



Universidad Nacional Autónoma de México

Maestría y Doctorado en Arquitectura

Campo de conocimiento: Tecnología

**Aplicación Arquitectónica de la Aleación Metálica de
Ni-Ti con propiedad de Memoria de Forma para Sensor
y Actuador de Movimiento
[Accionador Solar Pasivo]**

Tesis

Que para optar por el grado de:

Maestro en Arquitectura

Campo de conocimiento: Tecnología

Presenta:

Arq. Isai Nestor Chepi Rivera

Director de tesis

Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

Comité Tutor

Dr. en Ing. Jacinto Cortés Pérez

Programa de Investigación, FES Aragón, UNAM

Mtro. en Ing. Fernando Néstor García Castillo

Programa de Investigación, FES Aragón, UNAM

Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

Dr. en Ing. Alejandro Solano Vega

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

México, D.F. Noviembre 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

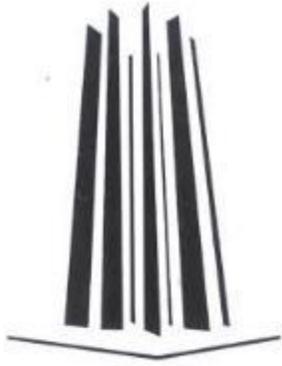


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Jurado

Director de Tesis

Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

Sinodales

Dr. en Ing. Jacinto Cortés Pérez

Programa de Investigación, FES Aragón, UNAM

Mtro. en Ing. Fernando Néstor García Castillo

Programa de Investigación, FES Aragón, UNAM

Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

Dr. en Ing. Alejandro Solano Vega

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

Asesores

Dr. Juan José de Damborenea González

Corrosión y Protección de Materiales Metálicos, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España

Dra. Ana Conde del Campo

Corrosión y Protección de Materiales Metálicos, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España

Dr. Félix A. López

Tecnologías Ecoinnovadoras aplicadas a Procesos Medioambientales, Reciclado de Materiales y Aprovechamiento Energético, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España

Dra. Isabel Padilla Rodríguez

Materiales de Valor Añadido a Partir de Fuentes No Convencionales, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España

Dr. José Ignacio Robla Villalba

Procesos, Materiales y Energía en la Metalurgia Ecológica y Sostenible, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Madrid, España.

Mtro. David Franco Martínez

Responsable del área de ahorro de energía de la FES Aragón, UNAM

Dedicatoria

A mis padres que me dieron la vida:
Esteban Chepi González
Crescenciana Rivera Salvador

A mi hermana y a su familia
Marisa Chepi, Rolando Matías, Dana Aileen y Evelyn

A mis tías y tíos
Enriqueta Chepi, Rufina Chepy, Crispín Bautista
Amalia Nolasco y Silvano Chepi

A mi prima
Aidee y a mi sobrina Claudia Montserrat

A mi primo y a su familia
Moisés Chepi, Leidy Arellano y Jimena

A mi abuelita que en paz descanse
Herlinda González Sánchez

Agradecimientos

Al **Mtro. Ernesto Ocampo Ruiz**, por su colaboración incondicional como tutor en el desarrollo de esta investigación, porque creyó en mí y me alentó a seguir adelante en los instantes difíciles de la maestría, por apoyarme cuando tome la decisión de realizar una estancia de investigación en el extranjero.

Al **Dr. Juan José de Damborenea González**, por fungir como mi tutor durante la estancia de investigación y a todo su equipo de colaboradores, por integrarme a su grupo de trabajo en el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de Madrid [CENIM], que dedicaron parte de su tiempo en enseñarme sobre la utilización de sistemas de energía solar concentrada para procesos electroquímicos y estudio de la aleación Ni-Ti.

Al **Dr. Jacinto Cortés Pérez**, por su cotutoría y por abrirme las puertas del Laboratorio de Mecánica Aplicada de la Facultad de Estudios Superiores Aragón [Fes Aragón], lo que me permitió conocer y trabajar con un grupo de especialistas en Aleaciones con Memoria de Forma.

Al **Mtro. en Ing. Fernando Néstor García Castillo**, por enseñarme todo lo relacionado al comportamiento de los materiales con memoria de forma, por apoyarme en la redacción y organización del contenido temático de la tesis.

Al **Mtro. en Arq. Jorge Rangel Dávalos** y al **Dr. en Ing. Alejandro Solano Vega**, por asesorarme en el formato editorial del documento de tesis, así como en la preparación de la presentación audiovisual de apoyo para el examen profesional.

A la **UNAM**, que a través del **Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura**, me dio nuevamente la oportunidad de seguir forjándome como especialista dentro de sus aulas, y poder obtener el grado de maestro en Arquitectura.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología -CONACYT-**, por el apoyo económico recibido, que igualmente me otorgó la Beca de Movilidad para el Extranjero, lo que me permitió realizar una estancia de investigación en Madrid España, y la oportunidad de trabajar con especialistas en la ciencia de la metalurgia, y además, conocer la diversidad cultural de otro continente.

Reconocimientos



Laboratorio de Mecánica Aplicada Fes Aragón

Por el apoyo técnico y económico otorgado para la realización de la presente investigación.

Índice

Resumen	ix
Abstract	ix
Introducción	x
Capítulo I.- Aleaciones con Memoria de Forma	13
Generalidades de las Aleaciones con Memoria de Forma [AMF].....	13
La transformación martensítica desde el punto de vista atómico.....	16
Anisotropía de las AMF	17
.....	18
NiTiNOL, aleación con efecto de memoria de forma.....	18
Aplicaciones de las AMF.....	20
Motores con memoria de forma	20
Control de posicionamiento utilizando un material con memoria de forma.....	21
Modelo de ingeniería EO-1 [LFSA] para montaje de panel solar ligero	23
Persiana inteligente utilizando AMF como sistema de apertura y cierre.....	24
Capítulo II.- Sistemas de seguimiento solar	28
Tecnología solar.....	28
Generalidades de los sistemas de seguimiento solar.....	28
Seguidor de un solo eje	29
Seguidor de dos ejes.....	30
Clasificación de los seguidores en base a su mecanismo de control	30
Seguidor solar pasivo	30
Seguidor solar activo.....	31
Métodos y sistemas de concentración solar	32
Propagación de la luz mediante óptica geométrica	33
Análogos de sistemas de seguimiento y concentración solar	36
Seguidor solar pasivo dirigido por laminillas de Al-Acero.....	36
Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos	37
Calentadores solares de agua con seguidor de trayectoria solar	37
Seguidor solar electrónico de dos ejes	38
Seguidor solar para el control electrónico de un reflector scheffler	39
Capítulo III.- Experimentación	41
Selección del material con memoria de forma.....	41
Determinación de las temperaturas de transformación del resorte	41

Medición con sensor Data Easy Logger USB y Termopar	42
Medición con termómetro de infrarrojos	44
Medición con cámara termográfica	45
Método de concentración mediante encapsulamiento	48
Pruebas contracción de la AMF utilizando el sol como fuente de calor	51
Pruebas termomecánicas	54
Capítulo IV.- Diseño, construcción y aplicación del accionador solar	57
Principio de funcionamiento de un termoactuador convencional	57
Principio de funcionamiento del accionador solar >Termoactuador solar<	58
Partes y componentes del accionador solar	59
Determinación de la eficiencia térmica del accionador	64
Partes y componentes del seguidor solar	66
Propuesta de seguidor solar prototipo	69
.....	70
Aplicación arquitectónica del seguidor solar	70
Accionador solar como mecanismo de apertura y cierre para ventanas	72
Aplicación arquitectónica de la ventana	73
Conclusiones.....	76
Bibliografía.....	77
Mesografía.....	78
Glosario	79
Anexos.....	80
A-01: Análisis de costo del accionador solar.....	80
A-02: Análisis de costo del prototipo de seguidor solar.....	80
A-03: Análisis de costo de la ventana inteligente.....	82
A-04.-Ficha técnica del accionador solar	83
A-05.-Preámbulo del trabajo de investigación	85

Resumen

La presente investigación, se enfoca al diseño, construcción e implementación de un sistema de control inteligente, nombrado >accionador solar o termoactuador solar<; consiste, en un dispositivo accionado por un resorte de Níquel-Titanio [Ni-Ti], el cual posee el efecto memoria de forma.

El resorte, al recibir un incremento de temperatura por radiación solar, se contrae, generando una fuerza de tensión que arrastra un pistón para producir un desplazamiento, que es transmitido al eje de otro dispositivo mecánico en forma movimiento.

Se propone su utilización, como mecanismo de articulación de movimiento en los sistemas de seguimiento solar, permitiendo que un panel fotovoltaico pueda seguir la trayectoria del sol durante el día, lo que mejora su rendimiento de captación de energía.

Otra alternativa de aplicación, es su implementación como dispositivo de apertura y cierre, en una ventana tipo persiana, para ventilar el interior de un edificio de manera pasiva, reduciendo la dependencia de la climatización artificial.

Ambas aplicaciones, eliminan la necesidad de emplear sistemas electromecánicos, debido a que el resorte de Ni-Ti funcionan como >sensor y actuador < a la vez.

Es importante resaltar que dichas aplicaciones son realizadas con una Aleación con Memoria de Forma [AMF] que tiene temperaturas de transformación altas, que con el dispositivo diseñado pueden alcanzarse a temperatura ambiente.

Abstract

This research, design, construction and implementation of an intelligent control system focuses on the design >solar actuator or solar thermoactuator <; consists in a spring powered by a Nickel-Titanium [Ni-Ti], which has the shape memory effect.

The spring, when receiving a temperature increase by solar radiation, it contracts, creating a tension force pulling a piston to produce a displacement, which is transmitted to the shaft as other mechanical device movement.

Its use is proposed as a mechanism for joint movement in solar tracking systems, allowing a photovoltaic panel to track the sun during the day, improving performance energy catchment.

Another alternative implementation is its implementation as opening and closing device in a louvered window to ventilate the interior of a building passively, reducing dependency on artificial air conditioning. Both applications, eliminate the need for electromechanical systems, because spring function as Ni-Ti> sensor and actuator, both.

Importantly, these applications are made with Shape Memory Alloys [AMF] that have high processing temperatures, the device designed can be achieved at room temperature.

Introducción

Hoy en día, la rápida evolución tecnológica en sus diversos ámbitos, no aparta a la arquitectura de integrar en los edificios, sistemas de automatización, con el fin de mejorar el confort de sus ocupantes, proporcionar seguridad y complementariamente un ahorro en el consumo de energía. En definitiva para que los instaladores, proyectistas, y arquitectos puedan utilizar estos nuevos dispositivos, sin tener conocimiento especializado sobre su funcionamiento, se está ante el reto tecnológico de lograr el desarrollo de componentes que resulten fáciles de instalar, mantener, y de costos accesibles.

Actualmente el conjunto de tecnologías aplicadas al control y la automatización, suelen estar integrados, por interfaces de hardware, redes de comunicación y electrónicas avanzadas. Dentro de ellos sobresalen los sensores que recogen y envían información a un sistema control que ordena ejecutar la acción deseada efectuada por actuadores [por ejemplo, el encendido/apagado o apertura/cierre de electroválvulas]. La inconveniencia de estos sistemas es que generalmente, requieren complicadas redes de cableado e instalación de equipos adicionales como motores que demandan gastos de energía.

Esta situación obliga al arquitecto de hoy en día a tomar el rol de investigador y a ser participe con las diversas disciplinas de la Arquitectura, Ingeniería Civil, Electrónica y Mecánica, en buscar la manera de simplificar el diseño de estos sistemas de control. En este sentido las aleaciones metálicas de Ni-Ti, pueden dar una respuesta eficaz a estas exigencias, por su ventaja, de poder ser utilizados como sensores y actuadores, por los efectos que caracterizan a las AMF. Su aplicación en este campo muestra posibilidades prometedoras a mejorar las tecnologías de control domótico, permite prescindir del uso de los controladores electromecánicos.

Por tal razón en el presente trabajo se tuvo como objetivo, el desarrollo de un accionador solar, que aprovecha el efecto termomecánico de una AMF; debido a que este material es capaz de transformar la energía térmica en energía mecánica. Dicho material fue utilizado, para dotar de movimiento a un seguidor solar y para abrir y/o cerrar de manera automática las ventilas de una ventana tipo persiana al variar la temperatura del ambiente.

Por tanto la hipótesis planteada es, utilizando una AMF tipo resorte con temperaturas de transformación altas, es posible desarrollar un dispositivo que pueda convertir la energía proveniente del sol en energía mecánica estando a temperatura ambiente. Esto permitirá

demostrar que las AMF pueden remplazar el uso de controles electrónicos en dispositivos de seguimiento solar y persianas inteligentes.

El proceso de investigación está estructurado en cuatro apartados, organizados bajo el siguiente capitulado:

Capítulo 1. Se estudian los antecedentes teóricos, propiedades, generalidades, y características del comportamiento termomecánico de las AMF, con el fin de demostrar la no existencia de un sistema semejante, se hace un estudio de algunas aplicaciones consideradas análogas, en las cuales se ha utilizado AMF; *Capítulo 2.* Se efectúa un análisis sobre generalidades, principios de funcionamiento, y tipos de sistemas de seguimiento solar, se presentan analogías de los desarrollos más recientes de las tecnologías que tienen relación a este tema; *Capítulo 3.*-Contempla la etapa experimental, se presentan diversas pruebas [termografía, luz concentrada, medición de temperaturas con cámara de infrarrojos] para determinar las temperaturas de transformación martensítica del resorte de Ni-Ti, así como su comportamiento mecánico. Se hace una evaluación del dispositivo central de los dos sistemas propuestos en el presente estudio. Demostrando su funcionamiento utilizando únicamente energía solar como fuente de calor. *Capítulo 4.*-Se presenta el proceso y construcción del accionador, así como los prototipos de un seguidor solar y una ventana tipo persiana >ventana inteligente<. Adicionalmente se presentan propuestas de aplicación de ambos dispositivos en un espacio arquitectónico.

Finalmente en los anexos se muestra un análisis de costo y factibilidad económica, ficha técnica del accionador y un preámbulo de divulgación efectuado durante el proceso de investigación.

Es importante mencionar que para desarrollar la fase experimental y construcción del accionador, se contó con la participación y apoyo técnico/económico de dos Centros de Investigación: El laboratorio de Mecánica Aplicada del Centro Tecnológico de la Facultad de Estudios Superiores Aragón -FES Aragón- y el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas -CENIM- ubicada en Madrid, España.

Capítulo I.- Aleaciones con Memoria de Forma

Generalidades de las Aleaciones con Memoria de Forma [AMF]

El efecto memoria de forma, es la capacidad que presentan ciertos materiales de recuperar su forma original, después de haber sido deformados aparentemente de manera plástica, este efecto se debe a una transformación martensítica del tipo termoelástica. Dicha transformación puede ser inducida por la aplicación de esfuerzos, variación en su temperatura o combinación de ambos. Durante la transformación el material pasa de una fase de tipo martensítica de baja temperatura y baja rigidez [permite deformar el material fácilmente], a una de alta temperatura denominada Austenita [fase en la que el material recupera la forma, y dimensiones originales, al ser calentado por encima de su temperatura de transformación].

La transformación martensítica es un cambio de fase de primer orden en el estado sólido, no involucra cambio de composición y se produce por medio de un movimiento cooperativo de átomos. Ocurre por una deformación homogénea de la red cristalina, donde los átomos se desplazan a distancias menores a las interatómicas. Este movimiento cooperativo produce un cambio de forma macroscópico, dando como resultado una nueva fase llamada martensita, esto no indica que los desplazamientos sean simultáneos sino que la transformación se propaga (Espinoza, 2007, pág. 1).

En la **figura 1** se muestra el efecto memoria de forma simple en un resorte de Ni-Ti.

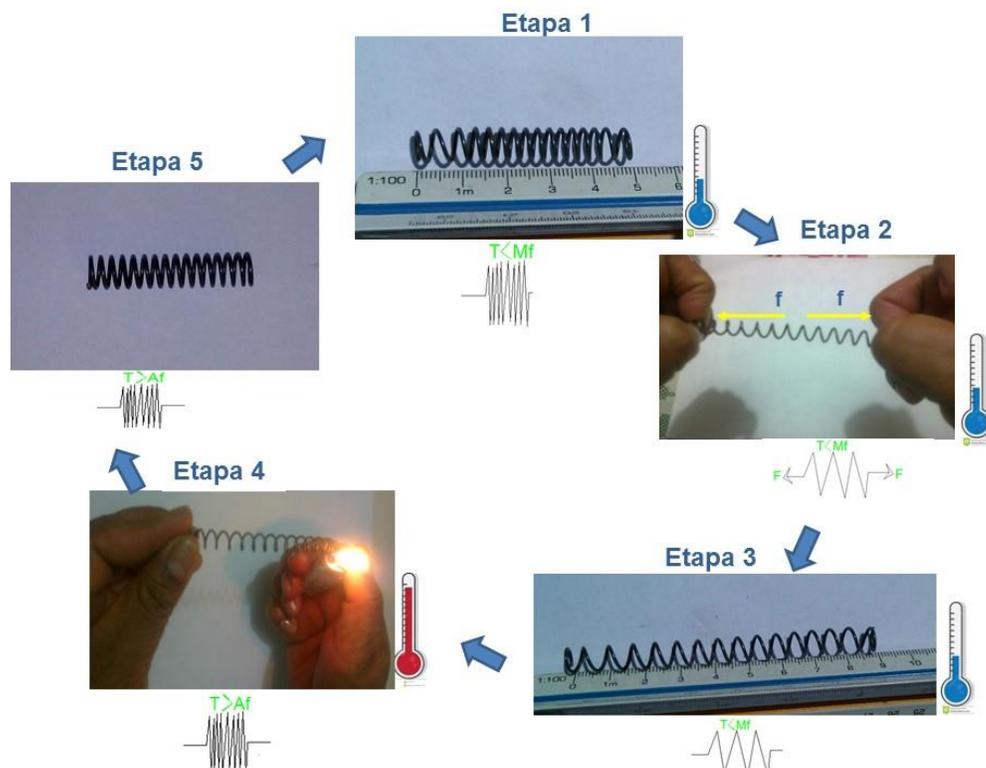


Figura 1.-Representación cíclica del efecto memoria de forma observado en un resorte con AMF.

Como puede observarse en la figura anterior el material a temperatura ambiente [$T_{amb} < M_f$] se encuentra en fase martensítica, teniendo su configuración original [etapa 1]. Al aplicarle una fuerza al resorte este presenta una deformación que es aparentemente plástica [etapa 2 y 3], es importante resaltar que esta deformación es a temperatura constante, es decir se continua a temperatura ambiente. La formación de la fase austenítica comienza a medida que el proceso de calentamiento alcanza la temperatura A_s [etapa 4] y la deformación en el material se recupera por completo cuando se llega a la temperatura A_f [$T > A_f$], paso 5. Finalmente el ciclo termina cuando el resorte pasa de una temperatura A_f a M_f dejando el resorte a temperatura ambiente [paso 5 a 1], en esta transición actúa lo que se conoce como variantes autoacomodantes lo que permite no tener una deformación macroscópica observable al cambiar de fase [Austenita a Martensita]. Es importante resaltar que estas aleaciones también presentan otros efectos como: el superelástico y doble efecto memoria de forma los cuales no se mencionan a detalle debido a que no son utilizados en el presente estudio.

Como puede observarse los efectos de las AMF, son caracterizados por la presencia de cuatro temperaturas, representan el inicio, y fin del cambio de fase martensita a austenita y viceversa.

As- Temperatura de transformación austenita inicial o austenite start

Af- Temperatura de transformación austenita final o austenite finish

Ms- Temperatura de transformación martensítica inicial o martensite start

Mf- Temperatura de transformación martensítica final o martensite finish

Estas temperaturas varían en función del tipo de aleación y el porcentaje de los componentes que este contenga, generalmente se busca que la temperatura A_f sea lo más bajo posible, con el objeto de que el material requiera la menor cantidad de energía posible para lograr la transformación a A_s . Sin embargo debido a que estas aleaciones son de importación su adquisición es tardada y en general los proveedores tienen materiales con temperaturas de transformación limitadas.

Estas temperaturas se mantienen fijas si el material no está sometido a un esfuerzo previo. En caso contrario dichas temperaturas incrementan dependiendo del esfuerzo que le sea aplicado al material originalmente. Esto es de vital importancia para el diseño de muchas aplicaciones de las AMF, debido a que en ellas hay una fuerza aplicada de inicio en el

material. En la **figura 2** se muestra dicho cambio. Frecuentemente durante el funcionamiento de algunos dispositivos que utilizan estas aleaciones existen fuerzas, constantes o variables, que actúan durante todo el ciclo de trabajo. Cuando esto sucede se le denomina “**efecto memoria de forma asistido**”.

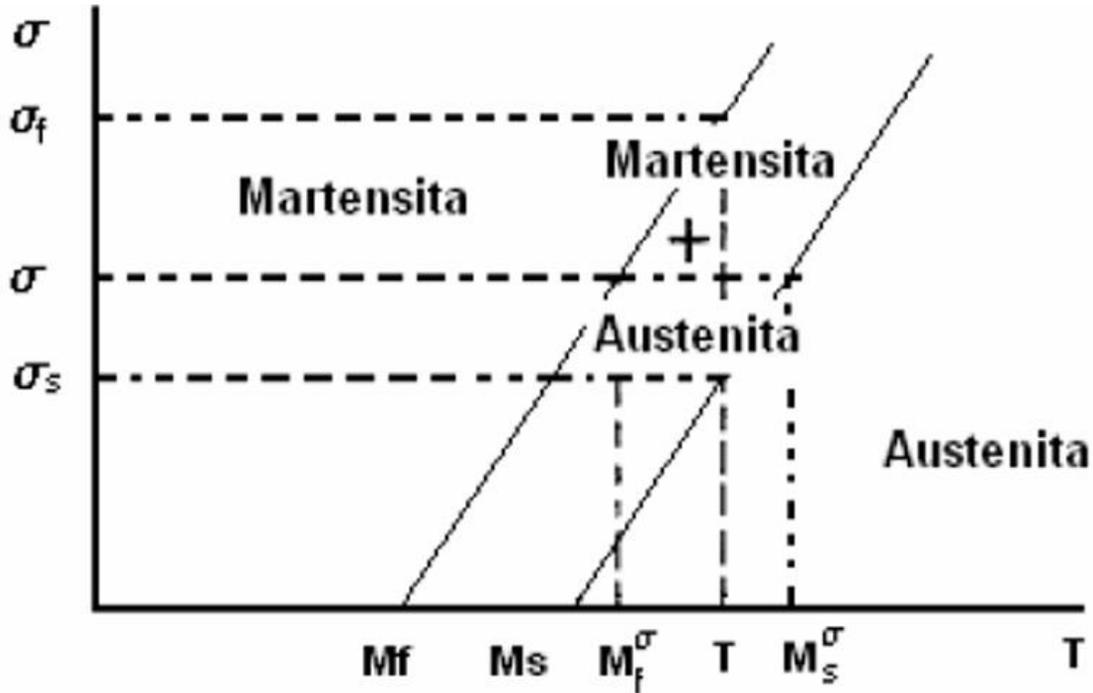


Figura 2.-Diagrama Esfuerzo-Temperatura. Transformación típica de un material con memoria de forma. Fuente: Esquema recuperado de (Cortés, 2007, pág. 120), Modelación matemática de la transformación martensítica inducida por esfuerzo.

