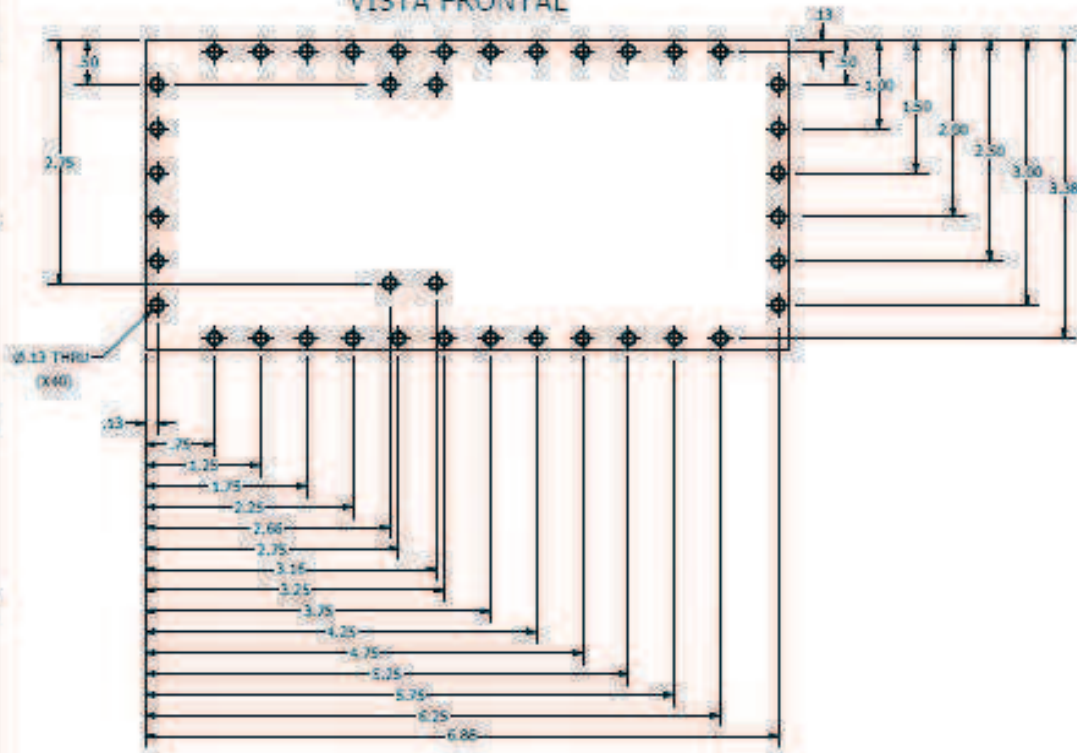
VISTA INFERIOR

		BASE CENTRAL INFERIOR	
		<p>La base central es el principal soporte de las partes móviles de la válvula, en el desmontaje el poste principal. Dicha base se fija a la base de la carcasa por medio de cuatro tornillos y a una pared lateral, en la parte superior de esta pieza se ensambla la base central inferior.</p>	
Realizó: HLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 2,5-1	Con: 01		
No. Partes: 3	Materia: Acero Inox.	No. Partes: 1	Fecha: 21/05/2011

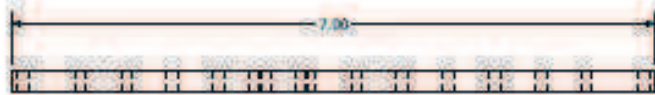
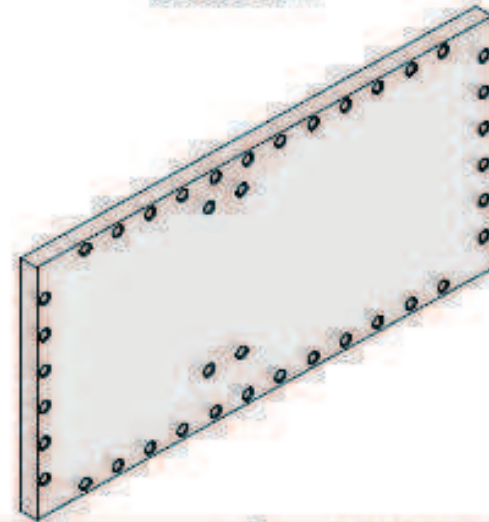


		BASE CENTRAL SUPERIOR:	
		La base central superior se atornilla a la base central inferior, con el objetivo de restringir el movimiento del poste central a un movimiento longitudinal a lo largo de eje de la circunferencia formada por ambas bases.	
Geómetra: BJT	Revisó: J.C.P		
Escala: 3 : 1	Cota: in		
No. plano: 4	Materia: Acero inox.	No. Partes: 1	Fecha: 21/05/2012

VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL IZQUIERDA



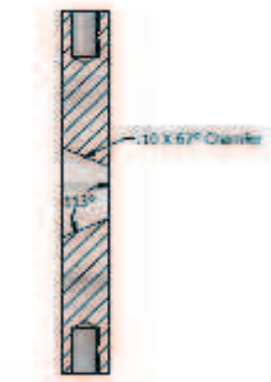
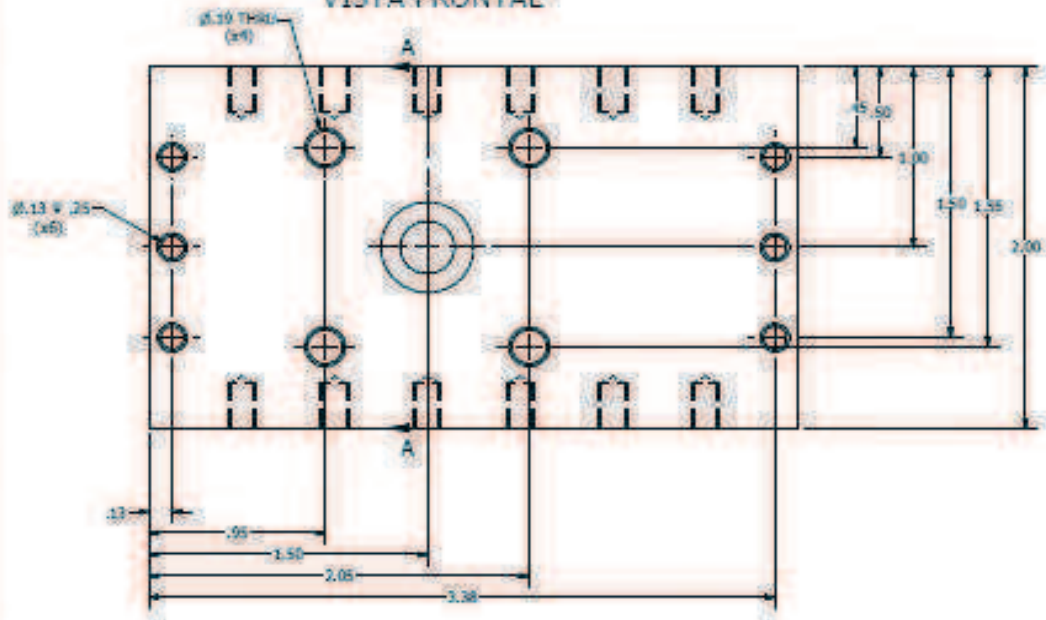
VISTA INFERIOR

BASE DE CARCASA

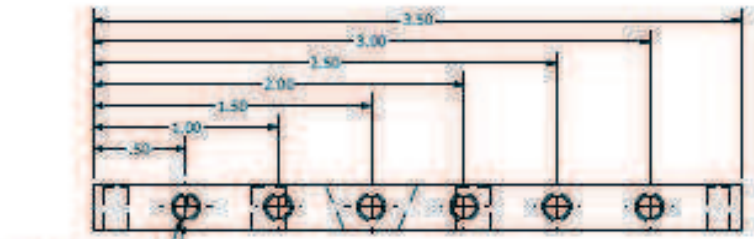
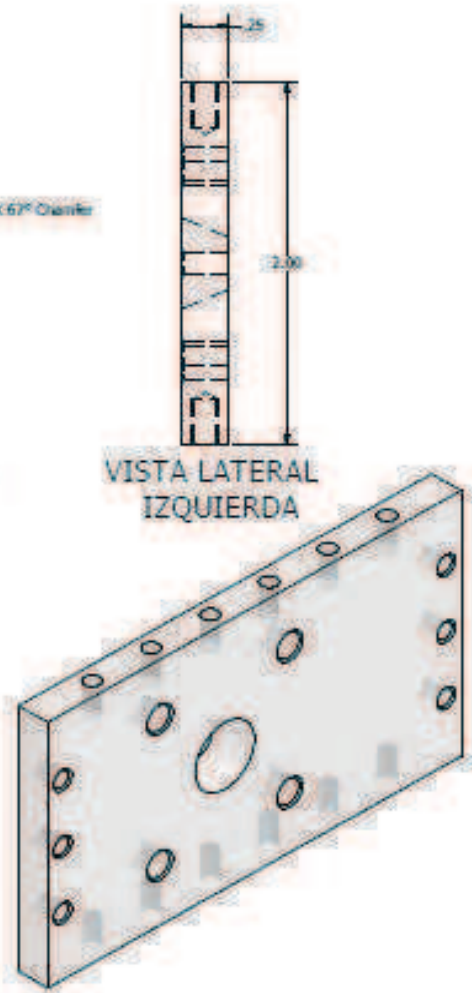
La base de la carcasa es la pieza a la cual se atornillan las paredes de la misma así como la base central inferior.

		BASE DE CARCASA	
		La base de la carcasa es la pieza a la cual se atornillan las paredes de la misma así como la base central inferior.	
Realiza: RL.T	Revisó: J.C.P		
Escala: 1 : 1	Cota: in		
No. plano: 5	Materia: Acilbon	No. Partes: 1	Fecha: 23/05/2011

VISTA FRONTAL



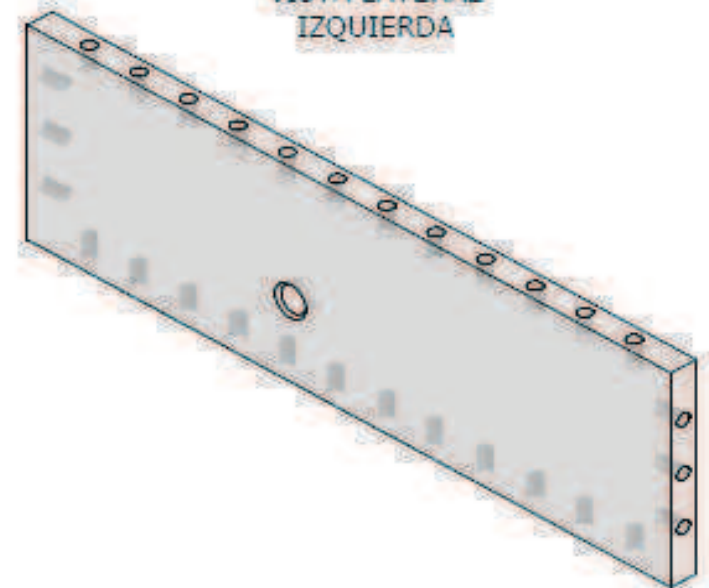
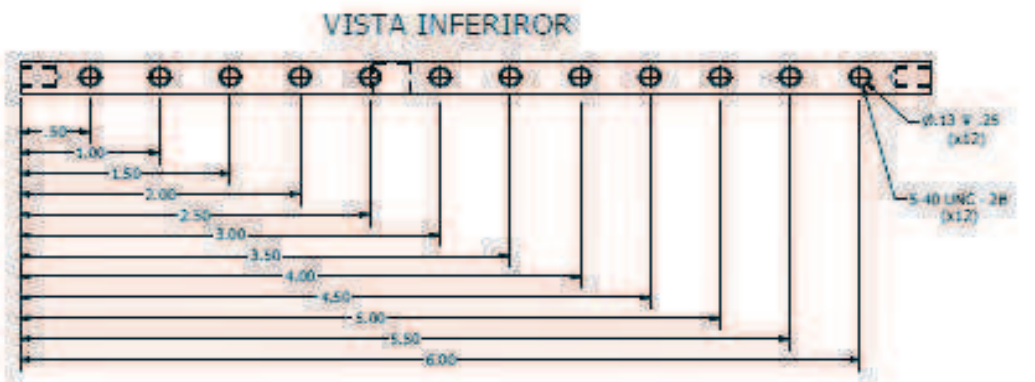
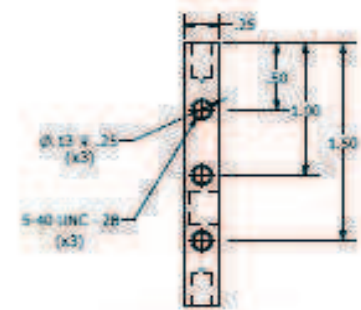
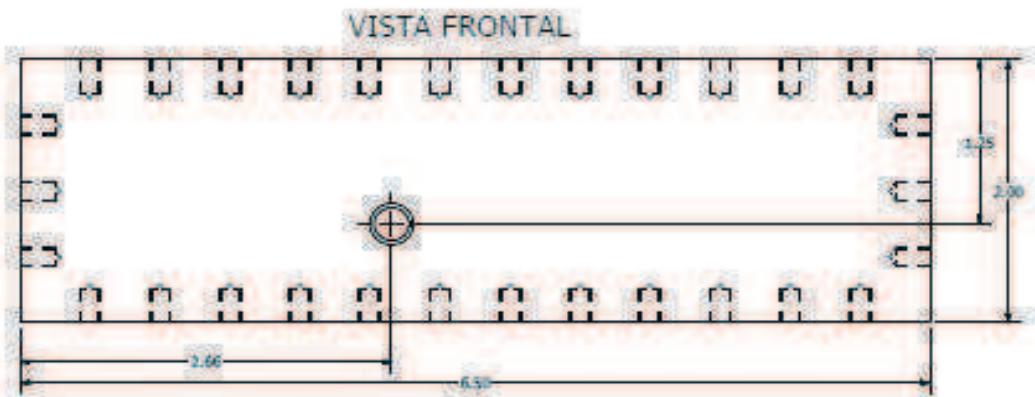
VISTA LATERAL IZQUIERDA