Por otro lado las AMF son capaces de tener deformaciones de hasta 100 veces más que la que experimentan los materiales convencionales, como el acero, Al, Cu, etc. Dado que las AMF responden a la capacidad de funcionar como sensores y actuadores a la vez, han sido catalogados como materiales inteligentes. Existen diversos materiales y aleaciones que presentan memoria de forma, en la **Tabla 1** se enlistan algunas de las principales, en dicha tabla se hace una comparativa del rango de temperaturas de transformación, y su composición química. Es de vital importancia, saber a qué temperatura presenta su cambio de fase, de acuerdo, a la aplicación para la que se requiera utilizar.

Tabla 1.- Composición química y propiedades de algunas aleaciones con efecto de memoria de forma. Fuente: Recuperado de (Flor, 2005, pág. 38), Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma.

<i>Aleación</i>	<i>composición</i>	<i>Rango de temperaturas (°C)</i>
Ag-Cd	44/49 at %Cd	-190 a -50
Au-Cd	46,5/50 at % Cd	30 a 100
Cu-Al-Ni	14/14,5 at %Al; 3/4,5 wt% Ni	-140 a 100
Cu-Sn	15 at % Sn	-120 a 30
Cu-Zn	38,5/41,5 wt % Zn	-180 a -10
In-Ti	18/23 at % Ti	60 a 100
Ni-Al	36/38 at % Ti	-180 a 100
Ni-Ti	49/51 at % Ni	-50 a 110
Fe-Pt	25 at % Pt	-130
Mn-Cu	5/35 at % Cu	-250 a 180
Fe-Mn-Si	32 wt%Mn; 6 wt% Si	-200 a 150

La transformación martensítica desde el punto de vista atómico

Generalmente existen dos tipos de transformaciones: *Difusión*, es aquella en la que se forma una nueva fase moviendo átomos aleatoriamente a distancias relativamente grandes, y presenta cambio en la composición química, pasa de sólido a líquido, líquido a gaseoso y sólido a gaseoso; *Displasiva*, no se requieren un amplio rango de movimientos, los átomos se reordenan en estado sólido, para llegar a una estructura más estable, sin cambiar la naturaleza química de la estructura atómica (Flor, 2005, pág. 15).

En el caso de las AMF la transformación que presentan es de tipo displasiva, debido a que los átomos sufren un desplazamiento a muy corta distancia [menor al parámetro de red], lo que genera que haya un movimiento de los planos atómicos para formar una estructura de tipo cristalina, de una manera ordenada, con patrones de repetición que se extienden en tres dimensiones del espacio. Un ejemplo característico de la estructura cristalina, se hace presente en las AMF de Ni-Ti, corresponde a una estructura cúbica centrada en el cuerpo, donde los átomos de Ni ocupan el centro de la red, mientras que los átomos de Ti están alrededor. En dicha transformación no existen fases intermedias, sino que la transformación ocurre de manera directa, a una velocidad que es muy cercana a la velocidad del sonido (Lechuga, 2011, págs. 9-10), durante la fase martensita >Figura 3-a< hay un desplazamiento de los átomos, manteniendo generalmente una estructura: ortorrómbica, monoclinica, triclinica, entre otras. En la fase austenita >Figura 3-b< se mantienen alineados los átomos en una red tridimensional simétrica.

La progresión hacia la transformación martensítica se reproduce a medida que ocurre la transición de fase, cada capa de átomos se desplaza coordinadamente a una distancia muy pequeña, presentando un mecanismo de auto acomodo reversible llamado formación de variantes autoacomodantes. Las variantes de martensita que aparecen en el material se orientan de tal manera que se compensa la deformación causada por la variante que se orientó en dirección opuesta (Ríos, 2013, pág. 4).

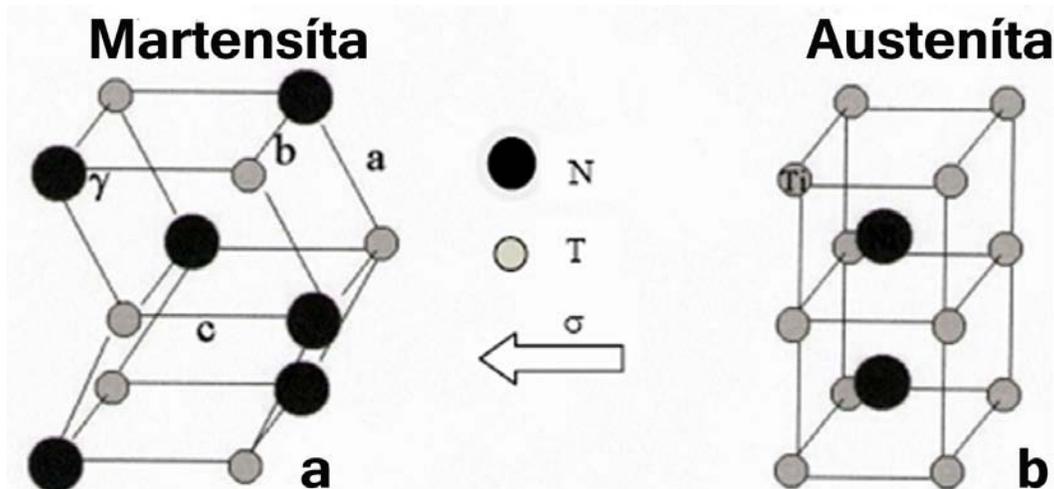


Figura 3.-Representación esquemática del auto acomodo de las estructuras cristalinas de una AMF al presentarse el cambio de fase. En la fase martensita γ se observa un desalineamiento de los átomos, mientras que en la fase austenita β existe un orden y simetría. Fuente: Imagen recuperada de (González, 2013), Estructura y propiedades de fatiga del titanio y sus aleaciones usadas como biomateriales.

Anisotropía de las AMF

Una de las principales limitantes al diseñar dispositivos que aprovechen los efectos de memoria de forma, es su anisotropía mecánica, definida como el cambio en las propiedades según su orientación. Por ejemplo, se ha reportado una variación en el módulo de elasticidad entre 17 y 70 GPa en aleaciones de Cu-Al-Ni (Cortés, 2007). Es sabido que se presenta anisotropía en materiales comunes como el caso de la madera. En la **Figura 4** se muestra de manera simplificada la anisotropía presentada en un aglomerado de madera; cuando es tomada en sentido longitudinal a las fibras y se ejerce un esfuerzo de tracción desde los extremos, es difícil romperla **figura 4-a**, por el contrario, si se hace en el sentido de las fibras resultará más fácil quebrarla **figura 4-b**. Por tanto la madera es más resistente en sentido longitudinal a las fibras, que en el sentido transversal.

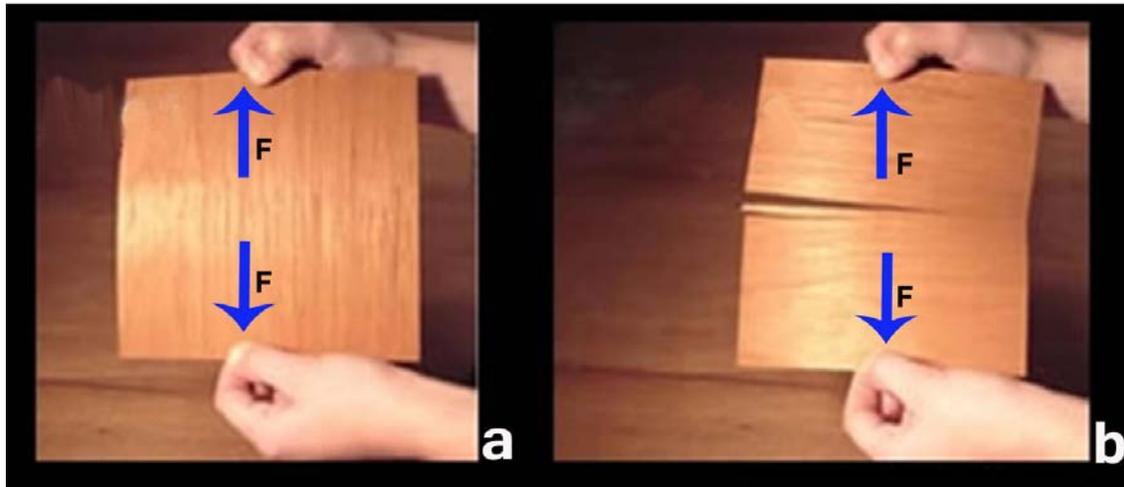


Figura 4.-Anisotropía en la madera. Es claro ver como el material tiene mayor resistencia en el sentido de sus fibras al aplicar una fuerza de tensión.

NiTiNOL, aleación con efecto de memoria de forma

En los últimos años, se han descubierto muchos materiales que presentan el efecto de memoria de forma, sin embargo son pocas las que han logrado posicionarse en el mercado. Hoy en día, las aleaciones más comerciales son las de Ni-Ti >NiTiNOL< y las bases Cu, siendo estrictos únicamente las de Ni-Ti. El nombre NiTiNOL, es un acrónimo de Níquel, Titanio y Naval Ordnance Laboratory, lugar donde fue descubierto por William Beuhler en la década de 1960, aunque, la posibilidad de crear aleaciones con memoria de forma [SMA's, por sus siglas en inglés], se conocía desde 1932 (Yarzabal, 2014). Lo novedoso de esta aleación respecto a otras AMF es que tienen buenas propiedades mecánicas, destacando, la ductilidad y estabilidad térmica. Dicha aleación, soporta deformaciones de alrededor del 8 al 10%, mientras que las de base Cu solo alcanzan el 4.5%, son térmicamente más estables, tienen un mayor rango de temperaturas de transformación, y son relativamente bajas, entre -100 a 100°C, presentan mayor resistencia a la corrosión en comparación con el Cu, tienen un ancho de histéresis, entre 25 y 40°C, y no tiene efectos tóxicos para el ser humano (Flor, 2005, págs. 36-40).

En algunos casos, el NiTiNOL sustituye algunas aplicaciones en las que se ha utilizado tradicionalmente el acero inoxidable, aprovechando sus efectos de memoria de forma o súperelasticidad. En la **Tabla 2** se equiparan las propiedades del NiTiNOL con respecto al acero inoxidable. La relación entre la proporción de composición de Ni y Ti es de

un 55 y 45% respectivamente, aunque parecen proporciones muy similares, una mínima variación tiene un efecto dramático en la temperatura de transformación. Esta aleación presenta una temperatura Af más baja que otros materiales, por tanto es la que requiere menos energía para llevar a cabo la transformación, razón que la hace estar dentro de las más utilizadas.

Tabla 2.-Comparación de la aleación Ni-Ti con un acero inoxidable. >A< se refiere a Austenita, >M< a la martensita; >f.a< es el término utilizado para fully annealed [totalmente recocido] y >w.h< indica work hardene o trabajado en frío. Fuente: Recuperado de (Flor, 2005, pág. 39), Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma.

<i>Propiedad</i>	<i>NiTi SMA</i>	<i>Acero inoxidable</i>
Deformación recuperable(%)	8	2
Módulo de elasticidad (MPa)	8,7*10 ⁴ (A); 1,4*10 ⁴ (M)	2.07*10 ⁵
Resistencia a la cedencia (MPa)	200-700 (A); 70-140 (M)	248-517
Resistencia última a tracción (MPa)	900 (f.a.); 2000 (w.h)	448-827
Elongación a rotura (%)	24-50 (f.a.); 5-10 (w.h)	20
Resistencia a la corrosión	Excelente	Muy Buena

Desde su descubrimiento, el NiTiNOL ha ido ganando terreno en aplicaciones, su introducción en el mercado fue muy lenta debido a los problemas de fabricación, su elevado precio y no disponer de un *marketing* adecuado, tras solucionarse estos problemas, comenzó a utilizarse cada vez en más, tiene aplicaciones, en el mundo de los actuadores debido a numerosas ventajas, tales como; simplicidad mecánica [usan la fuerza de contracción y tracción, puede ser accionada directamente por una corriente eléctrica], suelen ser utilizados como actuadores de accionamiento directo, sin requerir sistemas de amplificación o reducción de movimiento, como engranajes, por lo que su mantenimiento es sencillo (AdDat, 2013). Estas aleaciones suelen comercializarse en forma de resortes, laminas, placas, hilos, cables denominados músculos artificiales [se contraen al llegarles una señal eléctrica, al igual que se contrae un músculo humano al recibir una señal nerviosa].

Aplicaciones de las AMF

Motores con memoria de forma

Son dispositivos capaces de convertir la energía térmica de bajo grado en energía mecánica, una de las aplicaciones, es ser utilizados para la generación de energía eléctrica. En su diseño, se utilizan principalmente alambres o resortes con memoria de forma, son sujetadas a un sistema de poleas o manivelas que se desplazan cuando las AMF son sometidos a un ciclo de enfriamiento y calentamiento, con ello se logra que se estiren y contraigan una y otra vez, de esta forma se genera el movimiento. El movimiento en un motor térmico con AMF se obtiene con la recuperación de la deformación del elemento; de acuerdo a su principio de funcionamiento, se pueden clasificar en motores con manivela, de poleas, de campo, alternativos y secuenciales (Ríos, 2013, págs. 27-44). La **Figura 5** muestra un motor térmico que se fundamenta en el trabajo del Dr. Alfred Johnson, utiliza un resorte de Ni-Ti que es accionado por agua fría y caliente, el resorte realiza el trabajo cuando pasa de un contenedor con agua fría, a uno con agua caliente a una temperatura de alrededor de 45 a 90°C, esto genera que el resorte vuelva a su forma de alta temperatura, con una fuerza capaz de conducir las poleas y así crear movimiento (Images, 2015).

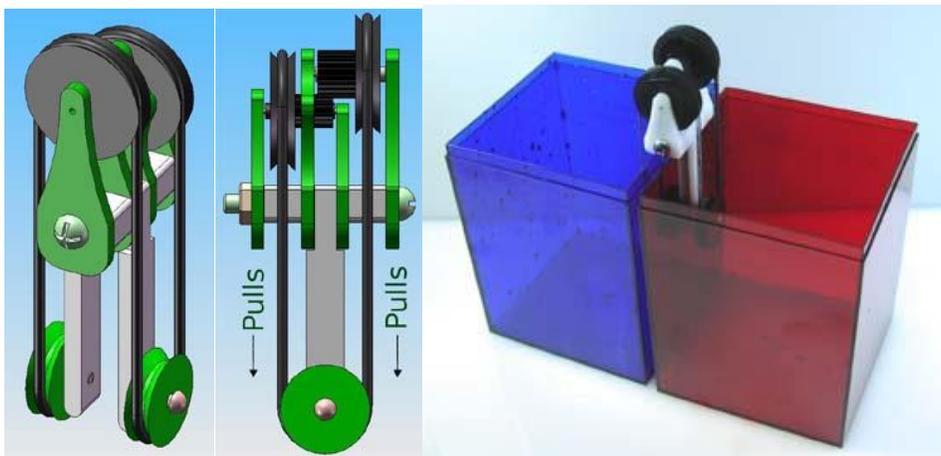


Figura 5.-Motor con poleas sincronizadas, está fabricado con alambre de Ni-Ti. Fuente: Imágenes recuperadas de (Images, 2015), Motor térmico de NI-Ti accionado por agua fría y caliente.

Entre los avances más significativos de estos motores, ha sido desarrollado por la compañía General Motors, consiste en un motor que utiliza una aleación de Al con efecto de memoria de forma. Con este desarrollo se busca generar la recuperación de la energía de

desecho en los escapes de los vehículos, para ser almacenada en baterías de un híbrido y así aumentar su rendimiento en cuanto a consumo de energía. Otra ventaja que se prevé, sería reemplazar el alternador en los vehículos convencionales o hacerlo más pequeño. El esquema de la **Figura 6** muestra a manera de esquema el automóvil prototipo.

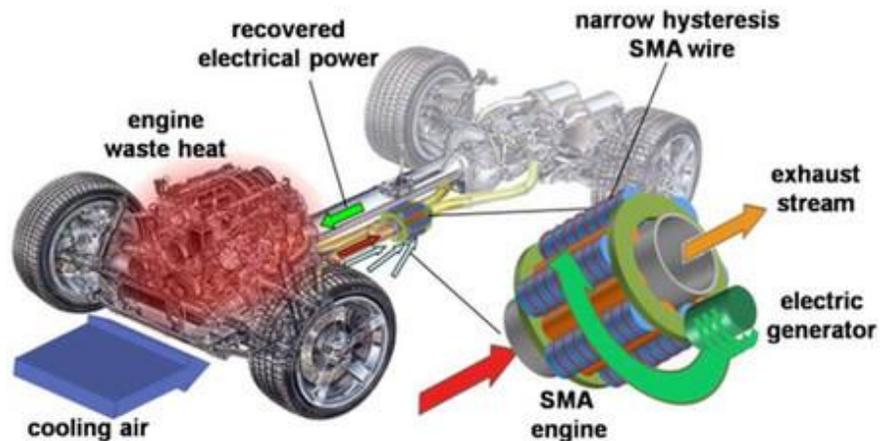


Figura 6.-Vehículo desarrollado con motor utilizando AMF. Fuente: Imagen recuperada de (Motorpasión, 2009), GM investiga cómo sacar energía del calor de escape.

Control de posicionamiento utilizando un material con memoria de forma

El sistema de control de posicionamiento es un control ON-OFF, utiliza hilos de Ni-Ti, estos filamentos en su fase martensítica están contraídos manteniendo una posición definida, cuando se le suministra corriente eléctrica de forma regulada, se lleva el hilo hasta una posición deseada. Cuando el control detecta que se pierde la posición, vuelve a activar una corriente con una frecuencia constante, que es generado por un regulador de corriente. El sistema utiliza una mesa de pruebas de Arquimea >**Figura 7-a**< equipado con múltiples sensores para efectuar los estudios de histéresis de los hilos de AMF, mismo que es capaz de medir deformaciones, temperaturas, resistencias, y fuerzas en el material por calentamiento. En el tablero de pruebas están montados los hilos con elementos de sujeción [crimps], se mantienen conectadas a un sensor basado en el movimiento de un sistema de poleas, que giran en un sentido o en otro según se contraiga o alargue el alambre. El sistema incluye un programa realizado en Labview y Matlab que procesa en tiempo real el informe de la prueba, y crea ambientes de simulación (Hernández, 2011). La **Figura 7-b**, esquematiza el sistema de control, las flechas negras indican el flujo de información y acciones que los procesos realizan

antes de pasar a controlar los hilos de Ni-Ti, las flechas rojas indican el flujo y acciones mientras se controla la AMF.

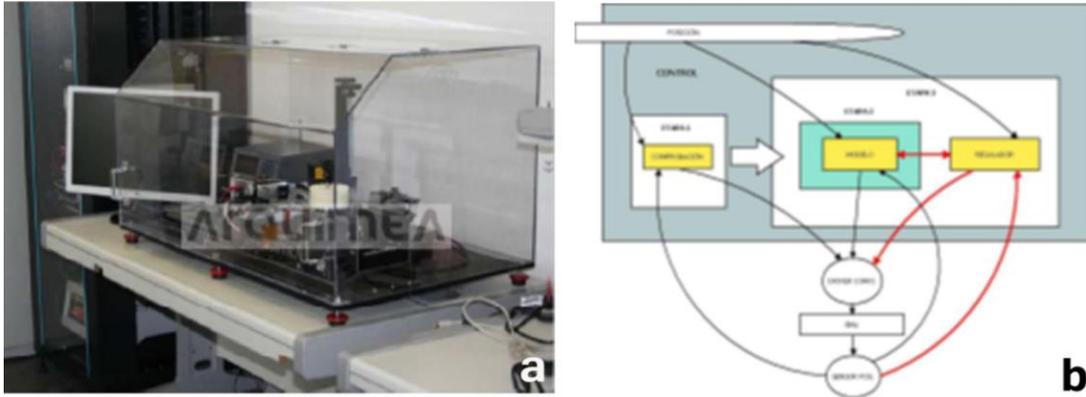


Figura 7.-a) Mesa de pruebas Arquimea; b) Esquema del sistema de control de posicionamiento con AMF. Fuente: Imágenes recuperadas de (Hernández, 2011), Control de posición de un material con memoria de forma.

Las pruebas realizadas al modelo, determinaron que servirá para implementarlo como un mecanismo de control, que las AMF pueden seguir la posición con una frecuencia baja de pulso eléctrico, en el caso de frecuencias altas, le resulta imposible. El comportamiento de los pulsos, no se ha podido estudiar en profundidad por la escasez de pruebas. Los puntos a destacar son:

- A variaciones lentas, se puede mantener sin problema la posición.
- A variaciones rápidas no es posible seguir la posición, se crea un desfase entre la posición real y deseada, sin conseguir la amplitud máxima ni mínima de la posición.
- Mediante los pulsos de corriente se consigue mantener la posición del hilo dentro de un margen de error, que depende de la contracción del material. Cuando el material es más sensible a los cambios el error aumenta.
- Como realimentación se utiliza un sensor que ubica la posición de los hilos. Si se quiere emplear dicho control en aplicaciones de dispositivos pequeños, habrá que buscar otro tipo de variable para la retroalimentación.
- La realización de este proyecto, ha abierto el camino hacia otro tipo de controles, se comenzó con la idea de realizar un control inteligente, sin embargo se concluyó fabricando un dispositivo de control ON-OFF.

Modelo de ingeniería EO-1 [LFSA] para montaje de panel solar ligero

Un caso muy particular sobre aplicación de las AMF, es el desarrollo de una bisagra y un sistema de despliegue de panel solar flexible, el EO-1 [LFSA], desarrollado por la NASA. El dispositivo pretende ser integrado a las naves espaciales o satélites que son lanzados al espacio, este elemento permite que los paneles solares y antenas de comunicación, se plieguen de manera automática, una vez que se haya llegado a orbita u otro destino extraterrestre. El sistema se reacomoda a su posición original por ser sensible a los cambios de temperatura, vibración y/o choque. El mecanismo se compone de una bisagra, un par de tiras delgadas de alambres de nicromo [aleación Ni-Cr] flexible con efecto de memoria de forma, hacen la función de un resorte amortiguador. Los alambres de AMF fueron configurados de manera, que se puedan mantener desplegados los paneles cuando la temperatura esté por debajo de los 70°C o por debajo de la M_f . Al aplicar energía eléctrica, las tiras de AMF se transforman en el estado austenítico, haciendo que se despliegue la bisagra. Una vez que se vuelven a enfriar las tiras de AMF, se transforman en la fase martensítica, debido a que el material es más suave y recobra la forma de estado inicial, el uso de la sección geométrica en la configuración desplegada permite que la bisagra con AMF haga girar el panel solar como se muestra en la **Figura 8**. Dicho dispositivo fue probado en el satélite LFSA- EO-1 de la NASA (Yakamaushi K et al, 2011, págs. 134-135).

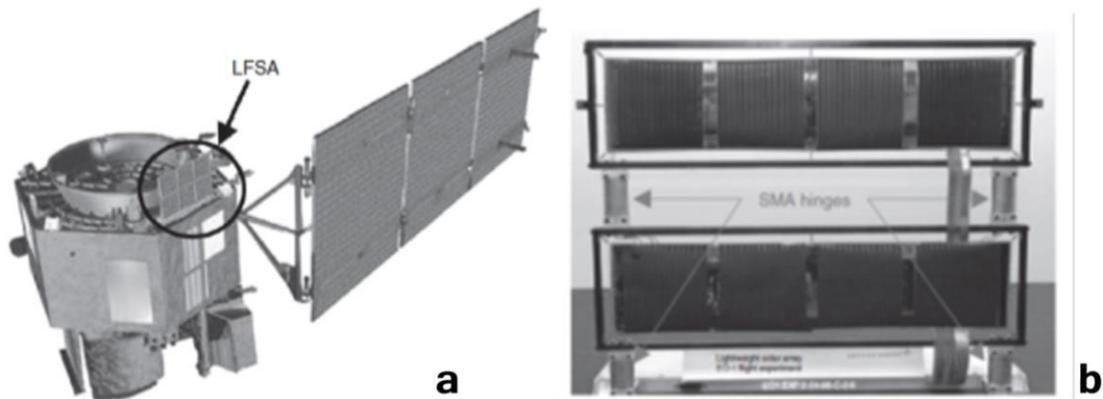


Figura 8.-a) Satélite EO-1; b) Panel solar flexible, LFSA Fuente: Imágenes recuperadas de (Yakamaushi K et al, 2011), *Shape memory and superelastic alloys. Technologies and applications*.