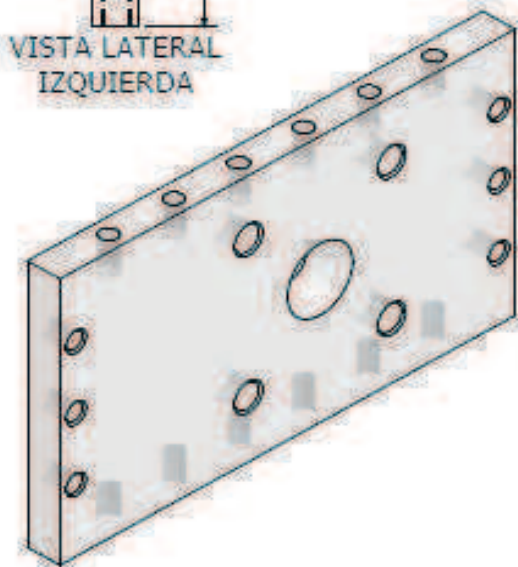
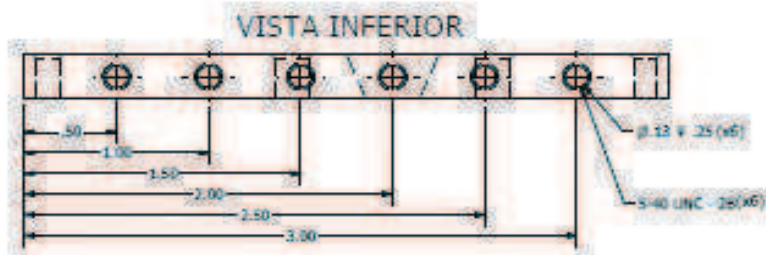
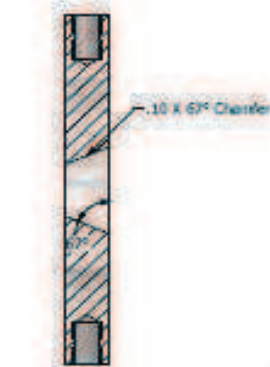
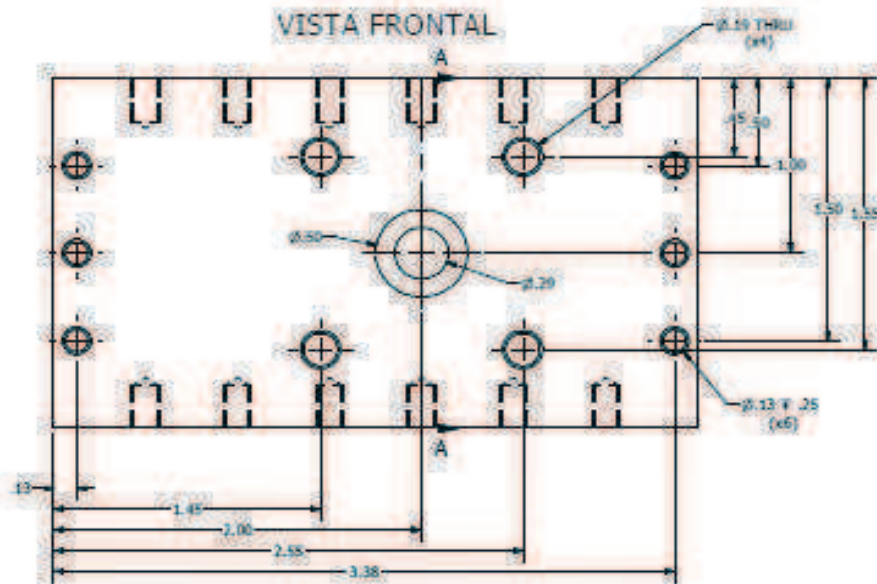
VISTA INFERIOR

(x6) 5-40 UNC-2B
(x6) Ø.13 x .25

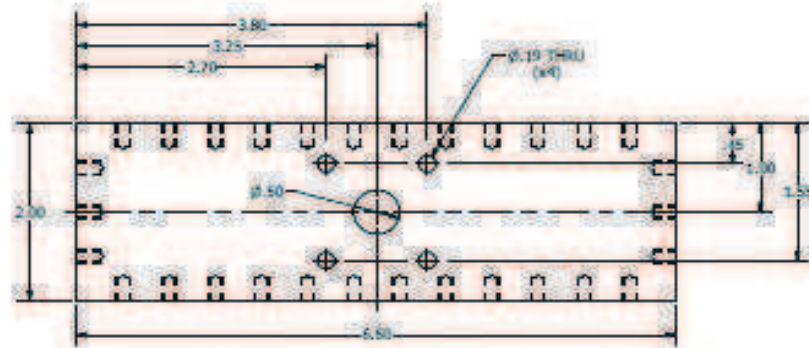
		PARED FRONTAL	
Realizado: B.L.T.	Revisado: J.C.P.	la pared frontal se atornilla a las dos paredes laterales así como a la tapa y la base de la carcasa, a través de ella se atornilla una de las placas roscadas (por la parte exterior) con el asiento con soldadores (parte interior).	
Escala: 2 : 1	Código:		
Nº de plano: 7	Materia: Acrylic	Nº. Partes: 1	Fecha: 23/05/2011



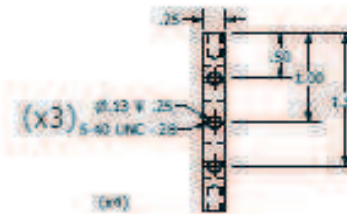
		PARED LATERAL 2	
		La pared lateral 2 se atornilla tanto a las placas frontal y posterior como a la base y a la tapa de la carcasa, en ella se fija uno de los lados de la base central.	
Realizó: RL	Revisó: J.C.P		
Escala: 1,5'-1	Cosa: in		
No. plano: 9	Materia: Acrílico	No. Partes: 1	Fecha: 23/05/2011



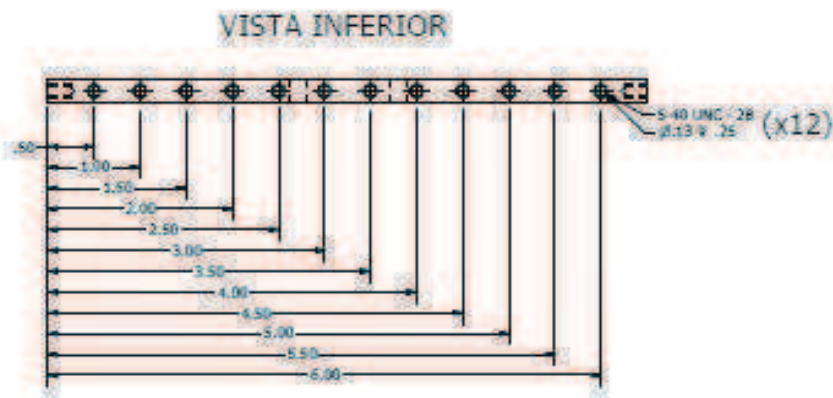
PARED POSTERIOR			
La pared posterior se atornilla a las dos paredes laterales así como a la base y a la tapa de la carcasa, a través de ella se atornillan una de las placas roscaadas (esterna) con el asterisco señalado (interior).			
Realizó: RLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 1:5 : 1	Cota: in		
No. plano: 10	Materia: AcRfka	No. Partes: 1	Fecha: 23/05/2011



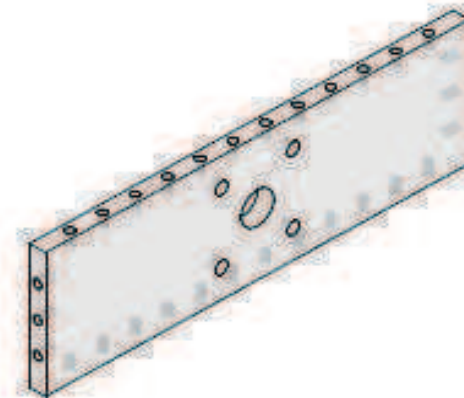
VISTA FRONTAL



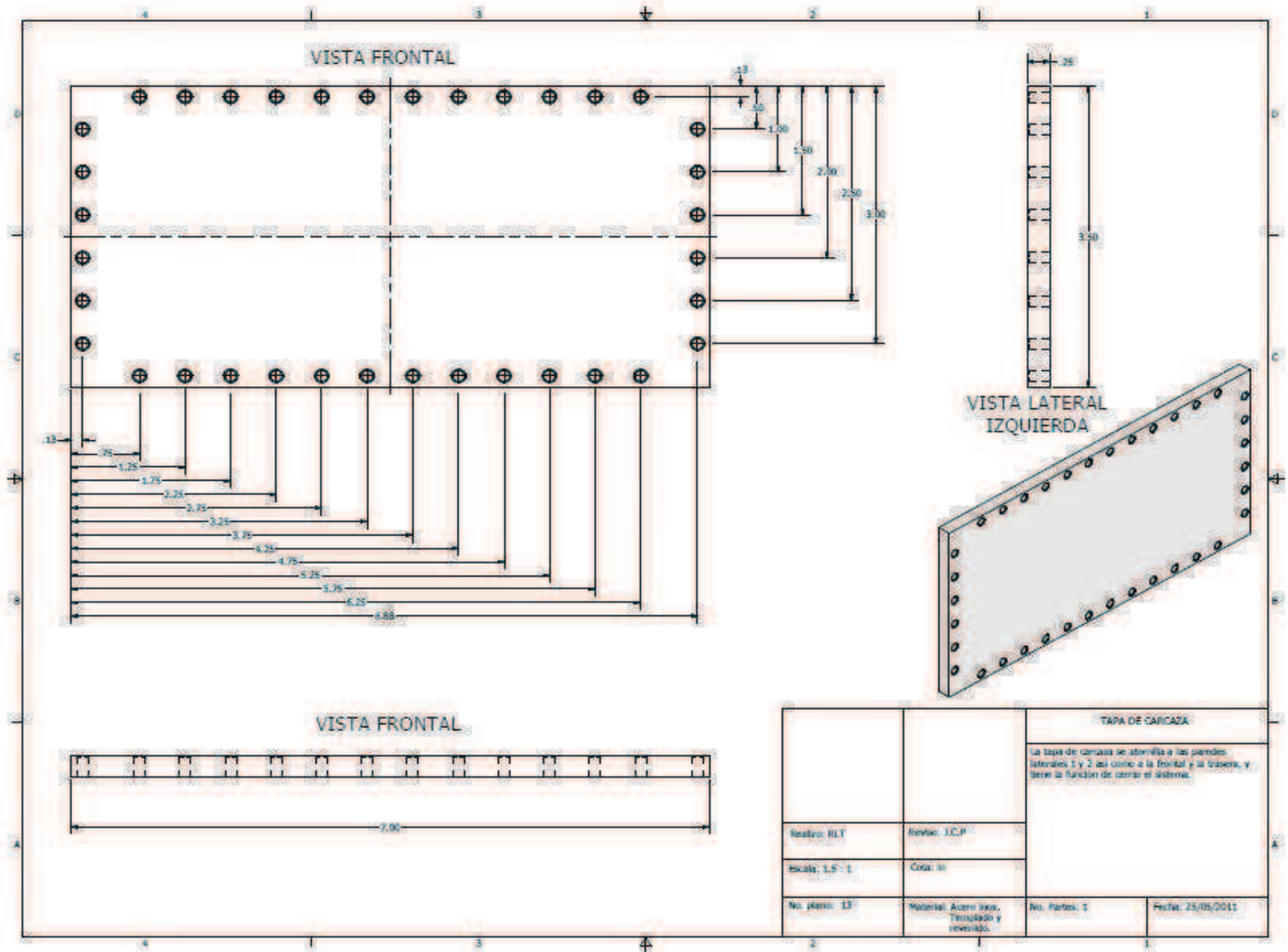
VISTA LATERAL IZQUIERDA

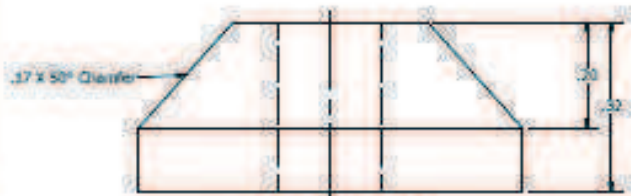


VISTA INFERIOR

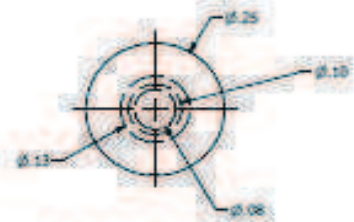


PARED LATERAL 1			
<p>la pared lateral 1 se atornilla tanto a las placas frontal y posterior como a la base y a la tapa de la carcasa, a través de ella se atornilla una de las placas revisadas (parte exterior) con la placa de entrada.</p>			
Realizo: BLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 1 : 1	Cofo: 01		
No. plano: 8	Materia: Acrylic	No. Partes: 1	Fecha: 23/05/2011