Persiana inteligente utilizando AMF como sistema de apertura y cierre

La llamada persiana inteligente, es una ventana que fue diseñada para realizar la apertura y cierre automático de un sistema de ventilas, cuando la temperatura del ambiente alcance ciertos valores críticos. Es accionado por laminillas de Cobre-Aluminio-Berilio [Cu-Al-Be], las cuales poseen la propiedad de memoria de forma, trabajan como sensor y actuador sin necesidad de emplear componentes electrónicos; en su diseño, se utilizó un marco de aluminio de 1½ in, su dimensión es de 30 x 30 cm, cumple la función de sostener y mantener las persianas. En el mecanismo de giro de los vidrios se utilizaron los componentes de una persiana convencional y engranes. Consta de un par de soportes de persianas, tres pares de porta persianas, dos guías, tres vidrios rectangulares de 26 cm de largo, por 10 cm de ancho y 6 mm de espesor, su masa total es de aproximadamente 368.77gr. En la **Figura 9** se presenta la ventana prototipo.

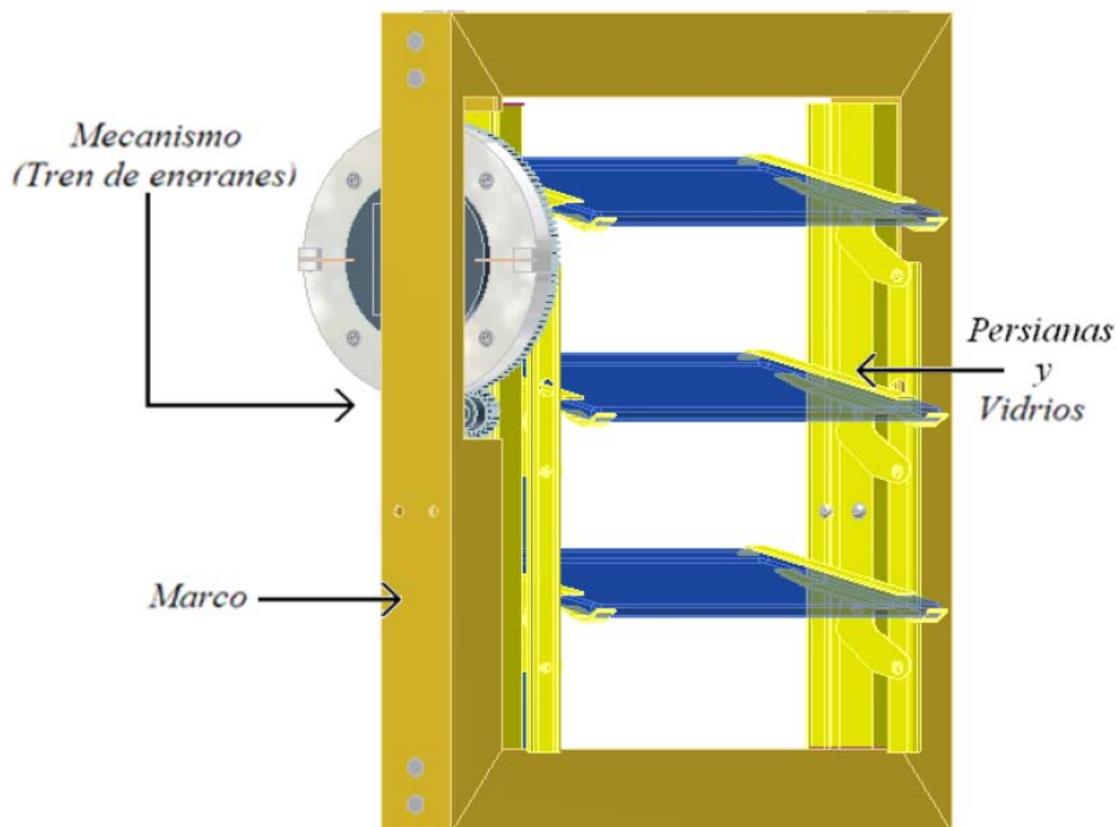


Figura 9.- Esquema general de la persiana. Fuente: Imagen recuperada de (García, 2009, pág. 50), Diseño de persianas inteligentes a partir del comportamiento termo mecánico de los materiales con memoria de forma.

El mecanismo de giro de los vidrios, consiste en un eje de rodamiento mediante engranajes que transmiten el movimiento y generan la flexión de las cuatro placas de Cu-Al-Be, un arreglo de viga en cantiléver sujeta la carga en su extremo libre, con lo que se pretendió generar la apertura y/o cierre de los vidrios de manera automática al variar la temperatura del ambiente.

El accionamiento de las persianas funciona de la siguiente manera; el peso de los vidrios genera una fuerza sobre el eje de rotación y al engrane de transferencia [piñón], que lo trasmite a un engrane mayor, acoplado al eje de empotramiento que se sostiene a la carcasa y que transmite el componente peso a las placas de Cu-Al-Be y ocasionar una deflexión en ellas. En la **Figura 10** se muestra el mecanismo de apertura [en vista frontal y lateral].

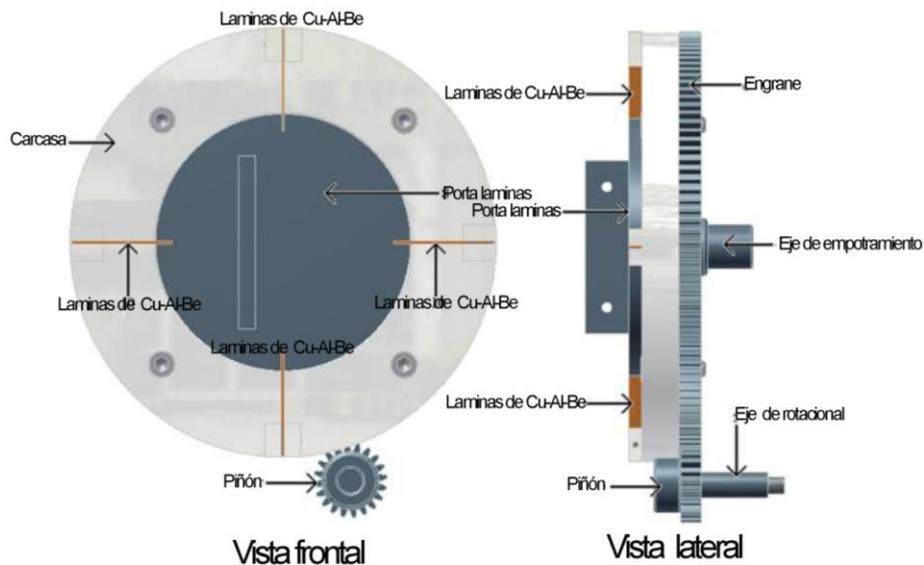


Figura 10.-Esquema del mecanismo de transmisión de fuerza. Fuente: Imagen recuperada de (García, 2009, pág. 51), Diseño de persianas inteligentes a partir del comportamiento termo mecánico de los materiales con memoria de forma.

La apertura y/o cierre de los vidrios se logra al enfriar y/o calentar las laminillas de Cu-Al-Be; cuando la temperatura del ambiente se encuentra por debajo de la temperatura M_s , las láminas se encuentra en fase martensítica y el desplazamiento debido a la carga es suficiente para mantener cerradas las persianas >Figura 11-a<. Al incrementar la temperatura por encima de la A_f las láminas sufren una deformación, quedando completamente alineados, dando como resultado la transformación austenítica; esta tensión

en las placas genera una fuerza de desplazamiento que hace girar el eje de rodamiento y los engranes para activar el mecanismo de apertura de las ventilas >Figura 11<.

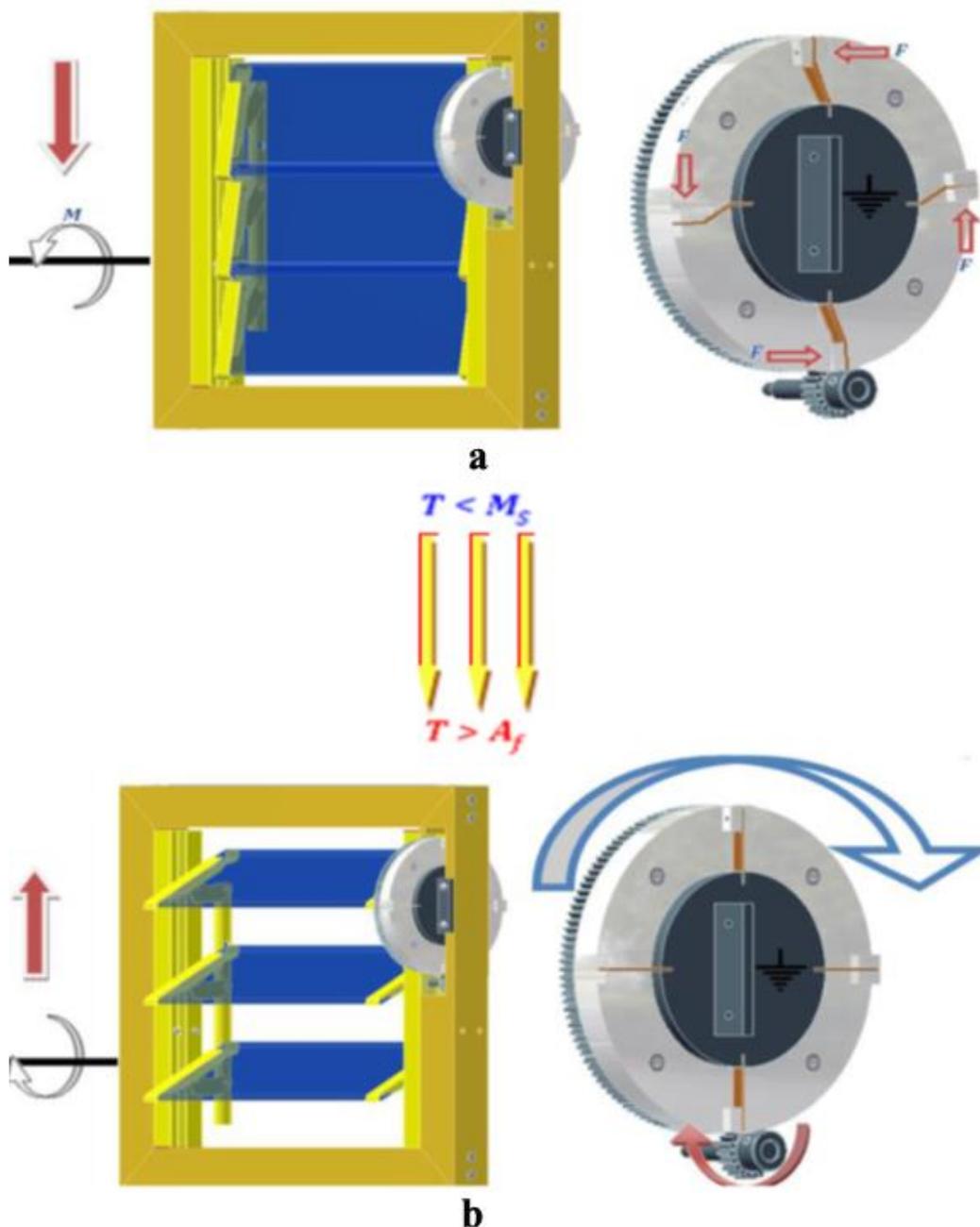


Figura 11.-Esquema de funcionamiento de la persiana; **a)** Los vidrios se mantienen cerradas durante la fase martensita. **b)** Los vidrios se mantienen abiertos en la fase austenita. Fuente: Imágenes recuperadas de (García, 2009, pág. 54), Diseño de persianas inteligentes a partir del comportamiento termo mecánico de los materiales con memoria de forma.

La configuración que se propuso para las placas de Cu-Al-Be, es un arreglo tipo viga cantiléver que sujeta una carga a flexión en su extremo libre, mismo que es presentado en la **Figura 12**. El esfuerzo máximo aplicado a las láminas es menor a 1019.71 kg/cm^2 , ya que el esfuerzo de cedencia del material en fase martensítica es de ese orden. Cabe mencionar que la magnitud de la carga aplicada sobre las láminas no es constante, varía con la posición de los vidrios. Durante el calentamiento de las láminas se inicia la apertura de los vidrios, representa una carga mínima que incrementa conforme progresa la apertura (García, 2009).

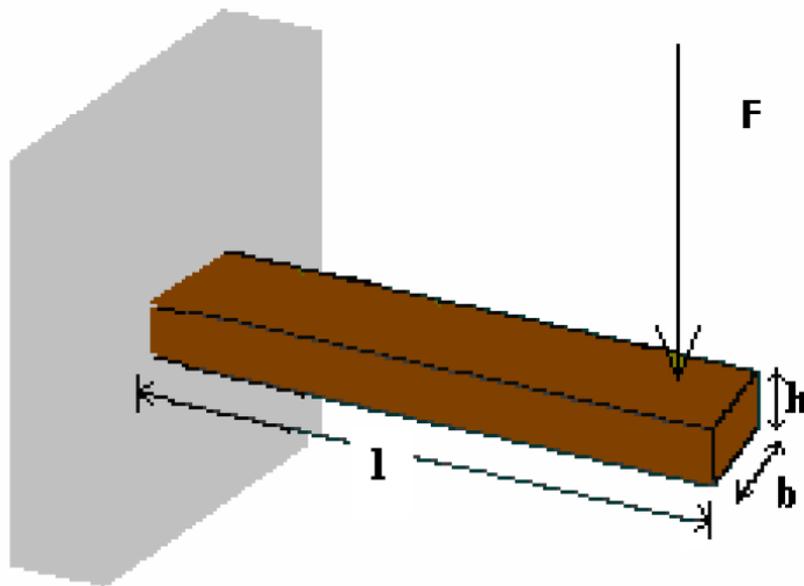


Figura 12.-Arreglo en cantiléver de las láminas de Cu-Al-Be. Fuente: Imagen recuperada de (García, 2009, pág. 52), Diseño de persianas inteligentes a partir del comportamiento termo mecánico de los materiales con memoria de forma.

Como se ha destacado, esta ventana pretendía responder a las condiciones ambientales del medio, abrir y cerrar ante la variación de la temperatura, pero debido, a que las laminillas de Cu-Al-Be alcanzan la temperatura A_f por encima de la temperatura del medio ambiente [arriba de 120°C], generó que el desarrollo quedara solo en etapa demostrativa. Para activar el mecanismo de giro se calientan estas laminillas, utilizando una fuente de calor [pistola de aire caliente] a más de 100°C hasta alcanzar la temperatura A_s , que provoca su deflexión y la apertura de las ventilas.

Capítulo II.- Sistemas de seguimiento solar

Tecnología solar

El uso de la electricidad ha sido una necesidad desde épocas remotas, sin embargo, cada vez aumenta su consumo. Dicho dependencia, ha desencadenado una crisis energética, por la sobreexplotación de las principales fuentes para su obtención [petróleo, carbón y gas natural]. Además, el empleo este tipo de energéticos es totalmente contrario a los ecosistemas, por ser contaminantes e insostenibles ambientalmente.

Por esta razón es de vital importancia, la sensibilización y concientización, sobre el uso de las energías alternativas. Desde hace mucho tiempo ha existido cierto interés por la energía solar, a principios del siglo anterior empezó a posicionarse con expectativas muy prometedoras. Su uso como alternativa ecológica ha aumentado 20% durante los últimos 15 años; es debido a la amortización de su costo en el mercado y a las mejoras en eficiencia. Actualmente Japón, Alemania, España y los Estados Unidos son los principales mercados de las celdas solares (National Geographic, 2013).

La tecnología solar necesita una expansión de terreno para su aprovechamiento a mayor escala, por eso la importancia en impulsar las investigaciones en este ámbito. Como lo ha publicado el especialista David Bañon >en un minuto nos llega suficiente energía del sol como para abastecer a la tierra durante todo un año<; otro dato importante que refiere es, la radiación que nos llega en tres días es igual a la que nos daría la energía de todos los combustibles fósiles del planeta (Batanga, 2013). La cuestión es, encontrar la manera de aprovechar al máximo esta radiación que llega a la superficie terrestre. Al día se recibe en promedio 1353 W/m^2 (Fernández-Balbuena, 2011, pág. 18).

Generalidades de los sistemas de seguimiento solar

Un seguidor solar es una especie de girasol mecánico, que permite a un panel fotovoltaico seguir la trayectoria del sol durante el día. Al tener una posición perpendicular de la celda con respecto a la incidencia solar, se incrementa la captación de energía (Apac et al, s.f, págs. 1-2). Estos dispositivos utilizan generalmente sistemas mecánicos, circuitos integrados o electrónicos para direccionar y posicionar correctamente los paneles; entre ellos transistores y elementos fotosensibles que detectan la posición del sol. Se conforman básicamente por una estructura en la cual se monta el panel fotovoltaico o cualquier otro dispositivo usado

para captar la radiación solar. Emplean además otro mecanismo acoplado a un motor DC, que permite desplazar la celda fotovoltaica (Magaña et al, 2010, pág. 4). De acuerdo a su variedad y diseño se clasifican en:

Seguidor de un solo eje

Son seguidores que se mueven en una sola dirección, disponen únicamente de un eje de giro dentro de este tipo existen tres clasificaciones en función de la dirección de movimiento:

- *Polar*, giran sobre un eje horizontal en dirección Norte-Sur a lo largo del día. La trayectoria dibujada es siempre un arco de Este a Oeste (José, 2007, pág. 33). Son recomendables para ser utilizadas en latitudes cercanas al ecuador (Guardado, 2012, pág. 14), la **Figura 13-a** representa la trayectoria de un seguidor polar.
- *Horizontales*, gira en base a un eje horizontal en dirección Norte-Sur, el giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre. La trayectoria dibujada es un arco de Este a Oeste perpendicular al plano horizontal, la **Figura 13-b** esquematiza el movimiento.
- *Azimutal*, giran sobre un eje vertical respecto a un plano horizontal, al igual que el de tipo polar; la superficie de los módulos tiene una inclinación igual a la latitud del lugar, esto ayuda a obtener un mejor rendimiento a lo largo del año. Con este sistema los paneles suelen tomar como referencia el eje de rotación de la tierra, giran dibujando un cono alrededor del eje, como se muestra en la **Figura 13-c**. Son recomendables para ser utilizadas en latitudes lejanas al ecuador (Guardado, 2012, pág. 14).

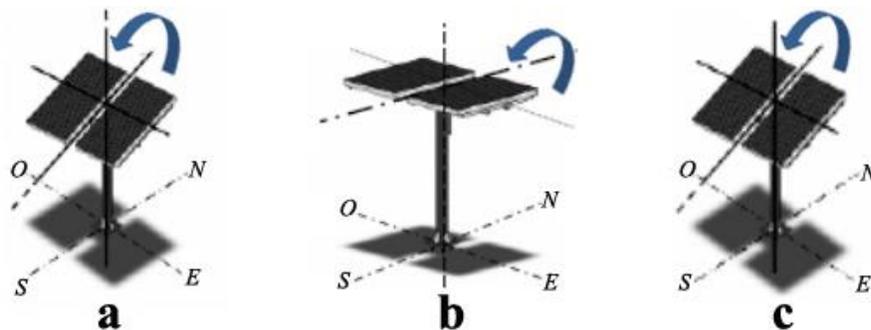


Figura 13.-a) Seguidor solar polar; b) Seguidor solar horizontal; c) Seguidor solar azimutal. Fuente: Imágenes tomadas de (José, 2007, pág. 33), Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos.

Cabe mencionar que estos seguidores de un eje realizan giros de aproximadamente 15° por hora, aunque no siempre alcanzan una orientación precisa, debido a que su movimiento está limitada hacia una sola dirección (Zamudio, 2013, pág. 23).

En las regiones de latitudes intermedias, estos seguidores alcanzan una eficiencia de hasta 41% más de captación de energía. Utilizando un tradicional fijo, la eficiencia es del 28%. Esto confirma que los mecanismos de seguimiento solar, contribuyen a aumentar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos, sobre todo en los días despejados (Koussa et al, 2011, págs. 1-16). La radiación anual captada por un seguidor de un solo eje de tipo polar es mayor que la que se gana con un sistema de dos ejes, es superada en un 96%. (Guihua Li et al, 2012, págs. 1-9).

Seguidor de dos ejes

Éste tipo de seguidores ejercen el movimiento en horizontal como en vertical de manera simultánea. Disponen de dos ejes de giro que le permiten dirigirse en cualquier dirección, como se puede ver en la **Figura 14**. Debido a que presentan mayor grado de libertad, alcanzan giros de hasta 360° (Pintos, 2010, pág. 9). Están dotados de un eje primario que orienta al panel en posición Norte-Sur y el otro en la posición Este-Oeste (Guardado, 2012, pág. 14); sus ejes de rotación están alineados con el norte magnético de la superficie terrestre.



Figura 14.-Esquema de un seguidor de dos ejes. Fuente: Imagen recuperada de (Guardado et al, 2012), Implementación de seguidor solar de dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES.

Clasificación de los seguidores en base a su mecanismo de control

Seguidor solar pasivo

Los sistemas pasivos suelen ser seguidores de un solo eje, carecen de un control electrónico >son accionados térmicamente<. Su sistema de dirección se basa generalmente en el cambio

de densidad de un líquido, regularmente gas [freón] o cualquier otro líquido de baja ebullición. Al ser calentado el fluido por la luz solar incrementa su densidad, haciendo que el seguidor se mueva por desbalance, ya que la condensación genera una diferencia de pesos que provoca el movimiento. El líquido suele almacenarse en dos tanques colocados en las laterales del seguidor, alineados de Este a Oeste e interconectados entre sí. Adicionalmente se colocan amortiguadores hidráulicos para equilibrar el movimiento, el seguidor comienza el día moviéndose al Oeste con los primeros rayos de sol que recibe en la mañana, el líquido contenido en el depósito del lado Oeste se evapora y circula hacia el contenedor del lado Este, al llegar ahí se vuelve a condensar y la diferencia de peso provoca que el panel gire y quede orientado hacia el Este, >**Figura 15-a**<.

El líquido en los contenedores busca el equilibrio a lo largo del día, cuando el seguidor llega a su límite de giro en el atardecer, los rayos solares inciden sobre el contenedor Este, para condensar el líquido y que circule hacia el contenedor Oeste que se mantiene en sombras, haciendo que el seguidor se dirija hacia esta dirección >**Figura 15-b**<, finalizando de esta forma su ciclo de trabajo (José, 2007, pág. 31).

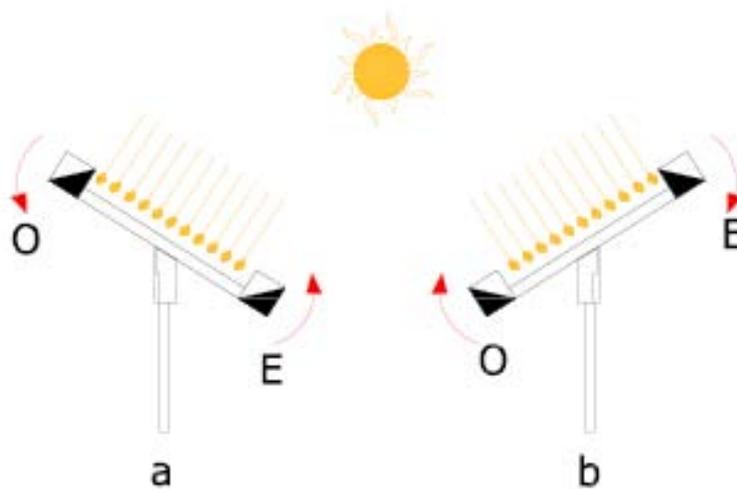


Figura 15.-a) Representación esquemática del seguidor orientado hacia Este; b) Representación del seguidor orientado en dirección Oeste. Fuente: Imágenes tomadas de (José, 2007, pág. 31), Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos.