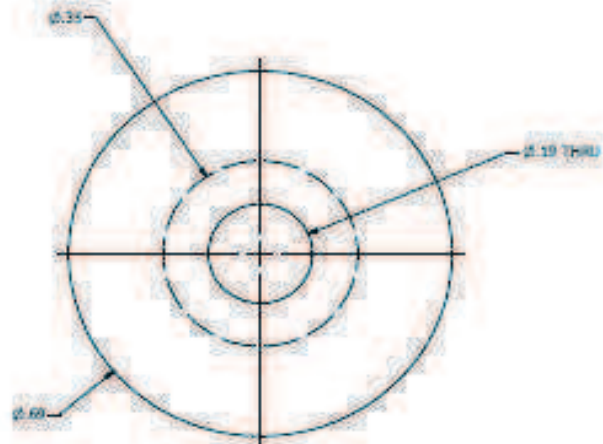




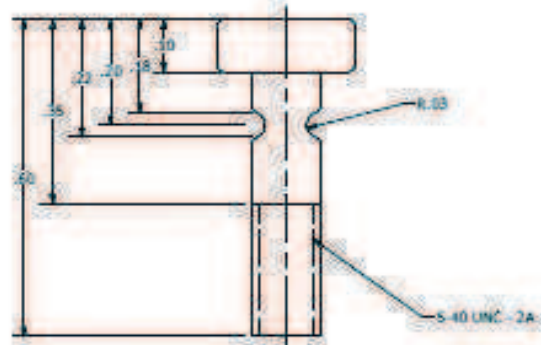
VISTA FRONTAL



VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR



VISTA FRONTAL

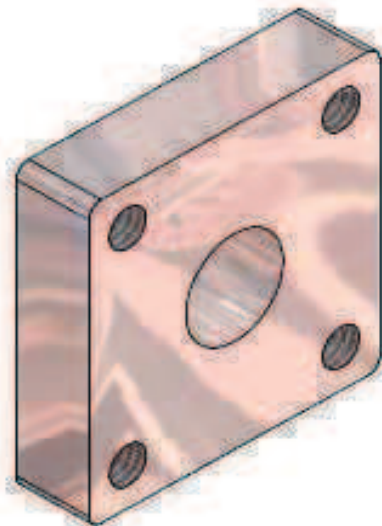
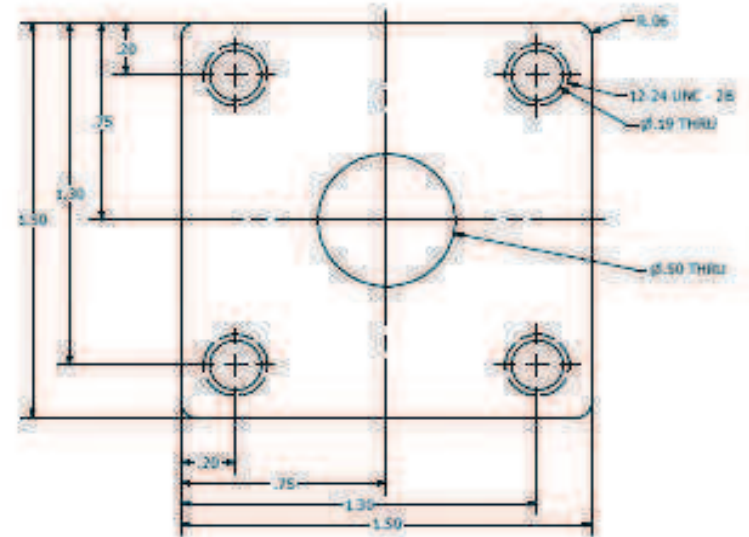
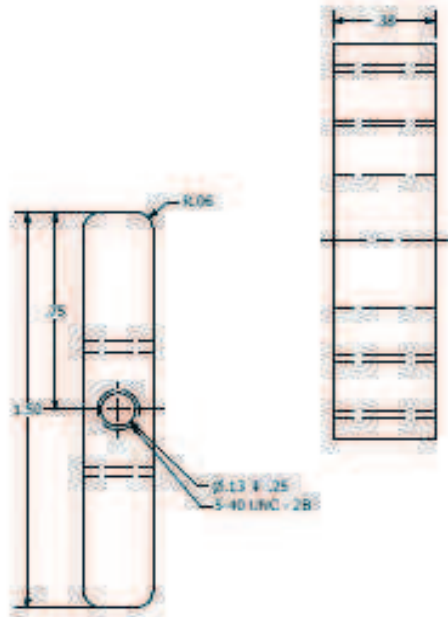
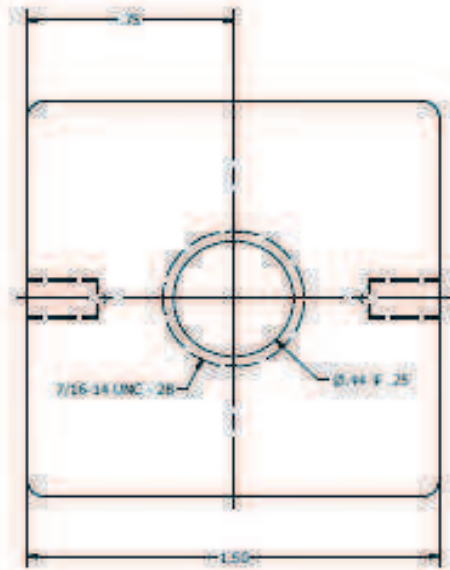


NOTA:
El perfil lateral de la cabeza del tornillo lleva un acabado de moledrado.

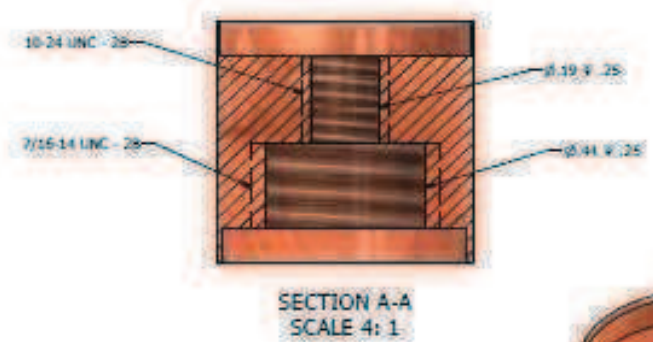
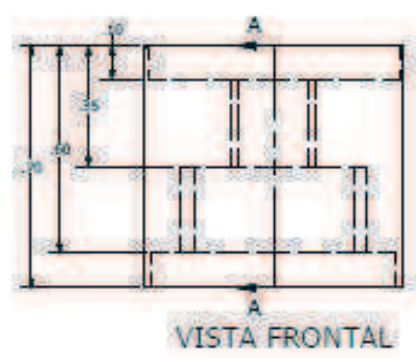
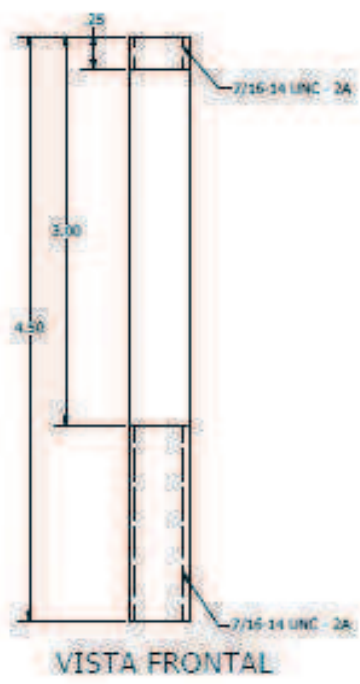