Seguidor solar activo

Este tipo de seguidores utiliza motores eléctricos, brazos y engranes que son controlados por un circuito electrónico. Se activan mediante sensores o por cálculos numéricos o astronómicos. En su diseño se debe considerar que la energía en el panel solar debe ser

suficiente para energizar el seguidor, de lo contrario, no podrá orientarse (Guardado, 2012, pág. 12). De acuerdo con la configuración y su unidad de control se clasifican en:

- *Microprocesados*: Estos seguidores utilizan sistemas de programación que emplean algoritmos matemáticos, GPS's. Calculan la dirección del sol en función de la hora y fecha en tiempo real. Son operados por un sistema de lógica difusa, el cual no usa valores exactos o enteros como 1 o 0, utiliza valores intermedios como 0, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1.0, etc. Esta programación le permite mayor exactitud en el posicionamiento del panel con respecto al sol. Emplea un sistema de ubicación de coordenadas, obtenidas de los registros anuales de las trayectorias de los movimientos que ejercen los cuerpos celestes, el sol, la luna, los planetas, los satélites y las estrellas, también llamados anuarios astronómicos (Armendariz, 2013, págs. 1-7). Estos equipos al no depender de ningún tipo de sensor, son incapaces de determinar fallas en su sistema cuando se presenta alguna avería.
- *Electro-Ópticos*: A diferencia de los microprocesados, emplean un mecanismo electromecánico que determina la posición del sol mediante sensores, a su vez sirven para enviar señales eléctricas a un sistema de microcontrolador para ejecutar la acción de movimiento. El mecanismo de desplazamiento es operado por motores eléctricos, que activan el movimiento del eje del seguidor para desplazar la celda solar (Zamudio, 2013, p.24). El inconveniente encontrado en este tipo de aparatos, es que, son energizados por una fuente alterna de energía, o bien, consumen energía de la misma celda fotovoltaica.

Métodos y sistemas de concentración solar

La energía radiada por el sol es posible aprovecharla, en forma de calor a través de la absorción de la irradiación [es recibida en su forma directa, difusa o reflejada]. La radiación directa, es la que incide del sol sin reflexiones o refracciones intermedias. La radiación difusa es aquella que se recibe de forma dispersa o refractada por los agentes atmosféricos como nubes, polvo o por el resto de elementos atmosféricos y/o terrestres. La radiación reflejada es la que reflecta de la superficie terrestre o por los objetos cercanos, es también llamado albedo (Gómez, 2013, págs. 22-26). La **Figura 16** esquematiza las tres formas de incidencia solar.

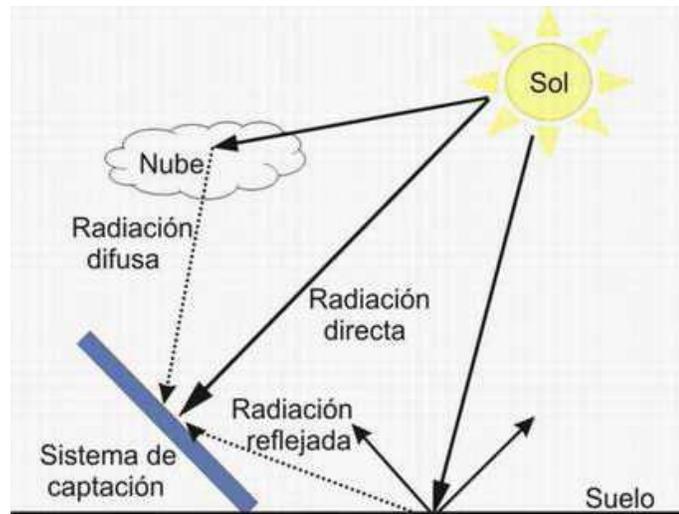


Figura 16.-Representación gráfica de la incidencia solar en la superficie terrestre. Fuente: Imagen obtenida de (Gómez, 2013, pág. 25), Seguidor solar para un concentrador cilíndrico parabólico.

A lo largo del tiempo, se han diseñado diversos y avanzados colectores solares, con el propósito de mejorar el aprovechamiento de la radiación solar como fuente de energía. Se dividen en dos grandes grupos:

- *Colectores solares sin concentración:* Estos colectores no superan los 70°C en la condensación de calor, son usados en las aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura; un ejemplo es en la producción de agua caliente.
- *Colectores solares de concentración:* Estos sistemas usan los métodos de concentración de la óptica, elevan la temperatura de un fluido a más de 70°C, emplean elementos reflejantes para aumentar la intensidad de la radiación sobre la superficie absorbente para conseguir altas temperaturas.

Propagación de la luz mediante óptica geométrica

La energía electromagnética que emiten los cuerpos en ciertas condiciones, se llama energía radiante. Esta propagación responde a las leyes de la óptica geométrica >tienen por objetivo determinar la trayectoria de la energía radiada a través de distintos medios materiales<. Las trayectorias de la energía radiante en su propagación constituyen los rayos de luz; al tener un punto emisor infinitamente pequeño situado a cierta distancia de una pantalla opaca, con un orificio de tamaño finito, el punto emisor y el orificio determinan geoméricamente un cono

de luz que recibe el nombre de haz de rayo. Cuando el diámetro del orificio tiende a ser cero, se llega al concepto teórico de rayo de luz, el cual se denomina óptica anidólica, y es utilizado para diseñar el área de captación de algunos concentradores y así maximizar la transferencia del flujo de energía para crear distribuciones controladas de la irradiación (Álvarez, 2011, págs. 21-25).

Algunos colectores que emplean el método de concentración son los (Paredes, 2012, págs. 7-18):

- *Colectores planos*: Estos sistemas constan de una cubierta de vidrio, una placa absorbente y tubos por donde circula el fluido de trabajo y un aislante térmico.
- *Colectores de vacío*: Están conformados por dos tubos concéntricos entre los cuales se ha aspirado y sellado con aire al vacío, emplean un sistema denominado CPC [Colector Parabólico Concéntrico] para aprovechar la radiación solar que incide entre los dos tubos, utilizan una serie de reflectores que dirigen la luz que cae entre tubo y tubo hacia la parte trasera de los mismos, con ello los colectores reciben luz tanto en la parte delantera como trasera.
- *Tubos de calor*: Poseen una simetría cilíndrica formado por dos tubos concéntricos, uno exterior y otro interior pintado de negro, el tubo interior se mantiene cerrado al vacío y con una pequeña cantidad de líquido vaporizante [mezcla de alcohol] que al ser calentado circula en el interior del tubo hasta alcanzar la parte que se encuentra a menos temperatura.
- *Colectores cónicos o semiesféricos*: Su principal característica es que constituyen simultáneamente la unidad de captación y de almacenamiento, su superficie de concentración es cónica o esférica, con estas geometrías se consigue que la superficie sea iluminada a lo largo del día.
- *Concentradores cilíndricos*: Su superficie reflectora es la mitad de un cilindro, transforman la radiación solar directa en energía térmica, gracias al calentamiento de un fluido de trabajo.
- *Concentrador lineal fresnel*: Este tipo de sistemas se aproximan a la forma parabólica de los sistemas de cilindro, utilizan largas filas de espejos planos o levemente curvos, reflejan los rayos del sol en un receptor lineal fijo.

- *Concentradores parabólicos compuestos [CPC]:* Su superficie reflectora representa una geometría de un paraboloide de revolución. Consta de reflectores parabólicos que redirigen la radiación desde la apertura hasta el absorbente, como si se tratase de un embudo, es decir, todos los rayos incidentes son dirigidos al absorbedor.
- *Disco Parabólico [DP]:* Se componen básicamente por un reflector o un conjunto de reflectores, tienen la forma de un paraboloide de revolución, y poseen un receptor situado en el foco puntual de dicho paraboloide, es decir, la radiación concentrada por el paraboloide incide sobre el receptor, donde se convierte en energía térmica.
- *Sistemas de Torre Central [STC]:* Está compuesto por un grupo numeroso de concentradores planos individuales llamados heliostatos, los cuales dirigen la radiación solar concentrada hacia un receptor central situado en lo alto de una torre y la concentración se produce en tres dimensiones.

En el esquema de la **Figura 17** se adjunta una tabla que muestra los diferentes colectores, en función de la razón de concentración y el rango de temperaturas que llegan a alcanzar.

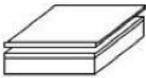
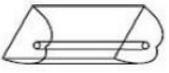
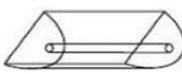
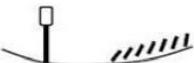
		Nombre	Croquis	Razón de concentración "C"	Rango Temperatura alcanzada [C°]	
Estacionario	Absorbedor plano	Capataador plano de agua/aire		$C \leq 1$	$30 < T^{\circ} < 250$	
		Tubos de vacio		$C \leq 1$	$50 < T^{\circ} < 200$	
Seguidores	Seguimiento a un eje	Absorbedores tubulares	Colector Parabólico Compuesto CPC		$1 < C < 15$	$70 < T^{\circ} < 300$
			Colector Cilíndrico Parabólico CCP		$15 < C < 40$	$70 < T^{\circ} < 350$
	Seguimiento a dos ejes	Absorbedores puntuales	Disco Parabólico		$100 < C < 1000$	$70 < T^{\circ} < 1500$
			Torre Central		$100 < C < 1500$	$150 < T^{\circ} < 1500$

Figura 17.-Clasificación de los sistemas en función del factor de concentración.
Fuente: Imagen recuperada de (Paredes, 2012, pág. 10), Diseño de captador solar cilindrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay.

Análogos de sistemas de seguimiento y concentración solar

Seguidor solar pasivo dirigido por laminillas de Al-Acero

Consiste en un seguidor solar, que es activado pasivamente, mediante tiras bimetálicas de Al-Acero y controlado por un amortiguador viscoso; su funcionamiento se basa en la expansión térmica de estos metales, que están montadas simétricamente sobre un marco a los lados de un eje horizontal. Las tiras bimetálicas están orientadas de forma que una queda sombreada y la otra expuesta a la radiación solar. Debido a que el coeficiente de expansión térmica del Al es mayor que la del Acero, al calentarse se dobla hacia una dirección y cuando está frío hacia el lado contrario. Esta flexión provoca una deflexión en el punto medio de la tira, creando un momento de desequilibrio que hace girar el panel solar hacia el sol.

Las pruebas en el prototipo, mostraron un aumento considerable en la eficiencia de una celda fotovoltaica, se mejora el rendimiento de captación hasta en un 23%. En la fase experimental se midió el punto medio de deflexión de las tiras bimetálicas, sujetas bajo diversas condiciones de calentamiento, utilizando lámparas de 500 watts que fueron colocadas a distancias variables para alterar la intensidad de calor; las deflexiones se mostraron en intervalos de 2 mm/seg.

Lo que respecta al movimiento, a medida que la radiación solar disminuye, el tiempo para reorientar el seguidor crece de forma exponencial, hasta que se alcanza un punto en el que la radiación es insuficiente para activar el giro. Lo interesante del modelo, es la adopción de un método de control pasivo que no requiere del empleo de un motor eléctrico (Clifford, 2004, págs. 269-280). La **Figura 18**, muestra el seguidor prototipo.



Figura 18.- Seguidor solar pasivo Fuente: Fotografía recuperada de (Clifford 2004, pág. 277), Design of a novel passive solar tracker.

Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos

Es un seguidor de dos ejes, su sistema de control se basa en un microcontrolador que calcula la dirección del sol, por fecha y hora. El controlador actualiza su posición cada 15 min, periodo de tiempo que garantiza un error menor a 4°. Tiene la capacidad de no guardar la información de su ubicación, para que en caso de falla de energía se eliminen los datos de su fallo, por lo que en cada ocasión que exista este evento, el seguidor regresa a su posición de inicio, retrayendo el actuador hasta el accionamiento del interruptor de fin de carrera y a partir de ahí se posiciona nuevamente.

Cuando el seguidor termina de posicionarse, programa la alarma de un reloj para el siguiente movimiento y entra en estado de reposo, del que sale cuando la alarma se activa. Al término del periodo de seguimiento, que tiene una duración de 16 horas, el seguidor conserva su última ubicación, hasta las 20 horas y a continuación regresa a su lugar de inicio, [hacia el Este]; está programado para comenzar su ciclo de movimiento a las 8:00 a.m. todos los días (José, 2007). La **Figura 19** corresponde al diagrama de funcionamiento y conceptualización del seguidor.

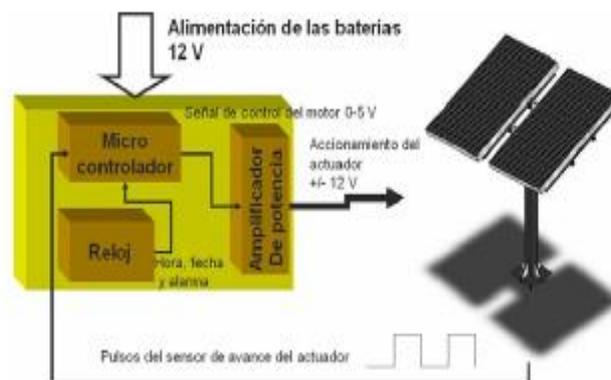


Figura 19.- Esquema de funcionamiento del seguidor solar.
Fuente: Imagen recuperada de (José, 2007. pág. 53),
Prototipo fotovoltaico con seguimiento de sol para procesos electroquímicos.

Calentadores solares de agua con seguidor de trayectoria solar

Reside en un prototipo de seguidor de trayectoria solar de un solo eje, con dirección Este-Oeste, orienta un colector solar plano con intercambiador de calor. Aprovecha la energía de la radiación solar, transformándola en energía térmica para su uso doméstico o comercial. Su sistema de control de movimiento, está conformado por un circuito electrónico que integra una interfaz gráfica desarrollada en Visual Basic C y una computadora para descargar los

datos del sistema. Los ciclos de movimiento se controlan con un reloj que funciona en tiempo real, generando las trayectorias con respecto a la posición del sol de manera precisa. Con este modelo se ha logrado una mejora de captación de energía en un 48%, con respecto a otros sistemas de seguimiento. La **Figura 20** presenta el prototipo de manera esquemática; en su construcción se requirió una inversión de \$8000 >ocho mil pesos 00/100< (Flores, 2012).

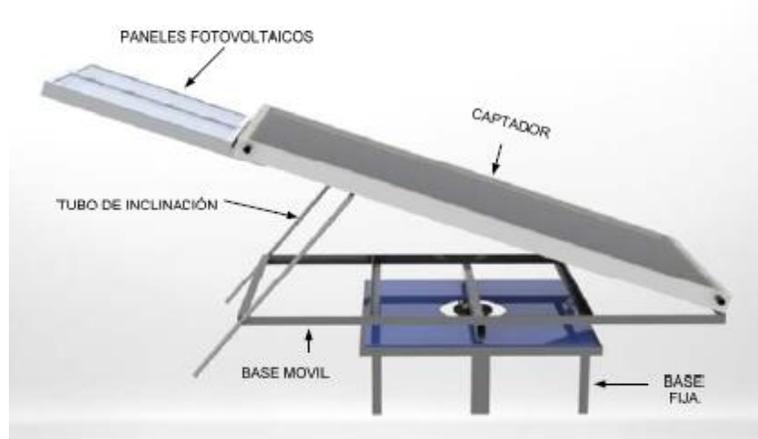


Figura 20.- Esquema del seguidor solar con placa solar plana. Fuente: Imagen recuperada de (Flores, 2012), Viabilidad de calentadores solares de agua con seguidor de trayectoria solar.

Seguidor solar electrónico de dos ejes

Este aparato es un seguidor solar de dos ejes, está diseñado para orientar un panel solar a lo largo del día en una trayectoria paralela al ecuador celeste, ejecuta un giro de aproximadamente 180°. Funciona mediante un circuito electrónico basado en sensores de luz -DR-, ubicadas en la misma posición del panel solar, de manera que cuando estas no estén orientadas hacia el sol, el circuito redirecciona la orientación del panel.

Su parte mecánica está conformado por un poste de tubo galvanizado de 2.5 in de diámetro y una estructura fabricada con ángulo metálico de 2 in, el cual sirve como soporte para el panel solar. La plataforma es desplazada por dos motores de tipo brazos eléctricos, son guiados por los ejes de movimiento que están ubicados en el centro de la estructura; tiene un sistema de encendido y apagado automático, programado para que todos los días el panel fotovoltaico pueda posicionarse adecuadamente para esperar la salida del sol desde el Este; el panel termina el día orientándose hacia el Oeste y ahí se mantiene hasta que el sistema lo auto-posicione correctamente en dirección Este, para esperar nuevamente la salida del sol al siguiente día.

El sistema de dirección se realiza por medio de un controlador de hora y fecha, para mantener la posición correcta de orientación, trabaja mediante un sistema de impulsos; la parte de control de fuerza se energiza en cierto periodo ya establecido, para actualizar su posición con respecto al sol y luego se desenergiza cuando el panel ha alcanzado su posición, de esta forma se ahorrará energía de consumo. El sistema se mantiene 4 min 50 seg apagado y solo 10 seg encendido para actualizar su posición con respecto al sol, la eficiencia lograda con este seguidor en los días soleados es de un 32%, mientras que en los días nublados es de tan solo 13.3%. (Guardado, 2012). La **Figura 21** muestra el prototipo en fotografía.



Figura 21.- Prototipo de seguidor solar para la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES. Fuente: Imagen recuperada de (Guardado et al, 2012), Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES.

Seguidor solar para el control electrónico de un reflector scheffler

Este reflector solar tiene como fin, cocinar con la energía del sol; emplea un concentrador que se basa en la geometría de la parábola para concentrar los rayos del sol que llegan en su foco central. El sistema de control, está basado en un micro controlador diseñado para efectuar un seguimiento en dos ejes; mediante un sensor de tipo encoder se mide la posición del reflector, trabaja calculando la posición del sol en base a datos de programación astronómica, con una precisión de 0.01. Se mueve de Este a Oeste, sobre un eje que puede girar 240° con respecto al acimut, utiliza un segundo eje con movimiento de inclinación, desde los 60° hasta la posición horizontal.

El método para realizar el seguimiento se basa en el tiempo, independiente de la hora en la cual amanece o atardece, la transición del día y noche ocurre en 24 horas, el planeta tierra gira 360° sobre su eje, por lo tanto, $360^\circ/24h = 15^\circ$, lo que corresponde a un uso horario, es decir, visto desde el plano terrestre el sol se mueve 15° cada hora. El control mueve el reflector 15° cada hora dentro de 180° que corresponden al día, ya que los otros 180° de la tierra se encuentran de noche. El circuito de control cuenta con una pantalla LCD y un menú principal para configurar la hora, fecha, longitud y latitud del lugar, así como la diferencia horaria de acuerdo a la zona correspondiente, Con la información obtenida se procede a realizar el cálculo de la posición solar y la hora de salida del sol para comenzar el seguimiento.

Integra un circuito gobernado por un microcontrolador con un algoritmo que en base a la hora, posiciona al reflector logrando un bajo consumo de energía. Para conseguir la inclinación hacia la dirección del sol, utiliza un circuito electrónico que incluye varios componentes, de los cuales, el más importante es un microcontrolador PIC que permite al panel orientarse de manera óptima respecto al ángulo horario >no supera el 5% de error< (Ochoa, 2012). La **Figura 22** muestra una fotografía del seguidor solar con reflector scheffler.



Figura 22.-Seguidor solar para el control electrónico de un reflector scheffler. Fuente: Imagen recuperada de (Ochoa, 2012), Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector scheffler.

Capítulo III.- Experimentación

Selección del material con memoria de forma

Para el presente estudio se utilizó una AMF tipo Ni-Ti debido a que es la aleación más comercial y se puede encontrar en diferentes configuraciones. Se eligió un resorte helicoidal de expansión, [aleación 56.36% Ni y Ti en balance] ya que en esta configuración se puede tener desplazamientos mayores en los diseños a desarrollar. Dicho resorte trabaja a tracción al recibir una señal eléctrica o calor. El diámetro del alambre con el que ha sido fabricado es de 1.26 mm, su longitud libre es de 26.8 mm, el diámetro de sus anillos es de 5.50 mm, tiene un total de 21.4 vueltas en sus espiras; en la **Figura 23** se muestra el resorte e [en vista frontal, lateral e isométrico].

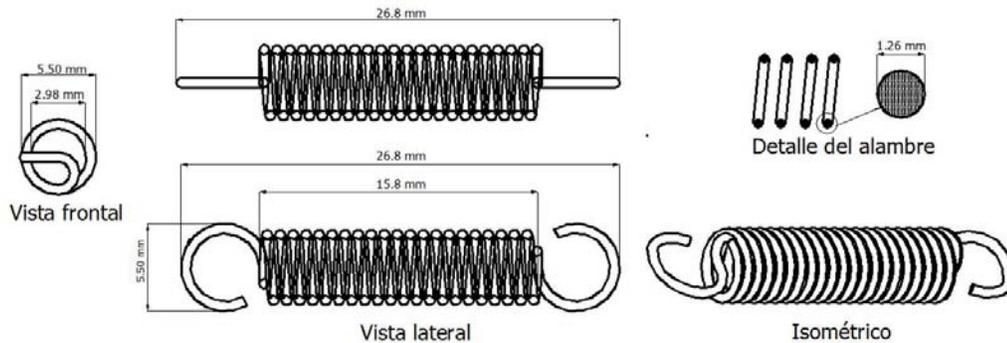


Figura 23.-Esquema del resorte de Ni-Ti seleccionado, dicho material posee efecto de memoria de forma.

En pruebas preliminares se pudo observar que este resorte cuando es sometido a alguna fuente de calor, recupera su forma contraída a una velocidad de 2 a 4 seg aproximadamente.

Determinación de las temperaturas de transformación del resorte

Como se vio en la sección anterior se desconocen las temperaturas de transformación del resorte, las cuales son esenciales para determinar que temperatura se necesita alcanzar en el dispositivo a diseñar. Existen varios métodos para determinar dichas temperaturas. Para estimarlas se realizaron mediciones utilizando un sensor Data Easy Logger USB y Termopar, un termómetro de infrarrojos y una cámara termográfica.

En esta sección se explica la forma en que fueron estimadas las temperaturas aplicando dichas técnicas.

Medición con sensor Data Easy Logger USB y Termopar

Selección de equipo:

El sensor Data Easy Logger USB >**Figura 24-a**< es un dispositivo cuya función es registrar datos ambientales, como temperatura y humedad de forma continua hasta por 72 horas; utiliza una entrada USB para descargar los datos en un equipo de cómputo. Los registros pueden ser analizados para crear gráficas y derivar información estadística por medio del software Easy Log USB, tiene integrada una pantalla digital que permite monitorear los registros durante las mediciones. Detecta la diferencia de potencia en las temperaturas mediante termopares [termopares], su rango de temperaturas pueden ser en Centígrados [35° a $+ 80^{\circ}$] o Fahrenheit [31° a $+ 76^{\circ}$], su margen de error es de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2^{\circ}\text{F}$.