EMPAQUE BUJA Y TORNILLO SUJETADOR			
Realizó: BLT		Revisó: J.C.P	
Escala: 6 : 1		Cota: SI	
No. plano: 6		Material: Bujas: Acero Inox.	No. Partes: 2 y 4
		Fecha: 23/05/2011	

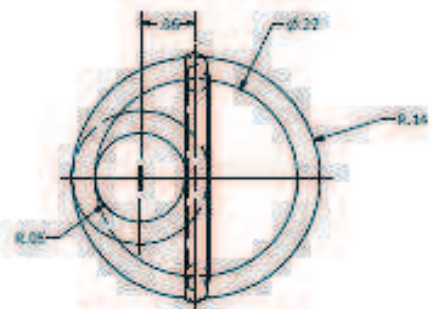
El empaque de Bujas es el elemento encargado de sellar ambas salidas de la válvula, dicho elemento se fija a el sujetador de empaques.
Los tornillos sujetadores se atornillan al exterior del sujetadores y a la placa de resortes y cumplen la función de mantener posicionados a los resortes de N-TL.



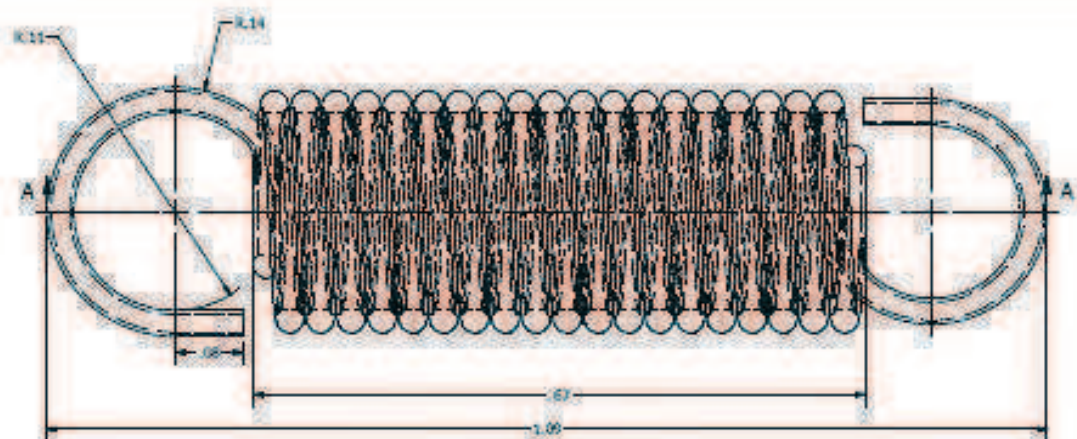
PLACA DE ENTRADA Y PLACA DE RESORTES			
		<p>La placa de entrada se atornilla a una de las placas resacadas a través de una de las paredes laterales, mientras que la placa de resortes se enrosca a la roca más larga del poste, a dicha placa se atornillan dos de los tornillos sujetadores.</p>	
Realizó: RLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 3 : 1	Cada in		
No. plano: 11	Material: Al Acero INOX	No. Partes: 1 c/u	Fecha: 25/05/2011



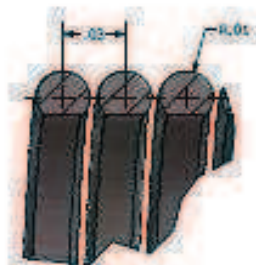
		POSTE Y SUETADOR DE BRINQUE	
		El poste es la pieza donde se atornillan los sujetadores de empaque y la placa de resortes, esta pieza esta restringida por las bases centrales superior e inferior. Los sujetadores de empaque se atornillan a cada lado del poste central, en ellos tambien se alojan los empaques.	
Realizo: BLT	Reviso: J.C.P		
Escala: 1.5: 1 4: 1	Cota: in		
No. plano: 12	Materia: Acero Inox. C2	No. Partes: 1 y 2	Fecha: 25/05/2011



VISTA FRONTAL



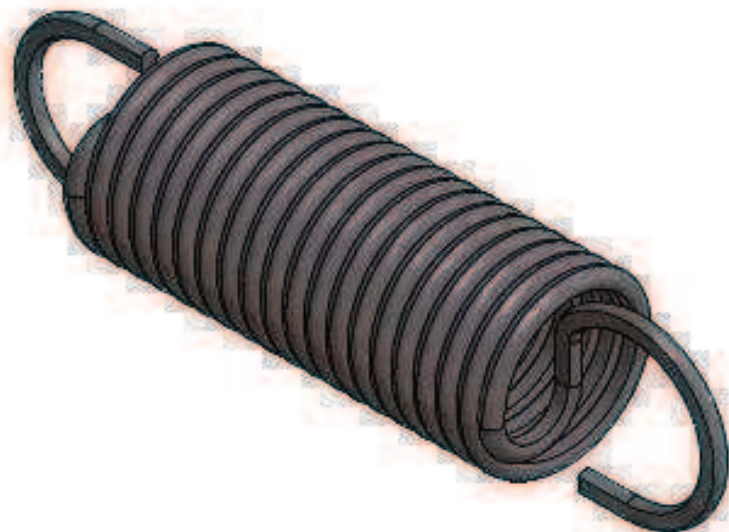
VISTA LATERAL IZQUIERDA



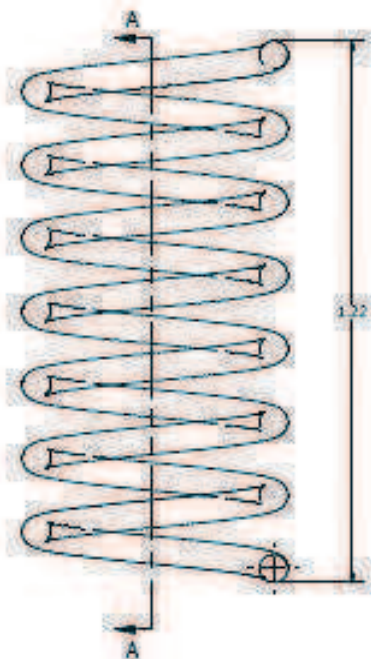
DETAIL B
SCALE 20 : 1



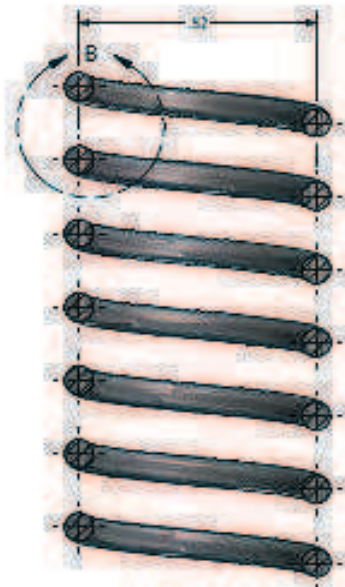
SECTION A-A
SCALE 10 : 1



RESORTE DE Ni-TI			
<p>El resorte de Ni-Ti es la parte medular del dispositivo ya que es el que presenta el comportamiento termoelástico debido a las propiedades particulares del material, estos se montan por los extremos en los tornillos sujetadores que a su vez van montados en la placa de resortes y en el asiento con sujetadores.</p>			
Realizó: RLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 10 : 1	Coló: m		
No. plano: 13	Materia: Ni-Ti	No. Partes: 2	Fecha: 25/05/2011