El termopar >**Figura 24-b**<, también llamado termocupla, recibe este nombre por estar formado por dos metales diferentes, unidos por el extremo en forma de alambre, se emplea como sensores de temperatura, cuyo principio de funcionamiento es el efecto termoeléctrico, produce una diferencia de potencial del orden de los mV. Los tres más comerciales son las calibraciones tipo K, T y J, se identifican por ser de bajo costo, al estar fabricado de materiales como Ni-Cr, Ni-Al, son ideales para medir temperaturas de entre -270 a 1372°C . Existen calibraciones de alta temperatura, las cuales se clasifican en R, S, B, G, C y D, estos ofrecen un rendimiento de hasta 2320°C , son fabricados de metales como Pt-Rh, W-Re.

Para el estudio se utilizó un termopar tipo T, fabricado con una aleación Cu-Constán >formada por un 55% de Cu y un 45% de Ni<, presenta un rango de temperatura de 0°C a 350°C .

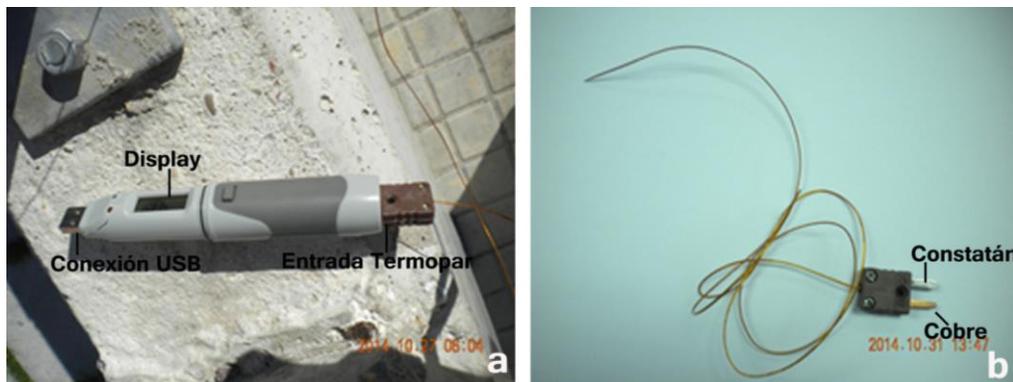


Figura 24.-a) Registrador Data Easy Logger USB; b) Termopar tipo T.

Procedimiento:

Para determinar la temperatura de transformación del resorte estando expuesto a la incidencia solar, se recurrió al método de luz concentrada. Se utilizó una lupa de 10 cm de diámetro que consta de una lente convergente, la cual permite desviar la luz incidente sobre punto focal, en una pequeña área del resorte para aumentar su temperatura, ya que generalmente esta geometría parabólica redirige los rayos a un punto central al estar hecho de un material de alta reflexividad. Después de un cierto número de pruebas se estimó que el resorte comienza a recuperar su forma aproximadamente a los 28.6°C. Las fotografías de la **Figura 25** ilustran el proceso experimental.



Figura 25.-a) Estado del resorte de Ni-Ti antes de la prueba; b) Desviación la luz sobre un punto focal; c) El resorte comienza a contraerse aproximadamente a los 29°C; De la figura >d a f< se muestra el resorte recuperando su forma.

En la **Tabla 3** se presentan a manera de resumen las temperaturas promedio obtenidas

Tabla 3.- Resultados de las mediciones efectuadas utilizando una lupa como reflector solar.

Registros	Temperaturas			Tiempo de transformación
	No. De ensayos	Ambiente inicial	Máx. alcanzada en el resorte	Inicio de la transformación
1	19°C	47.5°C	29°C	60
2	23°C	38 °C	28.5°C	60
3	19°C	41.5°C	29°C	89
4	17°C	57°C	28°C	46
5	25°C	37.5°C	28.5°C	70

Medición con termómetro de infrarrojos

Equipo utilizado:

Como segunda alternativa se utilizó un termómetro de infrarrojos marca Fluke modelo 62 Max, detecta y mide la temperatura de un cuerpo a distancia, los datos registrados se visualizan en un display en grados centígrados, su rango de temperaturas es de -30 a 500 °C, su precisión o margen de error es de $\pm 1.5^\circ\text{C}$.

Procedimiento:

Esta prueba se realizó a temperatura ambiente, se mantenía en promedio en 22.25°C . Al igual que en la prueba anterior el resorte fue estirado y calentado, conforme se aumentaba su temperatura se realizaron mediciones con el termómetro. Con los datos obtenidos fue posible establecer, que la temperatura A_s en promedio comenzó a los 29.5°C , cuando el resorte inicio a contraerse. Las fotografías de la **Figura 26** muestran el proceso experimental.

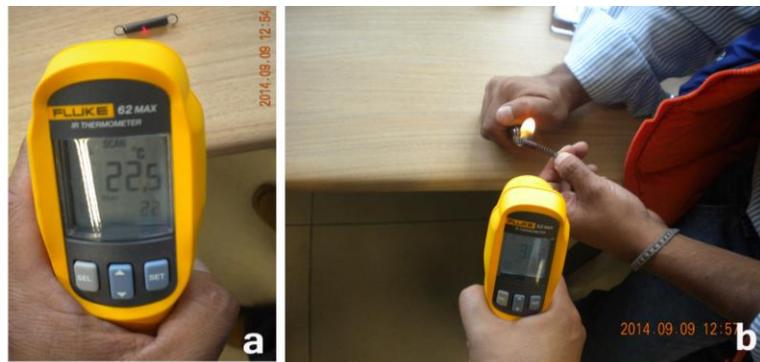


Figura 26.-a) Medición de la temperatura del resorte estando en contacto con el ambiente; b) Medición de la temperatura del resorte al ser calentado con la flama de un encendedor.

Medición con cámara termográfica

Como puede observarse con las pruebas anteriores es posible medir la temperatura de un solo punto del resorte. Por lo anterior se decidió realizar una prueba de campo utilizando el método de termografía.

La termografía es una técnica que permite estudiar la temperatura de una superficie, sin la necesidad de llegar al contacto físico con el objeto; mediante una cámara con visión de infrarrojos, se capta la energía generada por un cuerpo, y es convertida en unidades de temperatura >Celsius, Fahrenheit o Kelvin<.

Selección del equipo:

El estudio se efectuó con una Cámara modelo FLUKE TiR4 >Figura 27<, produce imágenes térmicas, visibles y fusionadas. Este equipo cuenta con una pantalla LCD de 5 in de alta resolución, su rango de temperatura es 20°C a 100°C [-4 °F a 212 °F], su margen de error es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ o 2%, la calidad máxima de la imagen que se obtiene es de 320 x 240 píxeles, utiliza un enfoque Smart Focus [función de enfoque continuo], su distancia focal mínima es de 15 cm y su campo de visión -FOV- es de 23° horizontal x 17° a la vertical, emplea un lente de 20 mm con articulación de 180°. El análisis e interpretación de los datos se realizó de forma gráfica mediante el software de generación de informes SmartView™.



Figura 27.-Cámara de visión de infrarrojos FLUKE TiR4.

Procedimiento:

En este experimento se recrearon las condiciones ambientales en un laboratorio cerrado, para evita que los datos sean alterados por las condiciones climáticas del exterior. Se utilizó el resorte de Ni-Ti. Mediante un sistema de gancho se colgó del brazo de una pinza metálica,

para ser calentado con una pistola de aire caliente y provocar su contracción. La cámara termográfica fue colocada a una distancia de 0.60 m, de esta manera se capturaron imágenes de forma secuencial. En la **Figura 28** se muestran las imágenes captadas por la cámara de manera fusionada, la imagen con fondo azul mediante una gama de colores muestra la energía emitida por el resorte, la imagen fotográfica >en luz visible< muestra la apreciación del escenario real del experimento. Se observa que al inicio el resorte mantenía una temperatura de 22.4°C >esquema a y b<, después de estar expuesto al calor por 6 seg se contrajo en su totalidad, habiendo alcanzado una temperatura de 75.6°C, los >esquemas c y d< muestran el estado del resorte cesado el calentamiento.

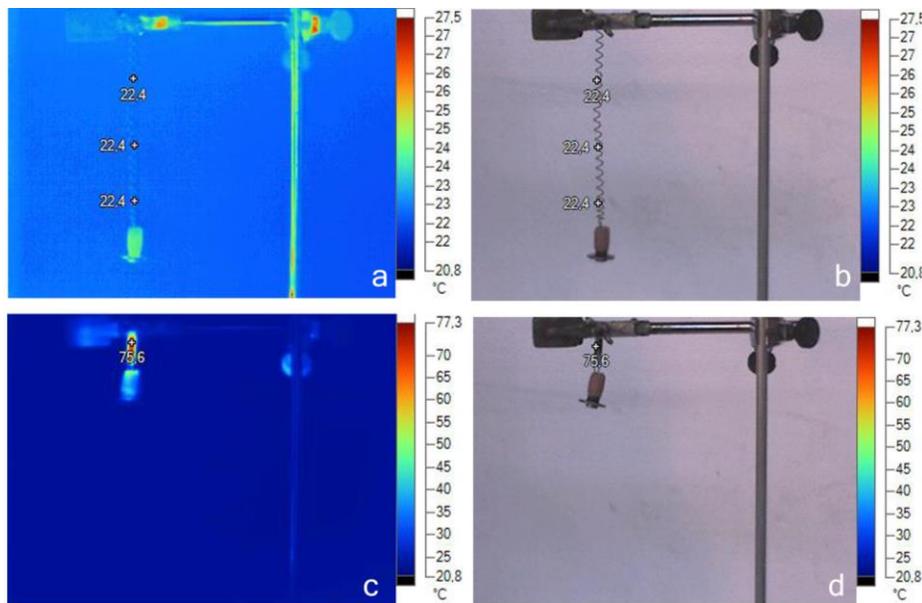


Figura 28.-Parte superior: **a)** Imagen termográfica capturada al inicio de la prueba; **b)** Misma imagen >a< en luz visible. Parte inferior: **c)** Imagen termográfica capturada finalizada la prueba; **d)** Misma imagen >c< en luz visible.

Debido a que en el anterior análisis, el tiempo de duración fue muy rápido, se repitió el experimento de una forma más controlada, para que la cámara pudiese realizar varias capturas y así obtener mejores parámetros medibles. La prueba tuvo una duración de 2 min. El resorte estando a temperatura ambiente mantenía una temperatura de 22.2°C, al finalizar el calentamiento había alcanzado los 61.6°C. A los 30°C el resorte comenzó a recuperar su forma. La **Figura 29** muestra la secuencia fotográfica, es notorio ver la retracción del resorte conforme aumentaba el tiempo de exposición a la fuente de calor.

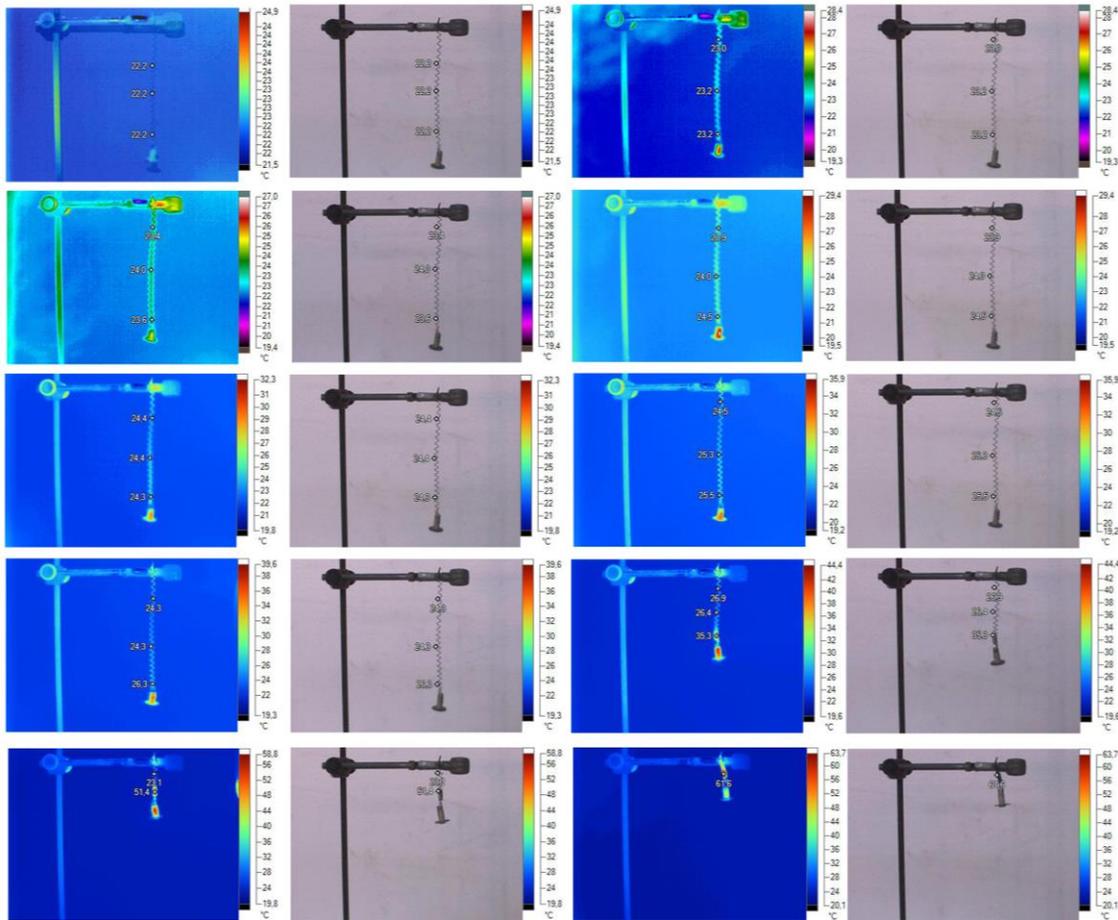


Figura 29.-De arriba hacia abajo la secuencia fotográfica del ensayo; Lado izquierdo >imagen termográfica<; Lado derecho >misma imagen en luz visible<.

Es importante mencionar que para efectos de diseño las temperaturas importantes son las de la fase austenita, en la **Tabla 4** se presentan las temperaturas de transformación estimadas en esta etapa de pruebas.

Tabla 4.- Resumen de resultados de las temperaturas de transformación obtenidas en las distintas prueba

Prueba	Temperatura de transformación
Medición con Data Easy Logger USB	28.6°C
Termómetro de infrarrojos	27.8°C
Cámara termográfica	30°C

Método de concentración mediante encapsulamiento

Como pudo observarse en los resultados de termografía se tiene una temperatura de transformación inicial de aproximadamente 30°C. Sin embargo para que se presente la contracción total del resorte es necesario se llegue a una temperatura mayor -por lo menos unos 10 grados más-. Por tanto se tiene como limitante de diseño la temperatura de transformación del material, debido a que esta se encuentra por encima de la temperatura ambiente promedio en el Distrito Federal. De acuerdo a datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía la temperatura máxima promedio registrada en los últimos años es de 25°C. Esto implica que cualquier aplicación a esta temperatura no produciría los movimientos deseados.

Para lograr este objetivo se tienen dos soluciones: Adquirir o fabricar un resorte que transforme a temperatura ambiente o en su defecto implementar un dispositivo que concentre calor hasta llegar a la temperatura deseada.

Debido a que es difícil encontrar proveedores que fabriquen AMF que transforme a temperatura ambiente, se optó por trabajar con la segunda opción. Para hacer transformar el resorte a temperatura ambiente se planteó conseguir el efecto mediante concentración de calor. Se analizaron dos arreglos: Encapsulado en contenedores de cristal y encapsulado en un tubo de vidrio.

Pruebas preliminares.

Como primer idea se contempló encapsular el resorte en contenedores de vidrio [copas de cristal] que funcionaron como concentrador solar en cada caso. Después de un tiempo considerable de estar recibiendo energía del sol se detectó que el calor no pudo provocar el efecto de memoria de forma. Como ayuda se colocó en un primer modelo aluminio en papel y en un segundo, recubrimiento de pintura en color cromo brillante.

Este último arreglo ayudo a aumentar la temperatura y producir contracción en el resorte de mejor forma. Estas pruebas se realizaron con una temperatura inicial igual al ambiente, manteniendo una longitud inicial del resorte de 2.6 cm y cuidando que al aumentar la temperatura del mismo quedara con una longitud final de 10 cm. Se realizaron en una misma zona del Edo de México en horario de mayor incidencia en el mes de Marzo de 2015.

La **Figura 30**, corresponde a las fotografías del primer caso, la línea en color rojo muestra la longitud inicial del resorte >Figura b<, la línea en color amarillo la longitud retraída después de ser retirado de la zona de incidencia >Figura c<.

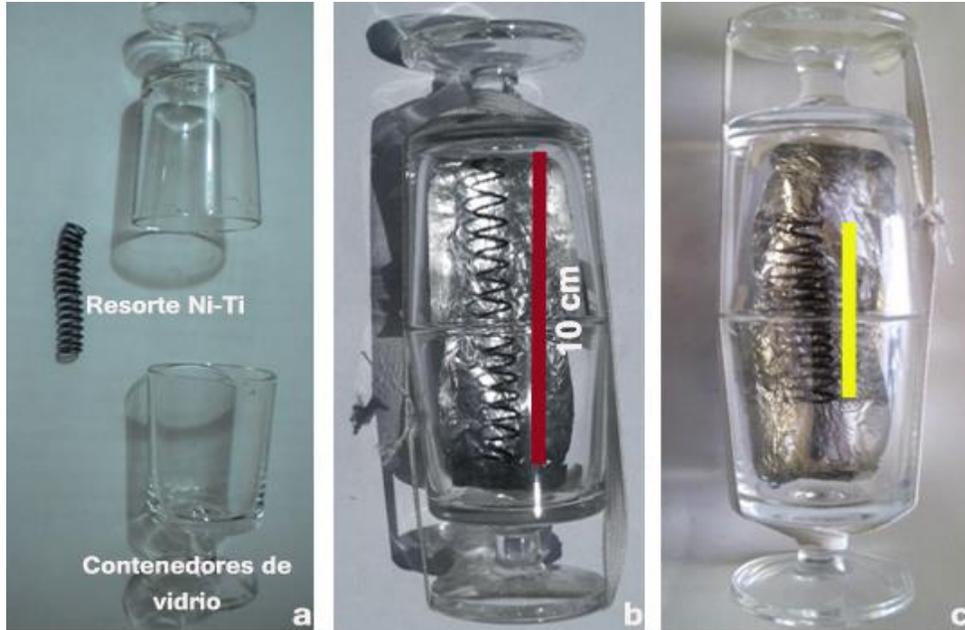


Figura 30.-Arreglo experimental del ensayo preliminar; a) Materiales utilizados [Resorte de Ni-Ti y compas de cristal]; b) Estado del resorte antes de iniciar las pruebas, su temperatura está por debajo de la M_f ; c) Efecto observado finalizada las pruebas, su temperatura está por arriba de la A_s , por ello ha recuperado su forma.

En el segundo caso se realizaron algunos cambios al primer modelo, con el propósito de aumentar la concentración de calor al interior de la cápsula, ya que mientras más concentración de calor, mayor es la contracción en el resorte.

Se consideró necesario reemplazar los contenedores de cristal, por un de tubo de vidrio transparente de 10 cm de longitud y con diámetro de 1.5 cm, para mejorar el efecto de reflexión. Tomando el centro del tubo como referencia a partir de su eje radial en su sentido longitudinal se pintó una media cara con esmalte color cromo brillante, con lo cual se creó un fondo reflector a lo largo del conducto, evitando utilizar papel aluminio.

Como es bien conocido, los sitios de mayor incidencia en una superficie curva son los focos, por lo que con este modelo se logró mejorar la concentración, a lo largo del resorte. La **Figura 31**, ilustran el proceso experimental.

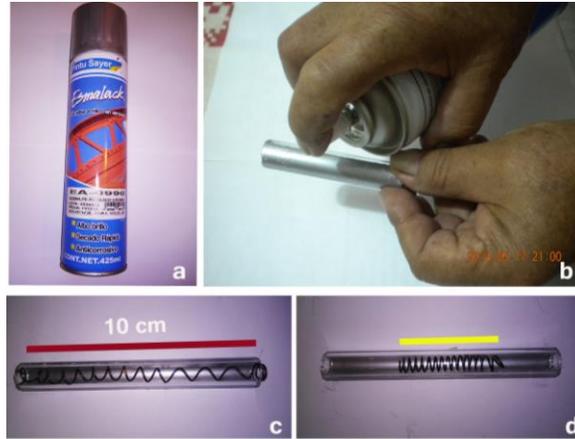


Figura 31.- a) Pintura utilizada como capa reflectora en el tubo de vidrio; b) Preparación del tubo; c) Estado del resorte antes de iniciar las pruebas; d) Estado del resorte concluidas las pruebas [recuperó su forma en menos tiempo].

En ambos casos se realizaron 6 pruebas, mismas que permitieron ver que el resorte en el primer caso recupero su forma contraída en promedio 0.71 cm/min mientras que en el segundo caso fue de 2.17 cm/min. La gráfica de la **Figura 32**, resume los datos obtenidos en ambos ensayos, fue posible establecer, que los cambios realizados al primer modelo mejoraron el tiempo de recuperación de la forma en el resorte. El eje vertical representa la contracción >expresada en cm<, el eje horizontal corresponde al tiempo >expresada en minutos<.

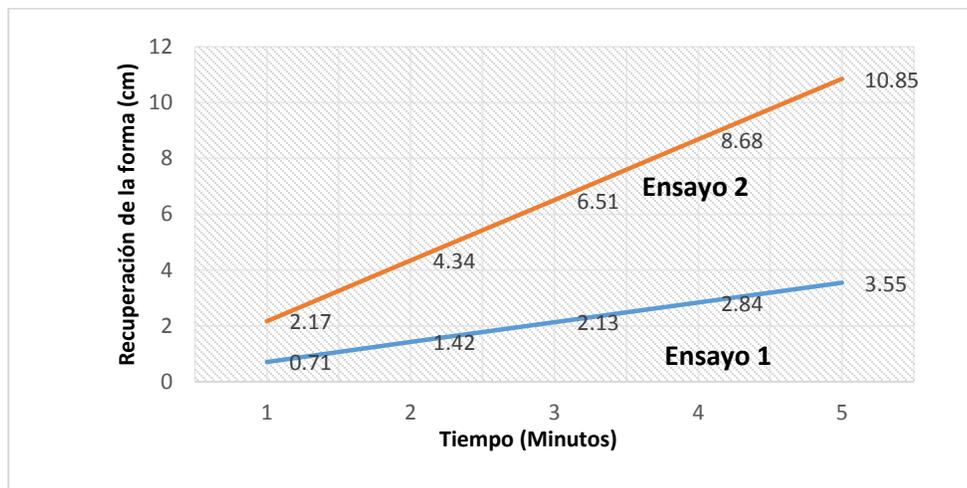


Figura 32.-Resumen de los datos obtenidos en cada prueba. La recta en color azul representa de forma gráfica la contracción del resorte, estando encapsulado en los contenedores de cristal. La línea en color naranja corresponde a la contracción del resorte estando aislado por un tubo de vidrio [se observa una mejoría en el tiempo de contracción].

Como se pudo demostrar en las anteriores pruebas, el arreglo más conveniente es el de concentración solar manteniendo aislado el resorte del ambiente.

Pruebas contracción de la AMF utilizando el sol como fuente de calor

Para probar que el arreglo diseñado es capaz de funcionar utilizando el sol como fuente de energía se realizaron pruebas a la intemperie.

Se utilizó el modelo de pruebas que integra el resorte de Ni-Ti y el tubo de vidrio, fueron integrados dos elementos adicionales, uno para mantener fijo el resorte al interior del cilindro y evitar ser arrastrado al momento de la contracción y otro para aislar de la temperatura del ambiente el resorte del ambiente, el cual se muestra en la **Figura 33**.