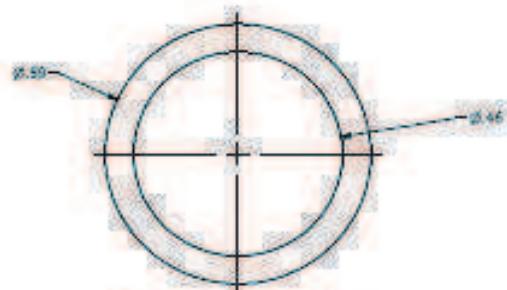
VISTA FRONTAL



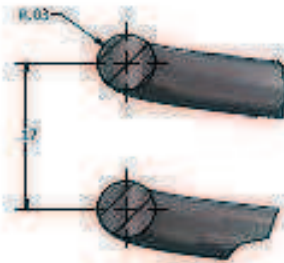
SECTION A-A
SCALE 5 : 1



NUMERO DE ESPIRAS
ACTIVAS: 6



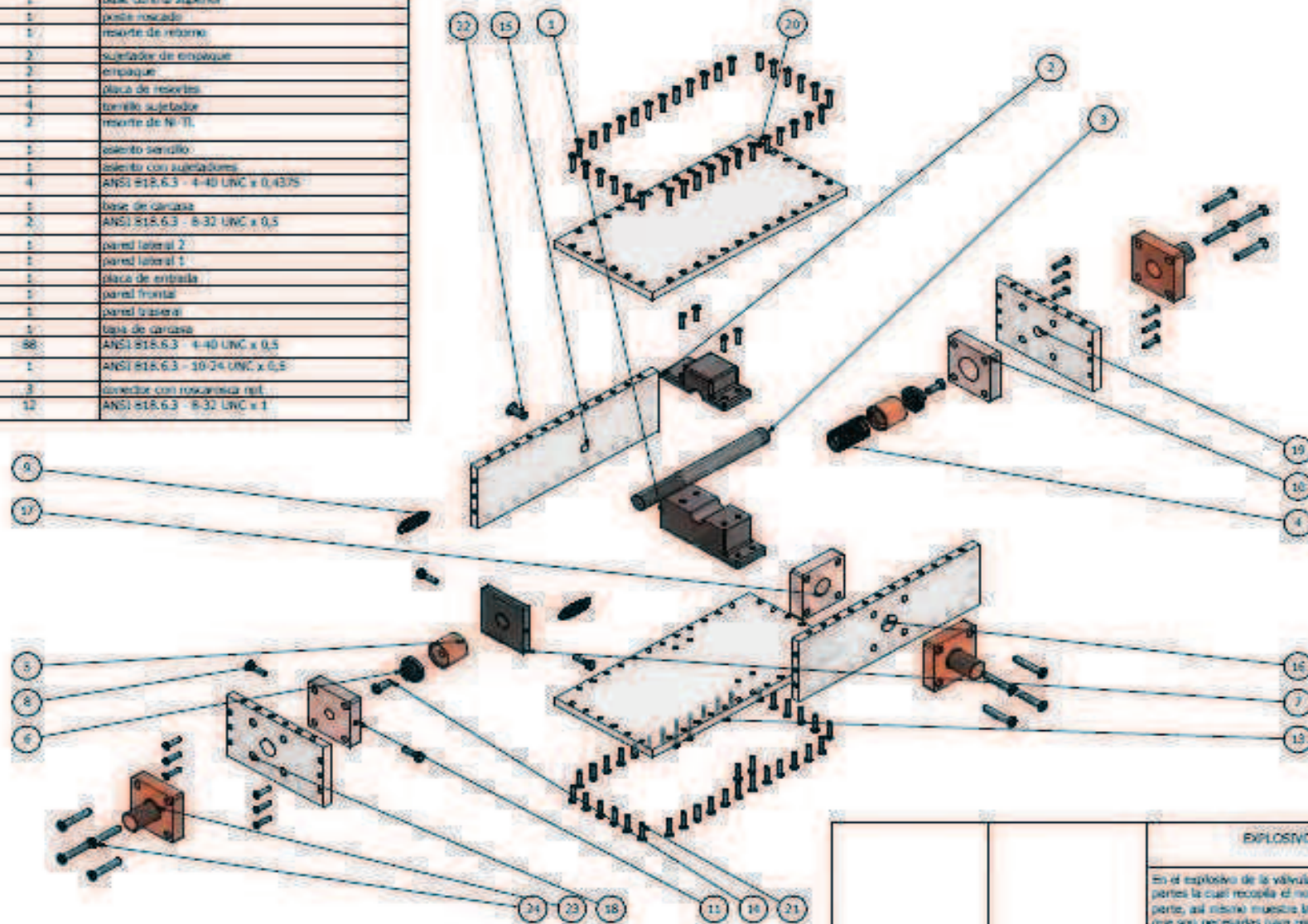
VISTA INFERIOR



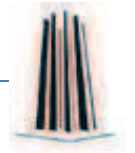
DETAIL B
SCALE 10 : 1

RESORTE DE RETORNO			
		<p>El resorte de retorno cumple la función de elongar a los resortes de N.º 7 cuando estos se encuentran por debajo de su temperatura de transformación. A través de dicho resorte pasa el poste, el cual restringe su movimiento, además, el resorte descansa en uno de los costados de las bases centrales ensambladas y en el otro descansa el sujetador de empuje, permitiendo así la compresión del mismo.</p>	
Diseño: HLT	Revisó: J.C.P		
Escala: 5 : 1	Cota: III		
No. plano: 14	Materia: Acero	No. Partes: 1	Fecha: 25/05/2011

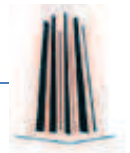
LISTA DE PARTES		
NUM. DE PARTE	CANTIDAD	NOMBRE DE PARTE
1	1	base central inferior
2	1	base central superior
3	1	perno roscado
4	1	resorte de retorno
5	2	sueldador de empaque
6	2	empaque
7	1	placa de resortes
8	4	tuercas sujetador
9	2	resorte de N-TL
10	1	cojinetes sencillos
11	1	cojinete con sueldadura
12	4	ANSI #15.6.3 - 4-40 UNC x 0.4375
13	1	base de carcasa
14	2	ANSI #15.6.3 - 8-32 UNC x 0.5
15	1	pared lateral 2
16	1	pared lateral 1
17	1	placa de entrada
18	1	pared frontal
19	1	pared trasera
20	1	base de carcasa
21	88	ANSI #15.6.3 - 4-40 UNC x 0.5
22	1	ANSI #15.6.3 - 10-24 UNC x 0.5
23	3	director con rosca interna ref.
24	12	ANSI #15.6.3 - 8-32 UNC x 1