Figura 33.-Modelo utilizado para efectuar las pruebas de concentración captando la energía solar.

Hecha las adecuaciones, el dispositivo fue colocado en una zona de incidencia solar, entre el 27 y el 30 de Octubre de 2014, en el patio trasero de las instalaciones del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas -CENIM-.

El Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas -CENIM- es uno de los institutos de investigación perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España. Desde su creación en 1963 se ha enfocado a la investigación en Metalurgia y Materiales Metálicos. Actualmente es un Centro multidisciplinario, que agrupa investigadores del Área de Ciencia y Tecnología de Materiales, cuenta con una notable presencia internacional en Europa y en todo el mundo.

El dispositivo se colocó manteniendo una posición con un ángulo lo más perpendicular hacia los rayos del sol, se mantuvo una inclinación de entre 30 y 45°. En estos experimentos se monitoreo la temperatura del resorte y el tiempo de duración de la prueba. Se realizaron cinco arreglos distintos, mismos que se muestran en la **figura 34**, los cuales fueron clasificados de la siguiente manera: 1] Destapado-ventilado; 2] Destapado no ventilado; 3] Dispositivo sellado en día nublado; 4] Sellado en día despejado; 5] Sellado

utilizando pintura en color negro como recubrimiento; 6] Sellado utilizando pintura en color gris como recubrimiento.



Figura 34.-Proceso experimental de las pruebas de concentración. Se presenta del lado izquierdo [figura a] el estado inicial del resorte antes de comenzar la prueba >línea en color rojo<; Del lado derecho [figura b] se muestra el estado del resorte finalizado el tiempo de exposición >línea en color amarillo<.

Los resultados obtenidos en dichas pruebas se resumen en la **Tabla 5**.

Tabla 5.-Resumen de los resultados de las temperaturas obtenidas en las distintas pruebas de concentración

Arreglo	Temperatura máxima registrada	Tiempo en alcanzar la máxima temperatura
1	45.5°C	39 min
2	44°C	41 min
3	42°C	2 horas con 28 min
4	48.5°C	30 min
5	46.6°C	28 min
6	43°C	28 min

Es importante destacar que en todas las pruebas las temperaturas máximas registradas están por encima de la temperatura de transformación estimada, lo cual indica que el resorte ya ha recuperado su forma que mantiene estando su temperatura por debajo de la Mf.

Como se puede ver en dicha tabla la mejor solución para obtener mayor ganancia de calor en menor tiempo es el arreglo 4, 5 y 6. En la prueba del arreglo 5 se mostró mayor velocidad en el aumento de la temperatura, esto se debió a que el color oscuro refleja poco la luz pero absorbe mucho calor, lo que explica por qué su temperatura fue superior a 3.6 grados con respecto a la prueba 6, sin embargo es susceptible a perder el calor de forma acelerada; por el contrario el modelo 6 [tubo en color gris] se mostró más estable, demostrando que el tono de color claro tiene mayor reflexión, a pesar de que su ganancia térmica, es menor, conserva el calor por un tiempo más prolongado.

En la **Figura 35** se hace una comparativa de la gráfica obtenida del arreglo número 2 con el arreglo No. 6 [**figura 36**], se puede ver que en la segunda grafica la temperatura es más estable. Esto hace ver la importancia de tener el dispositivo sellado para que la transferencia de calor hacia el resorte sea más uniforme y eficiente. Las gráficas se muestran en función de la Temperatura-Tiempo, el eje [Y] contiene los valores de temperatura, el eje de las abscisas [X] los intervalos de tiempo [están dadas en minutos]. Cabe mencionar que la fluctuación en las temperaturas es dependientes de las condiciones atmosféricas como viento y nubosidad.

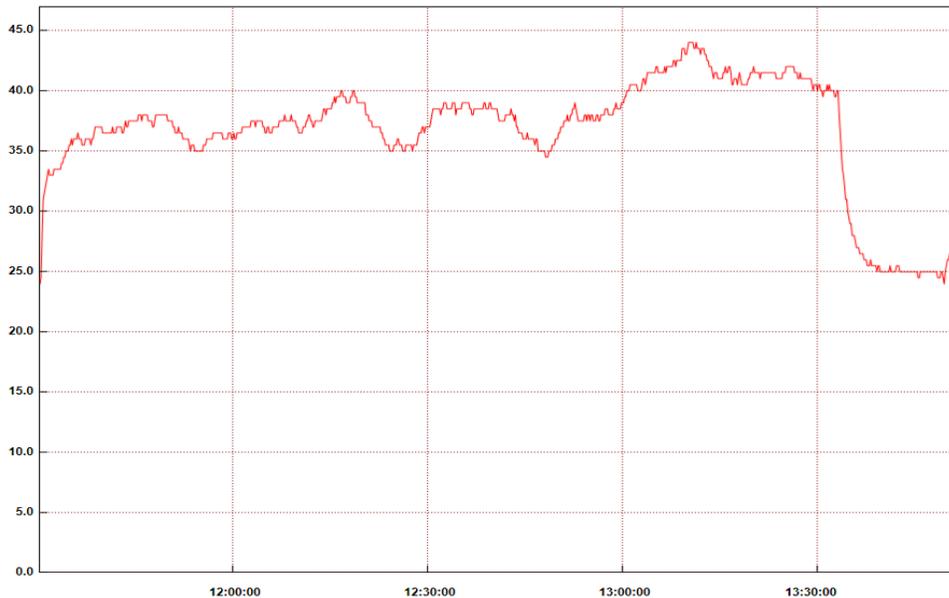


Figura 35.-Gráfica de resultados del modelo No.2. Se observa una curva de temperatura muy zigzagueada, lo que indica que la temperatura estuvo variando en todo momento. Se obtuvo mediante la interpretación y análisis de los datos con Data Easy Logger USB.

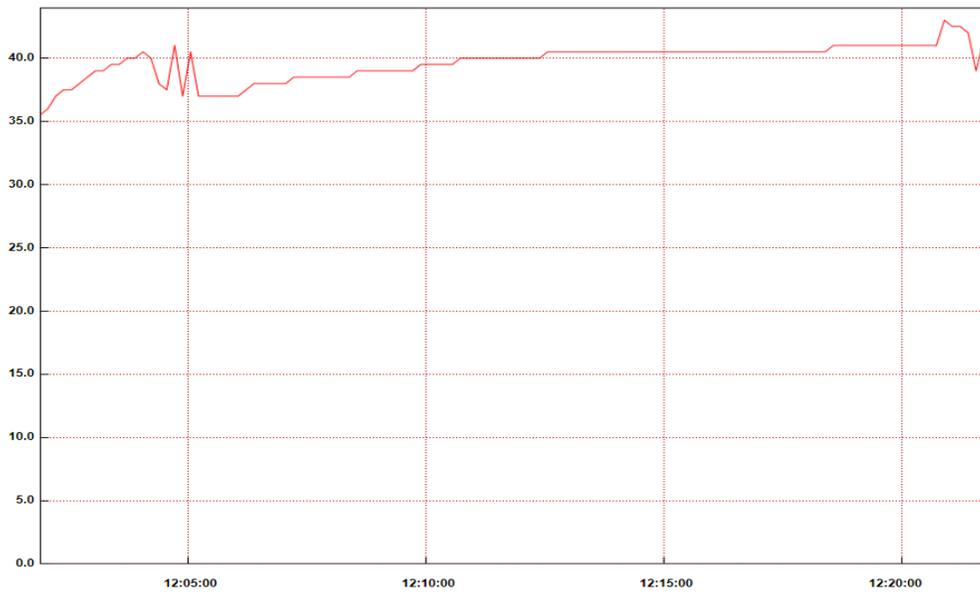


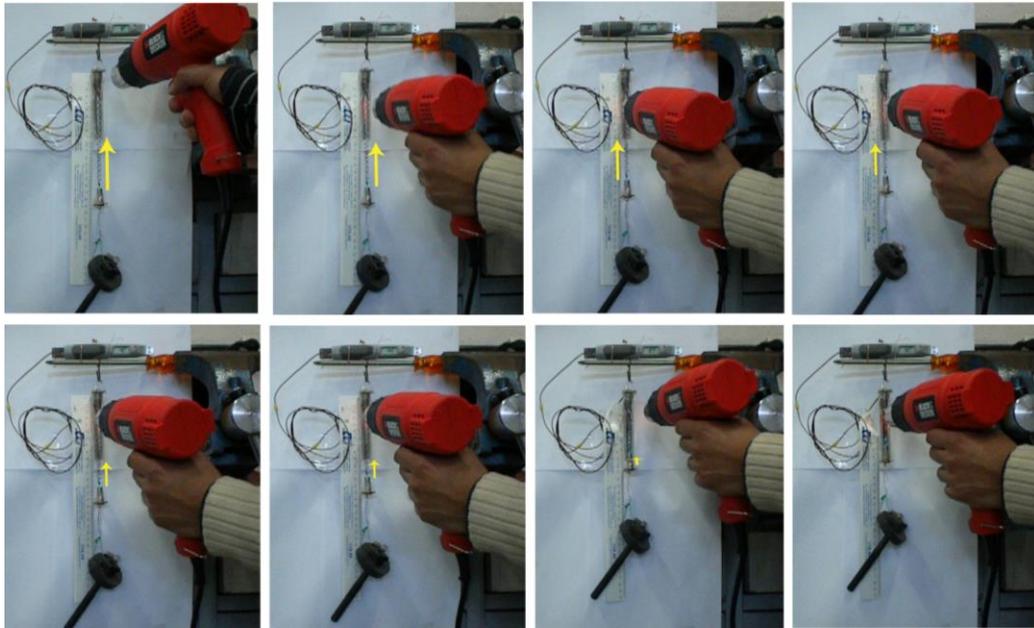
Figura 36.-Gráfica de resultados del modelo No.6. Se muestra una gráfica más lineal, esto indica que la temperatura se mantuvo estable y que las variaciones fueron mínimas. Se obtuvo mediante la interpretación y análisis de los datos con Data Easy Logger USB.

Pruebas termomecánicas

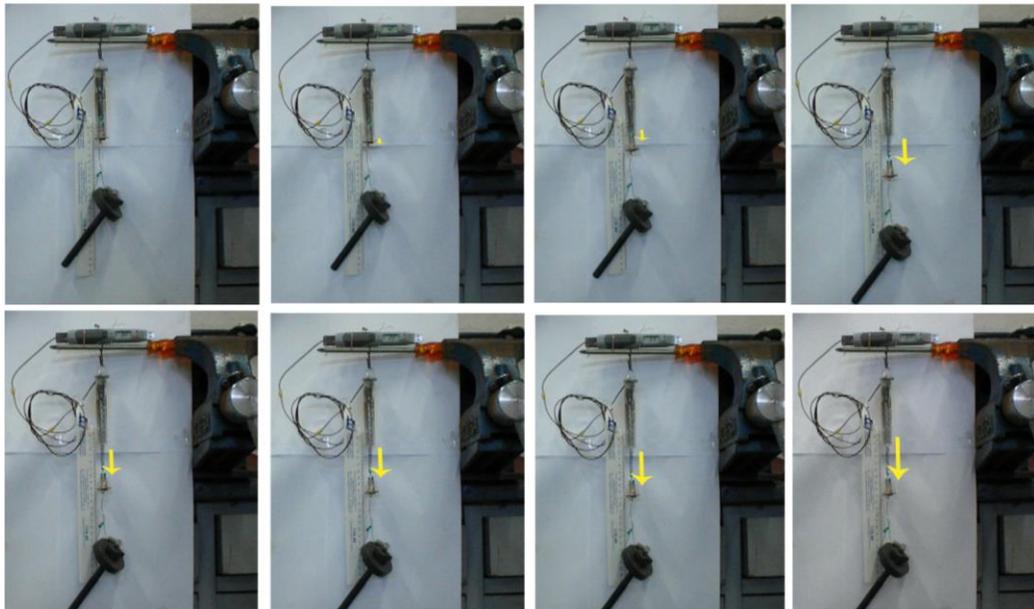
Dado que el dispositivo propuesto, se utilizará como mecanismo de apertura y/o cierre para una ventana tipo persiana y como accionador de movimiento para un sistema de seguimiento solar; es necesario evaluar el funcionamiento del arreglo, cuando es sometido a una carga y calentamiento. Para ello se realizaron algunas pruebas acelerando el proceso de calentamiento con una pistola de aire. Se puso atención en el peso aplicado y el tiempo de recuperación del resorte después de ser retirada la fuente de calor.

Se tomó como referencia un peso aproximado de 200 gr, considerando el caso de una persiana de 30 x 30 cm, con tres hojas de vidrio de 3mm, en la cual se instalará el dispositivo para la siguiente etapa de pruebas.

En la **Figura 37** se puede apreciar el proceso de calentamiento y enfriamiento, donde se observa la forma en que el resorte arrastra la masa durante el calentamiento y viceversa [las flechas en color amarillo indican la dirección de contracción y estiramiento del resorte].



Proceso de calentamiento



Proceso de enfriamiento

Figura 37.-Parte superior: En la etapa de calentamiento, el resorte se contrae y arrastra la carga de manera paulatina. Parte inferior: Durante el enfriamiento, el resorte es estirado por el peso y regresa a su posición inicial.

En la **Tabla 6** se muestran el tiempo de enfriamiento, la carga aplicada y el alargamiento del resorte registrado en cada prueba. Como puede apreciarse el peso desplazado es superior al considerado en las persianas a utilizar, el resorte se estira completamente con la carga al enfriarse en aproximadamente 25 min y en el caso contrario cuando el resorte se calienta se contrae al 100%.

Tabla 6.- Resumen de resultados del estudio termo mecánico efectuado al resorte de Ni-Ti.

Registros	Tiempo	Carga		Longitud de elongación
No. Ensayos	De enfriamiento	Newton	Gr	Cm
1	26 min	2.36	240.21	14
2	23 min	2.47	251.71	16
3	23 min	2.58	263.32	19

Capítulo IV.- Diseño, construcción y aplicación del accionador solar

Principio de funcionamiento de un termoactuador convencional

Los termoactuadores, son dispositivos utilizados para una gran variedad de aplicaciones mecánicas, cuya función es proporcionar fuerza/desplazamiento para mover o >actuar< otro dispositivo mecánico. La fuerza se genera cuando se hace pasar electricidad por el cuerpo del actuador, generando un calentamiento que produce una dilatación y/o expansión térmica. Según vaya quitándose la alimentación de corriente, este regresa a su posición de reposo hasta enfriarse totalmente (Castelblanco et al, s.f). Este tipo de dispositivos se utilizan principalmente para el encendido-apagado en sistemas de calefacción, refrigeración y en equipos de centrifugado. En la **Figura 38**, se ilustra un termoactuador tipo, utilizado en los dispensadores de jabón de una lavavajilla.

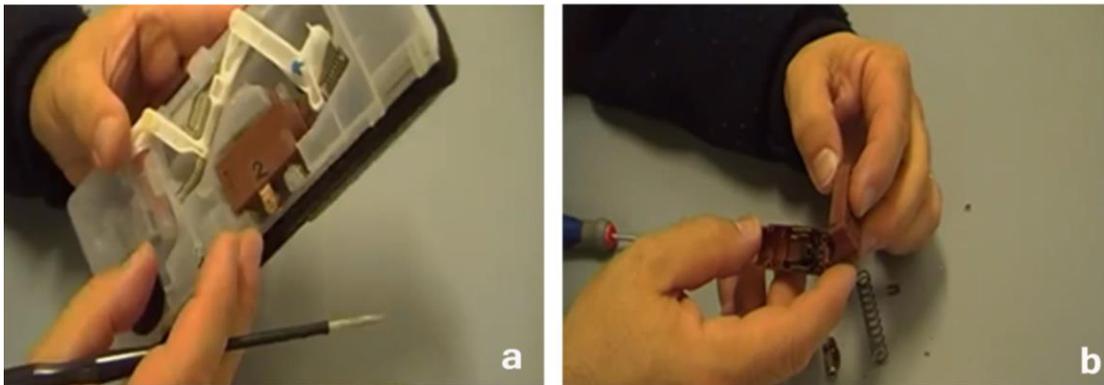


Figura 38.-a) Termoactuador visto desde el interior del dispensador; b) Partes y componentes del termo actuador. Fuente: Imágenes recuperadas del video “Termo actuador de la jabonera del lavavajillas en <https://www.youtube.com/watch?v=dhfAvADC4Fc>”.

Para operar este tipo de dispositivos, se requiere de elementos adicionales que llevan a cabo una serie de funciones o acciones para el cumplimiento de una operación o manipulación, denominados sistemas de control. Los elementos básicos que conforman un sistema de control son:

- *Sistema:* Son una combinación de componentes que actúan conjuntamente, y cumplen determinado objetivo, reciben datos de entrada, energía o materia, y proveen como salida información, energía o materia.

- *Sensores.* Su función es monitorear y detectar magnitudes físicas o químicas, del entorno para transformarlas en variables eléctricas, que son procesadas por el controlador >un caso común son los sensores de temperatura<.
- *Controlador.* Es la central que gestiona el sistema, utiliza los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control.
- *Actuador.* Es el dispositivo que ejecuta la acción ordenada por el controlador, con la finalidad de generar cierto efecto sobre un proceso de automatizado.

La **Figura 39** representa un diagrama de bloques, que caracteriza y simplifica el funcionamiento de un sistema de control convencional (Moya, 2015).

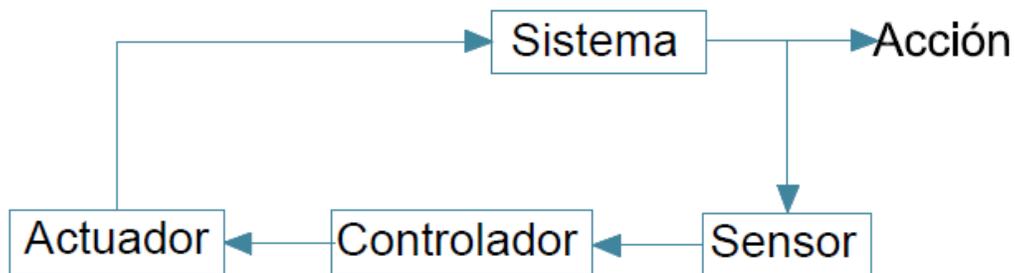


Figura 39.-Diagrama de funcionamiento de un sistema de control convencional.

Principio de funcionamiento del accionador solar >Termoactuador solar<

El termoactuador propuesto, utiliza un resorte de Ni-Ti con efecto de memoria de forma, convierte la radiación solar en energía cinética; mediante una envolvente de vidrio se capta y transmite la energía en forma de calor hacia el resorte para aumentar su temperatura por arriba de los 40°C y provocar su contracción, lo que genera una fuerza de tensión y compresión que desplaza un émbolo para producir movimiento.

Cuando el resorte deja de recibir energía, comienza a enfriarse y estirarse paulatinamente en el sentido contrario; toda vez que al disminuir su temperatura presenta menos resistencia a la tracción en el sentido opuesto, esto le da al émbolo, la libertad de regresar a su posición inicial, como lo hiciera un pistón neumático. En las fotografías de la **Figura 40** se ilustra el accionador solar, su forma se asemeja al amortiguador de un vehículo.



Figura 40-a) El resorte a temperatura ambiente tiende a estar estirado, manteniendo al émbolo desplazado. b) Cuando la temperatura del resorte está por arriba de los 50°C tiende a estar comprimido, manteniendo al émbolo al interior del tubo de vidrio.

Ambas acciones en el resorte, generan una fuerza de tensión, capaz de arrastrar una carga, combina la función de actuador y sensor, sin necesidad de ser alimentada por energía eléctrica. En la **Figura 41** se muestra el diagrama de funcionamiento del sistema, este arreglo hace posible prescindir de un procesador que controle las acciones, se realizan de manera directa y combinada, lo que define el dispositivo como un sistema de control inteligente.

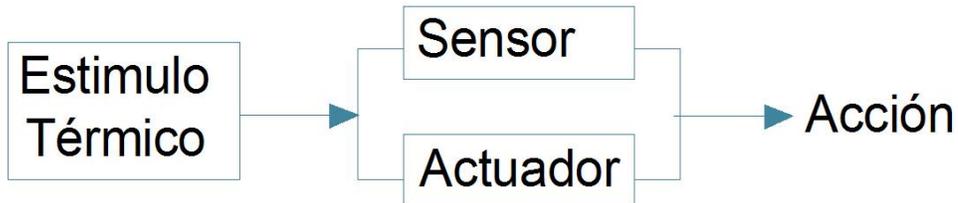


Figura 41.- Diagrama de funcionamiento del termoactuador solar propuesto

El sistema de control inteligente se define como un proceso, que puede ser operado y controlado automáticamente sin la interferencia humana, debe estar provisto con la capacidad de ejecutar tareas específicas, integra una memoria que le permite recordar las acciones que debe ejecutar (Quintero, 2009, págs. 32-33).

Partes y componentes del accionador solar

Tubo de vidrio

Está fabricado en vidrio transparente de 2.5 mm de espesor, su diámetro exterior es de 1.5 cm, el interno de 1 cm, su longitud es de 10 cm. Hace la función de captador solar y la transfiere a en forma de calor al resorte de Ni-Ti para provocar que contraiga al aumentar su temperatura por arriba de los 50°C.

Para lograr la refracción de los rayos del sol, a partir de su eje central en el sentido longitudinal, se matizó con pintura esmalte color cromo una mitad del tubo, quedando la otra mitad traslucida para permitir el paso de la luz al ser expuesto a la incidencia solar. La **Figura 42** muestra el tubo, en la primera imagen se observa totalmente traslucido, y en la segunda fotografía se muestra con la capa de pintura.

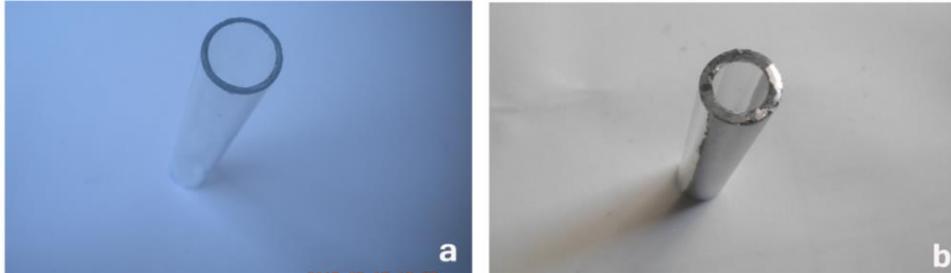


Figura 42.- a) El tubo se muestra traslucido; b) El mismo tubo después de ser pintado.

Resorte de Ni-Ti

Se utilizó un resorte de expansión con efecto de memoria de forma, sus características físicas corresponden al resorte de Ni-Ti utilizado en la etapa experimental [ver en *Capítulo III- Selección del material con memoria de forma*]. Es el elemento principal del termoactuador >es sensor y actuador<, permite que el mecanismo tenga un movimiento alternativo en línea vertical.

Al estar a una temperatura similar a la del ambiente, presenta menos resistencia a la tensión, por ello, conforme se equilibra su temperatura con la del medio, tiende a estirarse y a arrastrar el émbolo al ser jalado por el peso del elemento a desplazar [panel solar y ventilas de la persiana] utilizado como contrapeso [conserva esta posición siempre y cuando su temperatura se mantiene a temperatura ambiente]. Al ser calentado por la temperatura que se concentra al interior del tubo, recupera su forma contraída, arrastrando el émbolo hacia el interior del cilindro por una fuerza que se produce en sentido contrario, que es transmitida al eje del seguidor y al mecanismo de la persiana en forma de movimiento.

En la **Figura 43** se muestra el resorte en sus dos formas, la *fotografía a* ejemplifica la configuración inicial del resorte estando su temperatura por debajo de la M_f , forma que recobra cuando está deformado y es calentado por encima de la temperatura A_s ; en la *fotografía b* se muestra la forma que adquiere al ser deformado estando a temperatura M_f , forma que conserva hasta no ser calentado por encima de la temperatura A_s .

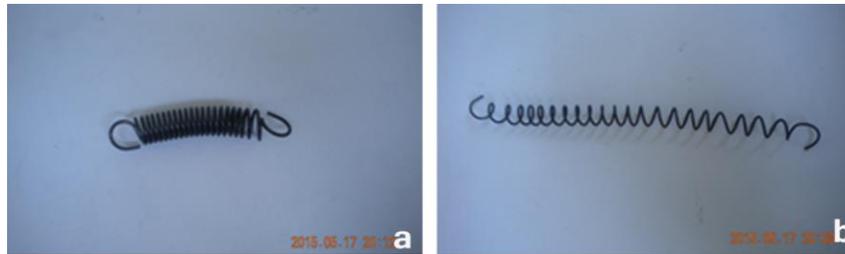


Figura 43.- *a)* El resorte se muestra manteniendo su forma original. *b)* El resorte se ha deformado al aplicarle una fuerza de tracción.

Émbolo

Es una pieza de forma cilíndrica fabricada en aluminio, tiene una longitud de 7 cm y diámetro de 8 mm, su función es transmitir movimiento al elemento a desplazar. En la parte superior tiene alojado un perno que asegura el resorte de Ni-Ti, el otro extremo es un cabezal que se sujeta al mecanismo a direccionar [eje del panel solar y de la ventana]. Entre el cuerpo y el cabezal lleva una arandela que evitar que la pieza sea introducida por completo al interior del tubo. La posición del émbolo dependerá del estado del resorte [si se encuentra contraída el resorte, el émbolo se aloja al interior del tubo, si está alargada el émbolo se mantiene fuera del tubo]. Las fotografías de la **Figura 44** muestran dicha pieza.



Figura 44.-Émbolo en vista superior; *b)* Émbolo en vista lateral.

Sujetador

Es una pieza moldeada en aluminio, su diseño presenta características semejantes al émbolo [en menor tamaño], su longitud es de 1 cm y su diámetro exterior de 1.5 cm. Por la parte superior sujeta al resorte manteniéndolo al interior del tubo y evitar que se libere al ser estirado por el embolo durante el desplazamiento; por el extremo inferior asegura al accionador a un soporte de fijación. En la **Figura 45**, se muestra en fotografías del sujetador.



Figura 45.- a) Sujetador en vista superior; b) Sujetador en vista lateral

Soporte de fijación y accesorios

El soporte de fijación >Figura 46-a< es una pieza de forma acanalada, forjada en aluminio, su dimensión es de 2 x 2.5 cm, asegura el sujetador del accionador en el sentido horizontal, en el sentido vertical fija el dispositivo sobre una base para dar estabilidad y seguridad al dispositivo. En el ensamble se utilizaron tornillos estandarizados de acero de 1/8 in con tuercas de tipo hexagonal y de longitudes variables >Figura 46-b<.



Figura 46.-a) Soporte de fijación; b) Tornillería utilizada.

La fotografía de la **Figura 47** presenta el accionador solar ensamblado con cada una de las piezas descritas.



Figura 47. Accionador solar ensamblado e identificando cada una de sus partes.

Entre las ventajas, por las que este accionador destaca de otros sistemas de automatización, es su arquitectura considerablemente simplificada, sus partes son piezas estandarizados que pueden ser ensamblados de forma sencilla y fabricados en grandes lotes. La **Figura 48** corresponde a fotografías inéditas, de la presentación del dispositivo en el 5to. Congreso de Posgrado UNAM 2015, como producto de innovación científica y tecnológica.



Figura 48.-Presentación del accionador solar en el 5to. Congreso de Posgrado UNAM 2015. Unidad de Posgrado UNAM.

Determinación de la eficiencia térmica del accionador

Para conocer la cantidad de energía que concentra del accionador, se evaluó su eficiencia térmica, esto refiere a la medición de energía, necesaria para aumentar 1°C la temperatura de 1 kg de masa de un cuerpo sólido, cuando es sometido a una presión. Para que 1 kg de masa aumente 1°C su temperatura a presión normal, es necesario suministrar 4.180 Joule de energía calorífica.

Teniendo datos como la masa del resorte, su capacidad calorífica específica y ΔT es posible calcular la cantidad energía absorbida [Qv], mediante la siguiente fórmula:

$$Qv = m \cdot cv \cdot \Delta T$$

Donde:

Qv =Energía absorbida

m = Masa del resorte de Ni-Ti

cv = Calor específico del resorte

ΔT = $T_f - T_i$ [temperatura final menos temperatura inicial del sistema]

Sabiendo que la masa del resorte es de 350 gr, su calor específico de 0.20 cal/g°C, la temperatura promedio de inicio es de 25°C y la máxima concentrada durante las pruebas fue de 48.5°C. Con la sustitución de los valores en la formula nos queda la siguiente ecuación.

$$Qv = 350 \text{ gr} (20 \text{ cal/g}^\circ\text{C})(48.5^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 164.5 \text{ cal}$$

Como resultado se obtiene que la energía absorbida por el resorte es de 164.5 cal. Una caloría -cal- equivale a 4.1868 joule -J-. El joule se define como la cantidad de trabajo, realizado por una fuerza constante de un newton en la misma dirección de la fuerza. Con estos datos fue posible obtener la ganancia térmica del dispositivo mediante la siguiente formula

$$\eta = (Qv/t \text{ J})/a.T$$

Donde:

η =Eficiencia de conversión

t =Tiempo requerido para llegar a la temperatura de transición de fase del resorte

J =Joule [cantidad de energía como unidad de trabajo]

a=Área del colector

T=Radiación solar promedio del lugar [Estado de México].

Determinado la energía absorbida [Qv] que equivale 164.5 cal, se utilizó la fórmula de eficiencia de conversión, para determinar la ganancia de calor del área de concentración solar. El tiempo mínimo de calentamiento, que requiere el dispositivo para alcanzar la temperatura que activa el funcionamiento de dispositivo, es de 1200 seg aproximadamente, la radiación del lugar es de 650 w/m^2 , el área del colector es de 0.01 m^2 .

Aplicando la sustitución de valores en la fórmula se obtiene:

$$\eta = ((164.5 \text{ cal})/1200\text{seg}(4.1868))/(0.01\text{m}^2 (650\text{w/m}^2))=0.088$$

Este valor obtenido representa el porcentaje de la eficiencia de conversión en un área de 10 cm^2 , área que corresponde a la superficie del tubo utilizado como colector. Esto indica que se tiene una eficiencia térmica de un 8% en una escala del 0 al 100, aprovechando la energía radiada por el sol como fuente de calor.

Partes y componentes del seguidor solar

En la etapa de pre diseño del prototipo se consideró llegar a un modelo físico a pequeña escala, para minimizar en tiempo, recursos técnicos y costo, para su construcción se utilizaron, principalmente autopartes de otros mecanismos en desuso. Las partes que conforman el modelo son:

Rótula mecánica

La rótula es un vástago de alineación, que se utiliza para dar independencia de movimiento multidireccional a las ruedas de un vehículo, permite mover de un lado a otro la dirección, y de arriba hacia abajo el sistema de suspensión. Se conforma de dos piezas, un mango de forma cilíndrica que tiene una longitud de 20 cm y un diámetro de 1.2 cm, cuya parte inferior termina en forma roscada y la superior es una esfera. La otra parte es una pieza de articulación ahuecada y cóncava, de forma semicilíndrica de 3 x 3 cm que se reduce a una forma roscada hasta los 2 cm. Se optó por integrar la rótula como elemento de articulación para el panel fotovoltaico, por su ventaja de poder generar giros completos [360°], permitiendo orientar la celda, tanto en el sentido horizontal como azimutal. El mango es aprovechado como soporte para mantener alineado el eje del seguidor. La **Figura 49** ilustra la rótula utilizada.



Figura 49.-La primera imagen presenta las dos piezas que conforman la rótula. La sucesión fotográfica muestra, algunas de las posiciones que es posible conseguir con la articulación.

Eje de dirección

Es una estructura geométrica de 3 mm de espesor, se diseñó en forma de cruceta con tres brazos que se forman por la intersección de dos barras que se mantienen con un ángulo de 90° . En el extremo de cada brazo, se ha dejado una preparación para el montaje y fijación de los accionadores. Los brazos laterales generan movimiento en sentido horizontal y el brazo central en sentido vertical. El último extremo forma un medio círculo, cuyas dimensiones coinciden con el radio del módulo fotovoltaico, esta superficie sirve de base para el montaje de los resortes de acero que equilibran y amortiguan el movimiento del panel. En el centro de las crucetas se tiene un paso por el que atraviesa el vástago de la rótula que cruza en sentido vertical. En la **Figura 50** se muestra el modelo esquematizado.

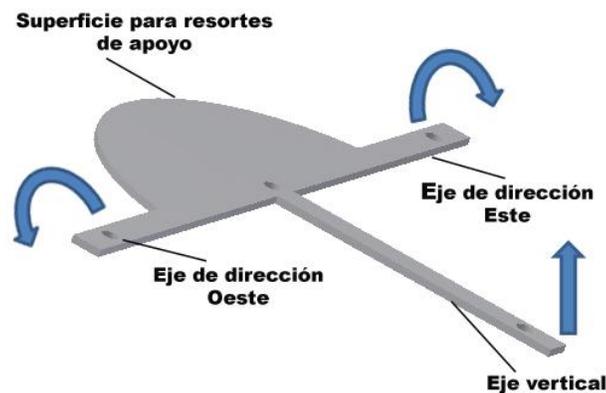


Figura 50.-Eje de dirección del seguidor solar diseñado en Inventor

Resortes tensores

Fue necesario implementar un sistema de tensores, que ayuden al panel solar regresar a su posición inicial, cada vez que termine un ciclo de movimiento. Estos resortes están montados en la periferia del área circular del eje, equilibran, amortiguan y absorben las vibraciones generados durante el movimiento. Se utilizaron resortes de acero tipo estándar, fabricados con alambre de acero de 1 mm de espesor, espiras de tipo cerrado de 7 mm de diámetro, su longitud en estado de reposo es de 5 cm, en cada extremo llevan ganchos de tipo espiral cerrado para su sujeción. La imagen de la **Figura 51** muestra una fotografía de los resortes.



Figura 51.-Resorte helicoidal de acero utilizado como sensores.

Sistema de control

Es el elemento principal del sistema, su función es dotar de movimiento el panel fotovoltaico. Para mover el panel en dirección Norte-Sur, se tiene instalado un accionador en el eje que se mantiene perpendicular al eje horizontal, haciendo que el giro se ajuste, para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al sol, la referencia del ángulo vertical es la horizontal = 0° , mientras que en la vertical 90° .

Sobre los ejes laterales, se instaló un segundo y un tercer accionador, permiten al panel girar de Este a Oeste, el ángulo horizontal tiene como referencia el Norte y va en sentido horario, con respecto al Norte = 0° , en el Este y Oeste = 90° . En la **Figura 52** se visualizan las dos posiciones del accionador durante su operación, en la *figura a* la temperatura del resorte está por arriba de los 50°C [se mantiene el émbolo en reposo], en la *figura b* la temperatura del resorte está a menos de 25°C [el émbolo se posiciona fuera del tubo].

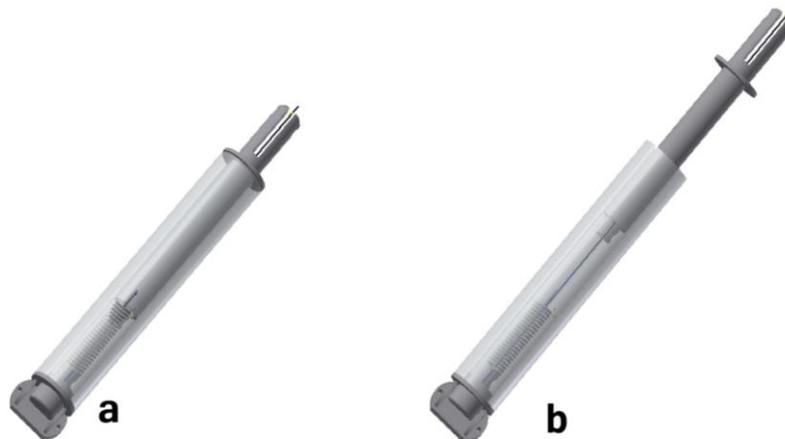


Figura 52- *a*) Posición que mantiene el émbolo estando contraído el resorte, al estar su temperatura por arriba de 50°C ; *b*) Posición del émbolo cuando la temperatura del resorte está a menos de 25°C , en esta configuración el panel está orientado hacia alguna dirección [Este, Oeste o Vertical]. Modelado virtual realizado en Inventor.

Módulo fotovoltaico

Como pieza de soporte para la instalación de las celdas fotovoltaicas se reutilizó la base de un monitor de computadora. Por su forma circular a partir de su centro se trazaron dos ejes imaginarios, en sentido horizontal y vertical, tomando como referencia las coordenadas x, y, z se estableció el punto de ubicación de los accionadores.

El acople con la parte giratoria de la rótula se hizo aprovechando el roscado interior y central de la pieza, por esta misma salida se prevé que serán conducidos los cables de conexión de las placas solares. La superficie aprovechable es de 0.043 m², área contemplada para instalar cuatro mini paneles de 10 x 10 cm con una potencia de salida de 0.5 Watts de energía por cada panel, su peso aproximado con el sistema fotovoltaico instalado es de 70 gr. El soporte original se muestra en la **Figura 53-a**, se utilizó como arquetipo para el modelado virtual de la propuesta final del soporte que se esquematiza en la **Figura 53-b**.

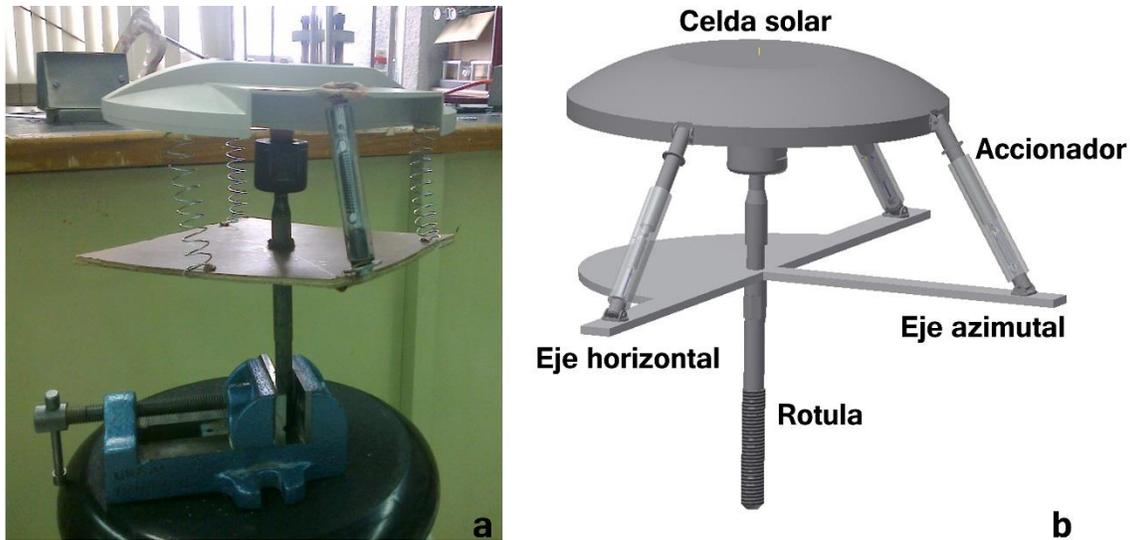


Figura 53.-a) Soporte de monitor; b) Modelado virtual del soporte, desarrollado en Inventor.

Propuesta de seguidor solar prototipo

En la **Figura 54** se presenta el seguidor solar desarrollado, la imagen del lado izquierdo >figura a< corresponde al modelo físico construido para pre-evaluar el funcionamiento de un accionador solar y determinar las adecuaciones necesarias antes de llegar al modelo final. Este arreglo asentó las bases de diseño para pasar a un modelado virtual del prototipo, mismo que se visualiza en el esquema del lado derecho >figura b<. Se generó como propuesta un seguidor solar de dos ejes de movimiento, cuyo sistema principal lo constituyen tres accionadores solares que le dan movimiento y que no requieren utilizar actuadores

electromecánicos ni sensores de movimiento, lo que permitió desarrollar un sistema de control de desplazamiento totalmente autónomo.



Aplicación arquitectónica del seguidor solar

Para optimizar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos existen dos alternativas. La primera implica, descubrir nuevos materiales que permitan captar y transferir la energía térmica con mayor eficiencia. La otra opción es incrementar la cantidad de radiación recibida por las celdas solares, esto compromete a mantenerlos orientados, de tal forma que permanezcan perpendiculares a los rayos del sol durante el día. Implica integrar un mecanismo de movimiento, cuya finalidad se pretende cumplir con la propuesta de aplicación del seguidor solar, al ser incorporado en los espacios arquitectónicos como complemento en la generación de energía eléctrica.

Este seguidor trabaja de manera independiente de los sistemas convencionales, utiliza energía térmica como combustible, sinónima de optimización de recursos económicos y ambientales; su particularidad es que emplea un control pasivo de movimiento. La simplicidad en su diseño y construcción permite su fácil instalación por un técnico que no requiere de conocimiento especializado en automatización, sino simplemente entendimiento en tecnología solar.

Se contempla implementar la aplicación del sistema, en la generación de energía para la iluminación en carreteras, vialidades urbanas, espacios abiertos como estacionamientos y plazas públicas o como sistema complementario de la red eléctrica, al ser instalados en azoteas de viviendas y edificios, incluso para llevar electricidad a zonas rurales y marginadas del país. En la **Figura 55** se presentan algunas fotografías que ilustran propuestas de aplicación; las imágenes de la parte superior muestran su instalación en la azotea de una vivienda unifamiliar; en la parte inferior se propone su adaptación a un poste de iluminación alimentado por una celda solar y que comúnmente se instalan de manera fija.



Figura 55.-Posibles aplicaciones del seguidor solar. Parte superior: Instalación del seguidor en una vivienda unifamiliar; Parte inferior: Adaptación del accionador solar en celdas fotovoltaicas utilizadas para la iluminación de carreteras.

Accionador solar como mecanismo de apertura y cierre para ventanas

Habiendo detectado el mal funcionamiento de la ventana descrita en el apartado 1.3 del *Capítulo I*, [denominado como persianas inteligentes], diseñado para abrirse y/o cerrarse automáticamente, acorde a la variación de la temperatura del medio ambiente. Debido a que el dispositivo requiere alcanzar temperaturas superiores a 120°C para funcionar, y que no se logra alcanzar exponiéndolo a la intemperie, se llegó a la siguiente propuesta.

Utilizar el accionador como mecanismo de apertura y cierre de las ventilas, puesto que actúa como un sistema neumático, transforma la energía en una fuerza mecánica, tomando en cuenta que la operación del mecanismo de articulación del seguidor y de la ventana se basan en el efecto térmico de las AMF.

En el rediseño de la persiana, el accionador solar fue montado en el extremo inferior izquierdo del marco de la ventana, el émbolo desplazable está fijado a la estructura de dirección de movimiento de los vidrios, el sujetador fijo está unido a un ángulo de acero anclado al marco de la ventana, el dispositivo se mantiene con una inclinación de 30° a 45°, para recibir una buena cantidad de la radiación solar.

En el extremo superior derecho, se fijó verticalmente un resorte helicoidal convencional de acero, está sujeto entre la estructura movable y el marco fijo de la ventana, su función es generar un contrapeso que ayude a replegar los vidrios al cerrarse, posición que mantienen las ventilas, cuando la temperatura del accionador está a temperatura ambiente [a menos de 25°C].

Entre sus ventajas destaca su mantenimiento, el cual es mínimo, solo es asegurar que ningún obstáculo haga sombra sobre el dispositivo, y por el otro, mantener limpia la parte expuesta a los rayos solares, se puede evitar mediante aseo con agua después de un largo periodo sin lluvia.

Las fotografías de la **Figura 56**, muestran la nueva propuesta de la ventana; en la >imagen a< se observan las rejillas plegadas; en la >imagen b< los vidrios comienzan a desplegarse conforme transcurre el tiempo de exposición a la incidencia solar.



*Figura 56.-Nueva propuesta de la ventana inteligente, se ha utilizado el accionador solar como mecanismo cierre y apertura automática. **a)** Las ventilas, se mantienen cerradas cuando la temperatura del accionador es equiparable a la del ambiente; **b)** Las ventilas se muestran abiertas, posición que mantienen cuando la temperatura del accionador está por arriba de los 50°C.*

Aplicación arquitectónica de la ventana

El sobrecalentamiento es un fenómeno que se produce en un espacio cerrado, al transformarse la energía solar incidente en energía térmica. Este fenómeno provoca que en los edificios con las fachadas expuestas a la insolación, se alcancen en su interior

temperaturas superiores a las del ambiente; es un hecho que las condiciones de temperatura o confort térmico deben ser vitales, para que los usuarios puedan realizar sus actividades de manera adecuada.

En la actualidad, para contrarrestar el sobrecalentamiento y la reducción de la sensación de calor, se recurre a la utilización de climatizadores artificiales. Sin embargo en este tipo de soluciones, es necesario recurrir a la instalación de dispositivos electro mecánicos, que regulan la temperatura para conseguir un ambiente agradable. El inconveniente de estos sistemas, es el alto consumo de energía que demandan, por tal cuanto más energía se requiere para alcanzar y mantener las condiciones de confort, menos eficiente será su sistema de climatización, en términos energéticos y mayor será su impacto ambiental.

La implementación de las ventanas, es una estrategia de enfriamiento pasivo, ya que aprovecha la energía solar para abrir y cerrar un sistema de ventilas sin utilizar dispositivos electrónicos, permitiendo así el ingreso de aire frío y la salida de aire caliente del interior de los espacios no ventilados. Su aplicación cobra mayor relevancia, en los lugares que durante todo el año o la mayor parte, se tienen temperaturas elevadas. Reduce el consumo en energía, lo que implica un ahorro en gasto de electricidad por climatización, al ser un sistema que no requiere de algún tipo de energía artificial para funcionar. Su finalidad es la renovación del aire a través de las ventanas abiertas durante el día.

Su diseño estandarizado permite adaptarlo a edificaciones existentes o ser considerados desde la etapa de diseño para contrarrestar la mala ventilación, que puede deberse porque las ventanas se localizan en una orientación inadecuada, o simplemente por estar situadas en un lugar incomodo, o fuera del alcance para abrirse manualmente. Otras ventajas que destaca en comparación con los sistemas mecánicos, es su bajo costo en mantenimiento y tampoco es una fuente de contaminación por ruido, al no emplear motores. Las fotografías que se presentan en la **Figura 57**, muestran una fachada de vivienda con las ventanas instaladas como una alternativa de climatización, visualmente es un elemento arquitectónico integrado al diseño, en la >imagen a<, se observan las ventilas cerradas, estado que mantienen durante la mañana o periodos de frío, la >imagen b<, muestra las hojas de vidrio abiertas, posición que mantienen cuando se eleva la temperatura al interior del inmueble.



Figura 57.-Propuestas de aplicación e integración de las persianas en un espacio habitable **a)** La ventilas se muestran cerradas. **b)** Las ventilas se mantienen abiertas. Fuente: Imágenes obtenidas de Persianas inteligentes, cortesía del Centro Tecnológico de la FES Aragón.