EXPLOSTIVO VALVULA			
En el explosivo de la válvula se incluye una lista de partes la cual recopila el nombre y el número de parte, así mismo muestra la cantidad de partes que son necesarias para realizar el ensamble y sirve como guía para determinar como debe de ser ensamblada dicha válvula.			
Realizó: RLT	Diseño: J.C.P		
Escala: 9 / 15	Cota: m		
No. plano: 15	Materia:	No. Partes:	Fecha: 06/06/2011



REFERENCIAS



Referencias

1. Otsuka k. and Wayman C. M. (1998). General Applications of SMA's and Smart Materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. (pp. 220-240). Cambridge, Inglaterra.
2. Cortés J. (1997). Superelasticidad en aleaciones Cu-Al-Be con Memoria de Forma. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica. ENEP Aragón, UNAM.
3. Ríos A. (2009). Diseño de dispositivos para crear movimiento a partir del movimiento termomecánico de los materiales con memoria de forma. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica FES Aragón, UNAM.
4. Otsuka k. and Wayman C. M. (1998). Mechanisms of shape memory effect and superelasticity. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. (pp. 27-49). Cambridge, Inglaterra.
5. Otsuka k. and Wayman C. M. (1998). Introduction to Shape Memory Materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. (pp. 1-27). Cambridge, Inglaterra.
6. Callister W.D. (2007). Chapter 9. Material Science and Engineering an Introduction. John Wiley and Sons Inc. Seventh edition. (pp. 252-304). San Francisco, California, U.S.A.
7. Stoeckel and Yu. (1991). Superelastic NiTi Wire. (pp. 45-50). Wire Journal International. Fermont, California.
8. Pelton A.R, Di Cello J, and S. Miyazaki. (2000). Optimisation of processing and properties of medical grade Nitinol wire. (pp. 107-118). Institute Of Material Science, University of Tsukuba. Ibaraki, Japan.
9. Cortés J. y Becerril H. (2003). Diseño de un termo-actuador basado en alambres con memoria de forma. (pp. 37-43). Centro Tecnológico Aragón, FES Aragón, UNAM. México D.F.
10. Soul H. R. (2005). Aplicaciones de la superelasticidad de las aleaciones con memoria de forma para control de vibraciones en estructuras. (pp. 14-59). Universidad de Cuyo, Mendoza, Argentina.



11. Buchheit T. E. Kumpf S.L. and Wert J. A. (1995). Modeling the Stress-Induced Transformation Behavior of Shape Memory Alloy Single Crystals. (pp. 4189-4199). *Acta metall. mater.* 43-11.
12. G. E. Dieter and Kuhn H. A. (1961). *Mechanical Metallurgy*. Mc. Graw-Hill. 1st. Edition. (pp. 128-132). U.S.A
13. Buchheit T. E. and Wert. J. A. (1994). Modeling the Effects of Stress State and Crystal Orientation on the Stress-Induced Transformation of Ni-Ti Single Crystals. (pp. 2383-2389). *Metallurgical and Materials Transactions A*. 25A. California, U.S.A.
14. Cortés J. y García. F. N. (Trabajo en proceso). Estudio de las interacciones intergranulares durante la transformación martensítica inducida por esfuerzo en materiales con memoria de forma. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. México D. F.
15. Cortés. J. (2007). Modelación matemática de la transformación martensítica inducida por esfuerzo. Tesis Doctoral. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM. México D. F.
16. Otsuka k. and Wayman C. M. (1998). *Ti-Ni shape memory alloys*. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. (pp. 49-93). Cambridge, Inglaterra.
17. Otsuka k. and Wayman C. M. (2004). *Physical metallurgy of Ni-Ti-based shape memory alloys*. Cambridge University Press. (pp. 512-678). Cambridge, Inglaterra.
18. Academia Nacional de ingeniería A.C. y National Research Council. (1995). El suministro de agua de la Ciudad de México. Características de la Zona Metropolitana del Valle de México. National Academy Press. (pp. 26-42). Washinton, U.S.A.
19. CONAGUA. (2002). Programa para mejoramiento de la calidad del agua potable en la Zona Metropolitana del valle de México. (pp. 2.2-2.25.). Publicado por la CONAGUA, México D.F.
20. CONAGUA y SEMARNAT. (2002). Proyecto del Túnel Emisor Oriente. (pp. 1-10). Publicado por la CONAGUA. México D.F.
21. Academia Nacional de ingeniería A.C. y National Research Council. (1995). Descripción del manto acuífero de la ciudad de México y su explotación. El suministro de agua de la Ciudad de México. (pp. 42-78). National Academy Press. Washinton, U.S.A.



22. Academia Nacional de ingeniería A.C. y National Research Council. (1995). Administración de la Calidad del agua. El suministro de agua de la Ciudad de México. (pp. 42-78). National Academy Press. Washinton, U.S.A.
23. CONAGUA. (2010). Situación de los recursos hídricos. Estadísticas de agua 2010. (pp. 17-46). Publicado por CONAGUA. México D.F.
24. CONAGUA. (2010). Usos del agua. Estadísticas de agua 2010. (pp. 59-74). Publicado por la CONAGUA. México D.F.
25. INEGI. (2010). Tablas estadísticas referentes a los recursos hídricos y su explotación. <http://www.inegi.org.mx/Sistemas/temasV2/Default.aspx?s=est&c=21385>
26. CONAGUA. (2008). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea del acuífero de la Zona Metropolitana Del Valle de México. (pp. 2-28). Publicado por la CONAGUA. México D.F.
27. CONAGUA. (2010). Escenarios Futuros. Estadísticas de agua 2010. (pp. 159-167). Publicado por la CONAGUA. México D.F.
28. CONAGUA. (2010). Anexos A y B. Estadísticas de agua 2010. (pp. 193-249). Publicado por la CONAGUA. México D.F.
29. Comisión Estatal de Aguas. (2010). Dispositivos ahorradores de agua comerciales. <http://www.ceaqueretaro.gob.mx/index/ahorra>. Ciudad de Querétaro, México.
30. Anzapack®. (2010) Catálogo de productos ahorradores de agua. México D.F.
31. HELVEX®. (2009). Catálogo de fundamentos de instalación y mantenimiento de productos. México D.F.
32. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2010). www.imta.gob.mx . Jiutepec, Morelos, México.
33. Euroflex®. (2011). Características físicas de aleaciones comerciales de Ni-Ti <http://www.euroflex-gmbh.de/english/nickel-titan.htm>
34. Otsuka k. and Wayman C. M. (1998). The design of shape memory alloy actuators and their applications. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. (pp. 220-240). Cambridge, Inglaterra.
35. Imagesco®. (2011). Especificaciones técnicas de productos a base de aleaciones de Ni-Ti. <http://www.imagesco.com/nitinol/expansion-spring.html>
36. Stoeckel and Simpson. (1992). Actuators and control with shape memory alloys. ADPA/AIAA/ASME/SPIE conference on Active material and Adaptive Structures. (pp. 156-160). IOP Publishing Ltd. California, U.S.A.