Conclusiones

Con la presente investigación se llegó al desarrollo de un accionador solar, que aprovecha el efecto de memoria de forma de un resorte de Ni-Ti. Dicho dispositivo es capaz de poner en movimiento una placa fotovoltaica instalada de manera fija, además, su diseño permite incorporarlo como elemento de apertura y cierre automático para una ventana tipo persiana. Funciona aprovechando la energía térmica proveniente de la radiación solar y su implementación como mecanismo de movimiento, permite prescindir del empleo de controladores electromecánicos.

Los diferentes experimentos realizados al resorte de Ni-Ti, permitieron estimar su temperatura A_s de transformación la cual en promedio es de 29.6°C . En las distintas pruebas realizadas fue posible determinar que el método de encapsulamiento permite elevar la temperatura en su interior hasta aproximadamente 50°C , mientras se mantiene la temperatura en el ambiente en 25°C .

Este accionador puede catalogarse como un sistema de control inteligente, debido a que el resorte de Ni-Ti, combina la acción de actuador y sensor ante la variación de la temperatura del medio ambiente. En un futuro puede ser una solución para la generación de energía en los sistemas híbridos y en la automatización de parteluces y rejillas de aire acondicionado.

La factibilidad económica del prototipo para el seguimiento solar se estima confrontando su precio de fabricación, \$2540.50 [dos mil quinientos cuarenta pesos 00/100 m.n], contra el valor de un seguidor que funciona utilizando un sistema de microprocesador electrónico, con un costo de \$22,500.00 [veintidós mil quinientos pesos 00/100 m.n]. Mediante esta comparativa, se determinó que el ahorro es de un 88%. La fabricación del prototipo de la persiana inteligente, tuvo un costo de \$1497.50 [un mil cuatrocientos noventa y siete pesos 50/100 m.n].

Finalmente, cabe mencionar que este estudio permite confirmar que los nuevos materiales ofrecen aplicaciones prometedoras en el campo de la arquitectura. Y que adicionalmente se requiere de un trabajo multidisciplinario para permitir que cada material descubierto o desarrollado, pueda ser aplicado de manera más ágil y con ello establezca nuevas posibilidades de diseñar y construir mejores espacios arquitectónicos. Tal es el caso del presente estudio ya que se realizó una vinculación entre dos Instituciones de España y México; el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, y la Universidad Nacional Autónoma de México.

Bibliografía

- Álvarez, A. (2011). *Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. Madrid: Escuela Universitaria de Óptica.
- Apac et al. (s.f). *Sistema optimizado de adquisición de energía solar por el método de seguidores solares*. Peru: Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Ricardo Palma .
- Armendariz, J. E. (2013). Dual-Axis Solar Tracking Controller Based on Fuzzy-Rules Emulated Networks and Astronomical Yearbook Records. *I*, 7.
- Castelblanco et al. (s.f). *Fabricación de un microactuador Electro-Térmo-Mecánico para la manipulación de Fibras Ópticas*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Clifford, M. (2004). Design of a novel passive solar tracker. (M. a. School of Mechanical, Ed.) *Elsevier*, pags.12.
- Cortés, P. J. (2007). *Modelación matemática de la transformación martensítica inducida por esfuerzo*. México. Espinoza. (2007). *Transformación martensítica y efecto memoria en materiales micro y nanoestructurados*. Argentina: Comisión Nacional de Energía Atómica. Universidad Nacional de Cuyo.
- Fernández-Balbuena, A. Á. (2011). *Sistemas ópticos para concentración, captación y guiado de radiación solar*. Madrid: Escuela Universitaria de óptica. Univerdidad Computense de Madrid.
- Flor, L. S. (2005). *Simulación numérica y correlación experimental de las propiedades mecánicas en las aleaciones con memoria de forma*. Barcelona: Universidad Politécnica de Valencia.
- Flores, A. (2012). *Viabilidad de calentadores solares de agua con seguidor de trayectoria solar*. (UNAM, Ed.) México, D.F, México: Facultad de ingeniería. Mécanica mecatrónica.
- García, S. I. (2009). *Diseño de persianas inteligentes a partir del comportamiento termomecánico de los materiales con memoria de forma*. (F. d. Aragón, Ed.) México, D.F, México: UNAM.
- Gómez, M. R. (2013). *Seguidor solar para un concentrador cilíndrico parabólico*. México: FES aragón UNAM.
- Guardado, G. D. (2012). *Implementación de seguidor solar en dos ejes para el sistema fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES*. (U. d. Salvador, Ed.) El Salvador: Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Guihua Li et al, R. ., (2012). Optical Performance of Horizontal Single-Axis Tracked Solar Panels. (S. E. University, Ed.) *Energy procedia*, 9.
- Hernández, M. S. (2011). *Control de posición de un material con memoria de forma (SMA)*. Madrid: Universidad Carlos III.
- Images. (2015). *Nitinol Heat Engine Kit*. Scientific Instrument.
- José. (2007). *Prototipo fotovoltaico con seguimiento del Sol para procesos electroquímicos*. Cuernavaca, Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Koussa et al. (2011). Measured and modelled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions. (P. B. Center of Renewable Energy Development, Ed.) *Applied Energy*.
- Lechuga, R. (2011). *Diseño de una válvula economizadora de agua empleando materiales con memoria de forma*. México: Facultad de Estudios Superiores Aragón.
- Magaña et al. (2010). *Diseño de un seguidor solar para eficientar la captación de la energía solar en los paneles fotovoltaicos*. Guadalajara: Instituto Tecnológico Superior de Arandas.
- National Geographic. (2013). Energía solar. *National Geographic Society*.
- Ochoa, F. R. (2012). *Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector scheffler*. (U. C. ingeniería, Ed.) Peru.
- Paredes, V. C. (2012). *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*. Paraguay: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas.
- Pintos, L. C. (2010). *Seguidor solar ligero para cubiertas*. (ICAI, Ed.) Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Quintero, H. L. (2009). *Un modelo de control inteligente para sistemas de manufactura basado en los paradigmas Holónico y Multi-Agente*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Ríos, C. J. (2013). *Evaluación de la eficiencia térmica de aleaciones con memoria de forma típicas para su uso en distintos dispositivos recuperadores de energía*. . (UNAM, Ed.) D.F, México: Facultad de Estudios Superiores Aragón.

Yakamaushi K et al. (2011). *Shape memory and superelastic alloys. Technologies and applications*. Hong Kong, China: Woodhead Publishing.

Mesografía

- AdDat (12 del 11 de 2013). *Introducción a las Aleaciones con Memoria de Forma: el Nitinol*. [En línea]. Recuperado el 22 de Julio de 2015 en <https://adquisiciondedatos.wordpress.com/2013/11/12/introsma/>
- Batanga. (2013). *Un futuro esperanzador para la energía solar*. [En línea]. Recuperado el 26 de Julio de 2014 en <http://www.ojocientifico.com/4156/un-futuro-esperanzador-para-la-energia-solar>
- Motor pasión. (2009). *GM investiga cómo sacar energía del calor de escape*. [En línea] Recuperado el 24 de 04 de 2015 en <http://www.motorpasion.com/tecnologia/gm-investiga-como-sacar-energia-del-calor-de-escape>
- Moya (2015). *Control-Sistemas-Variables*. [En línea] Recuperado el 22 de 03 de 2015, en <http://thecontrolengineer-ep.wikispaces.com/Control-Sistemas-Variables>
- Yarzabal (2014). *Metales con memoria: el Nitinol y un truco que te vuela el cerebro*. [En línea] Recuperado el 12 de Abril de 2015 en <http://curiosidades.batanga.com/7253/metales-con-memoria-el-nitinol-y-un-truco-que-te-vuela-el-cerebro>

Glosario

Acimut: Angulo o longitud de arco medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador situado en alguna latitud.

AMF: Aleaciones con Memoria de Forma.

Austenita: Fase que se presenta durante el calentamiento de un metal, en el caso de las AMF puede recuperar su forma inicial, después de haber sido deformado en estado martensita.

Deformación plástica: Es la propiedad mecánica de un material de deformarse, permanente o irreversiblemente, cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su límite elástico.

Difusión: Proceso físico irreversible, en el que partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente estaba ausente, aumentando la entropía [desorden molecular] del sistema conjunto, formado por las partículas difundidas o soluto y el medio donde se difunden o disuelven.

Displasiva: Movimiento atómico en el que los átomos se reacomodan para formar una nueva estructura, sin sufrir cambios químicos.

Endotérmico: Proceso químico o físico que necesita un aporte de energía en forma de calor para tener lugar.

Entalpia: Es una magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Exotérmico: Proceso químico o físico que se produce con desprendimiento de energía.

Irradiación: Término que se usa para determinar la cantidad de energía que se capta en un área [en su caso la radiación solar que cae en la superficie terrestre].

Histéresis: Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

Martensita: Fase que tiene lugar durante el enfriamiento de un material austenizado, en su caso la AMF se puede deformar fácilmente sin sufrir deformación plástica permanente [puede recuperar su forma mediante la aplicación de calor].

Nitinol: Aleación de Ni-Ti, se caracteriza por presentar la propiedad de memoria de forma.

Transductor: Dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente a la salida.

Transformación martensítica: Es un tratamiento térmico cuyo objetivo es alcanzar altas cotas de endurecimiento, debido a un drástico cambio en su estructura perlítica hasta alcanzar la martensita.

Anexos

A-01: Análisis de costo del accionador solar

El desarrollo de un nuevo producto ante todo debe mostrar factibilidad técnica y económica, esto significa, que la inversión que se está realizando es justificada por la ganancia o beneficio esperado. Para ello es necesario trabajar con un esquema que contemple el análisis de costos del producto. En la **Tabla 7** se presenta un desglose de las partidas contempladas en la fabricación del accionador solar.

Tabla 7.-Este presupuesto desglosa el costo del accionador solar.

Concepto	Cantidad	Unidad	PU	Total
Tubo de vidrio transparente.	1	pieza	\$75.00	\$75.00
Resorte de Ni-Ti con efecto de memoria de forma.	1	pieza	\$450.00	\$300.00
Émbolo desplazable fabricado en aluminio.	1	pieza	\$150.00	\$100.00
Sujetador fabricado en aluminio.	1	pieza	\$100.00	\$75.00
Soporte de fijación fabricado en aluminio.	1	pieza	\$50.00	\$50.00
Tornillos de acero de 1/8 in, incluyen tuercas tipo hexagonal.	3	pieza	\$1.50	\$1.50
Esmalte acrílico en aerosol.	1	pieza	\$45.00	\$45.00
Mini cortadora de tubo de cobre, utilizado para seccionar tubo a la medida requerida.	1	pieza	\$120	\$120.00
Costo total del producto				<u>\$691.50</u>

El costo total del accionador es de **\$691.50** [seiscientos noventa y uno pesos 50/100 m.n].

A-02: Análisis de costo del prototipo de seguidor solar

Para la construcción del seguidor solar se adquirieron y/o fabricaron piezas, las cuales tuvieron un costo económico. En la **Tabla 8** se presenta un listado de los materiales, cantidades, P.U y la suma global que permitió conocer el costo total.

Tabla 8.- Este presupuesto desglosa el costo del seguidor solar.

Concepto	Cantidad	Unidad	PU	Total
Accionador solar para sistema de control.	3	pieza	\$691.50	\$2071.50
Rotula mecánica de acero empleado como mecanismo de articulación.	1	pieza	\$10.00	\$10.00
Resorte de acero convencional tipo helicoidal.	3	pieza	\$6.00	\$18.00
Módulo fotovoltaico de 10 x 10 cm [No se adquirieron, pero se contempla su precio como parte del prototipo].	4	pieza	\$110.00	\$440.00
Base para montaje de panel solar [soporte de monitor de PC].	1	pieza	\$1.00	\$1.00
Tornillos de acero de 1/8 in, incluye tuercas.	15	pieza	\$1.50	\$22.50
Costo total del seguidor solar				<u>\$2,540.50</u>

El costo total del accionador es de **\$2540.50** [dos mil quinientos cuarenta pesos 00/100 m.n].

Mediante un análisis de costo, entre el seguidor solar que emplea un resorte de Ni-Ti como sistema de control de movimiento, que demandó una inversión de \$2,540.50 [Dos mil quinientos cuarenta pesos 50/100 m.n], se equiparó con el modelo que presenta José Beltrán, operado mediante un sistema electrónico micro procesado, el cual tuvo un costo \$22,500.00 [Veintidós mil quinientos pesos 00/100 m.n], (José, 2007, págs. 43-56). Se determinó que trabajar con AMF, amortiza hasta en un 88% desarrollar este tipo de tecnologías. En la **Tabla 9**, se muestra el presupuesto realizado por Beltrán.

Tabla 9.- Presupuesto del prototipo de seguidor solar desarrollado por José Beltrán. Fuente: Recuperado de (José, 2007, pág. 103), Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electroquímicos.

Concepto	Cantidad	Unidad	Costo unitario	Total
Seguidor Solar				5,700
Estructura del seguidor	1	Lote	3,500	3,500
Tarjeta de control	1	Pza	700	700
Actuador lineal	1	Pza	1,500	1,500
Sistema de monitoreo				3,400
Tarjeta de adquisición de datos	1	Pza	2,000	2,000
Tarjeta de acondicionamiento de señales	1	Pza	700	700
Licencia de software	1	Licencia	700	700
Sistema de almacenamiento de energía				
Regulador de carga	1	Pza	2,500	2,500
Baterías	2	Pza	1,600	3,200
Módulos Fotovoltaicos	2	Pza	6,000	12,000
Regulador de Voltaje	1	Pza	400	400
Panel de control, cables y conexiones	1	Lote	1,000	1,000
Costo total del prototipo construido				\$ 22,500

A-03: Análisis de costo de la ventana inteligente

La persiana fue fabricado con materiales convencionales de cancelería, su costo de adquisición fue de \$800.00 [ochocientos pesos 00/100 m.n], a dicho costo se le ha sumado el precio de manufactura e instalación del accionador solar y de un resorte de acero. El presupuesto se presenta a detalle en la **Tabla 10**.

Tabla 10.- Este presupuesto desglosa el costo de la ventana inteligente.

Concepto	Cantidad	Unidad	PU	Total
Ventana convencional tipo persiana de 30 x 30 cm, fabricado en aluminio anodizado de 1½ in.	1	pieza	\$800	\$800.00
Accionador solar.	1	pieza	\$691.50	\$691.50
Resorte de acero convencional tipo helicoidal.	1	pieza	\$6.00	\$6.00
Costo total de la ventana con accionador solar				<u>\$1,497.50</u>

El costo global de la ventana inteligente es de \$1497.50 [un mil cuatrocientos noventa y siete pesos 50/100].

A-04.-Ficha técnica del accionador solar

Termoactuador

Son dispositivos cuya función, es proporcionar fuerza/desplazamiento, para mover o “actuar” a otro dispositivo mecánico. Generalmente funcionan mediante la aplicación de corriente eléctrica.

AMF

Las AMF son materiales que tienen la propiedad de recordar una forma establecida, después de sufrir deformación plástica, aparentemente permanente. La forma se recupera mediante la aplicación de calor.

Resorte de Ni-Ti

Funciona como sensor y actuador al ser sometido a un cambio de temperatura.

Cuando su temperatura se eleva por arriba de los 50°C, se contrae arrastrando el émbolo hacia el interior del tubo.

Cuando su temperatura se mantiene por debajo de los 25°C, se alarga expulsando el émbolo hacia el exterior del tubo.

Ficha técnica del accionador solar

Accionador solar

Está diseñado con un sistema de control inteligente basado en Aleaciones con Memoria de Forma [AMF], reacciona ante los cambios de la temperatura del ambiente.



Émbolo

Es la pieza encargado de transmitir la fuerza en forma de movimiento al elemento a operar.

Tubo de vidrio

Capta y concentra la radiación de los rayos del sol, hacia el resorte de Ni-Ti, para aumentar su temperatura y provocar su contracción.

Con este arreglo se logra calentar el resorte de Ni-Ti, provocar su contracción, para generar una fuerza mecánica, que desplaza de arriba abajo el émbolo como si fuera un pistón neumático. Su forma lo hace parecer un amortiguador de un automóvil.

01

Por: Arq. Isai Nestor Chepi Rivera

UNAM
POSGRADO
Arquitectura

Aplicación

Ficha técnica del accionador solar

Sistemas de seguimiento solar

Se puede implementar como un sistema de control de posicionamiento para direccionar celdas fotovoltaicas. Aumenta la posibilidad de mejorar el rendimiento de captación de energía en estos dispositivos.



Esta diseñado para ser instalado en azoteas, en postes de iluminación para carreteras, vialidades urbanas, espacios abiertos como estacionamientos y plazas.



Accionador automático para ventilación

Su sistema de control se base en una estrategia de enfriamiento pasivo, logra abrir y/o cerrar un sistema de ventilas sin emplear actuadores eléctricos.



Características técnicas

Está en tensión cuando su temperatura se mantiene por debajo de los 25°C.

Está a compresión cuando su temperatura se mantiene por arriba de los 50°C.

Su longitud en estado de reposo es de 10 cm.

Su longitud con el embolo desplazado es de 17 cm.



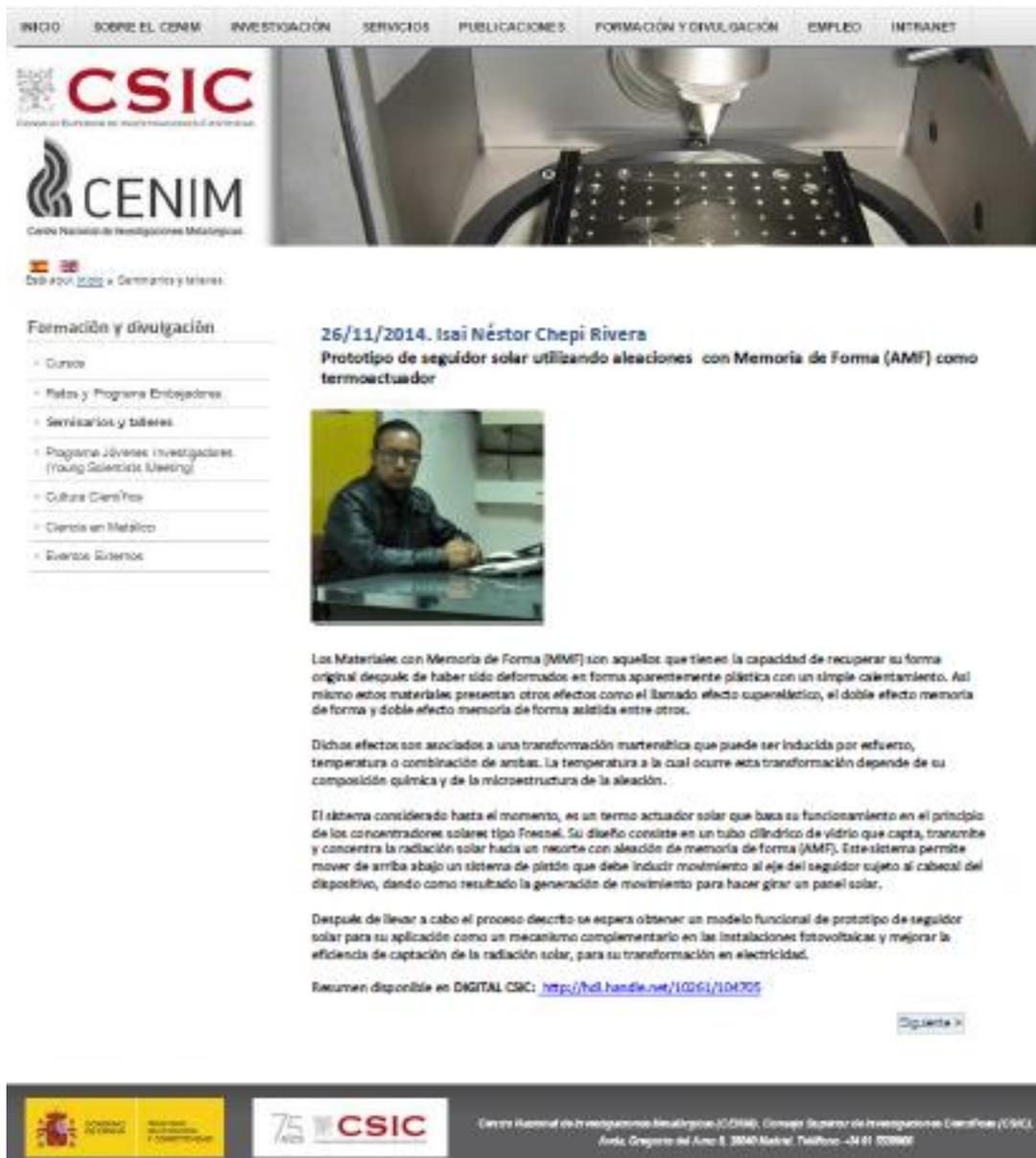
Por: Arq. Isai Nestor Chepi Rivera

UN/M
POSGRADO
Arquitectura

02

A-05.-Preámbulo del trabajo de investigación

Como parte del trabajo de investigación, se realizó una estancia en el CENIM de España, como parte del trabajo se impartió una conferencia, destacando la importancia de utilizar las AMF como sistemas de control híbrido en la domótica, este trabajo se encuentra publicado en <http://www.cenim.csic.es/index.php/es/seminarios/311-26-11-2014-isai-nestor-chepi-rivera>. [Figura 58].



INICIO SOBRE EL CENIM INVESTIGACIÓN SERVICIOS PUBLICACIONES FORMACIÓN Y DIVULGACIÓN EMPLEO INTRANET

CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

CENIM
Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas

Del 14/01/2022 a Certificados y firmas

Formación y divulgación

- Cursos
- Redes y Programa Embajadores
- Seminarios y talleres
- Programa Jóvenes Investigadores (Young Scientist Award)
- Cultura Científica
- Ciencia en México
- Eventos Externos

26/11/2014. Isai Néstor Chepi Rivera
Prototipo de seguidor solar utilizando aleaciones con Memoria de Forma (AMF) como termoeactuador



Los Materiales con Memoria de Forma (MVF) son aquellos que tienen la capacidad de recuperar su forma original después de haber sido deformados en forma aparentemente plástica con un simple calentamiento. Así mismo estos materiales presentan otros efectos como el llamado efecto superelástico, el doble efecto memoria de forma y doble efecto memoria de forma asistida entre otros.

Dichos efectos son asociados a una transformación martensítica que puede ser inducida por esfuerzo, temperatura o combinación de ambas. La temperatura a la cual ocurre esta transformación depende de su composición química y de la microestructura de la aleación.

El sistema considerado hasta el momento, es un termo actuador solar que basa su funcionamiento en el principio de los concentradores solares tipo Fresnel. Su diseño consiste en un tubo cilíndrico de vidrio que capta, transmite y concentra la radiación solar hacia un resorte con aleación de memoria de forma (AMF). Este sistema permite mover de arriba abajo un sistema de pistón que debe inducir movimiento al eje del seguidor sujeto al cabezal del dispositivo, dando como resultado la generación de movimiento para hacer girar un panel solar.

Después de llevar a cabo el proceso descrito se espera obtener un modelo funcional de prototipo de seguidor solar para su aplicación como un mecanismo complementario en las instalaciones fotovoltaicas y mejorar la eficiencia de captación de la radiación solar, para su transformación en electricidad.

Resumen disponible en DIGITAL CSIC: <http://hdl.handle.net/10261/104705>

[Siguiente >](#)

 Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Avda. Gregorio del Amo 8, 28002 Madrid, Teléfono: +34 91 5309000

Figura 58.- Presentación del trabajo de investigación en el CENIM, España. Fecha: 26 de Noviembre de 2014.