



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN**

**DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO  
PARA LA OPERACIÓN DE UN ALAMBRE DE NITINOL  
EMPLEADO COMO ACTUADOR EN UN PROTOTIPO DE  
MANO MECÁNICA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA  
(AREA: ELECTRICA ELECTRONICA)**

**P R E S E N T A:**

**NOE BENUMEA AGUILAR**



**ASESOR: ING. ENRIQUE HERRERA HIDALGO**

**MEXICO 2013**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

# Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por hacerme sentir orgulloso de haber pertenecido a esta gran casa de estudios.

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón

Por permitirme ser parte de su comunidad estudiantil y por todos los conocimientos adquiridos durante mi formación profesional para representar con orgullo mi institución.

A mis profesores

El Ing. Enrique Herrera Hidalgo, Dr. Jacinto Cortez Pérez, Mtro. Juan Gastaldi Pérez y al Ing. Adrián Paredes Romero por compartirme sus conocimientos en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros.

Mauricio Ontiveros Salgado, Ricardo Sánchez Sánchez y Néstor García Castillo por todos esos buenos momentos a lo largo de la carrera en el laboratorio de mecánica aplicada y por alertarme a terminar este proyecto.

A Laura Hernández Mancilla por ser una persona muy importante en mi vida, por tu apoyo consejos y sabiduría y la confianza que siempre me tuviste, que me sirvió como aliciente para culminar este ciclo.

A mis padres

Antonio Benumea Hernández por tu apoyo durante toda mi vida, que aunque ya no estás aquí aún siento que estas a mi lado.

Josefina Aguilar Santillán por tu dedicación y esfuerzo incondicional que me ha servido para terminar la carrera seguir superándome.

A mis hermanos

Liliana, Antonio Y Gabriela por estar con migo en las buenas y en las malas apoyándome durante mi ciclo estudiantil.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Innovación e Investigación tecnológica (PAPIIT) de la UNAM. IN111310, "DISEÑO Y APLICACIÓN DE UN CIRCUITO ELECTRÓNICO PARA LA OPERACIÓN DE UN ALAMBRE DE NITINOL EMPLEADO COMO ACTUADOR EN UN PROTOTIPO DE MANO MECÁNICA". Agradezco a la DGAPA-UNAM por la beca recibida.

# CONTENIDO

<b>Introducción</b> -----	<b>i</b>
<b>CAPITULO 1 Manos robóticas</b>	<b>1</b>
1.1 Evolución de las manos robóticas en el tiempo	
<b>CAPITULO 2 Nitinol y sus características</b>	<b>9</b>
2.1 Historia del nitinol	
2.2 Que es el nitinol?	
2.3 Transformación martensítica	10
2.4 Comportamiento mecánico de los materiales con memoria de forma	12
2.5 Propiedades del Nitinol	15
2.6 Aplicaciones del Nitinol en la ciencia	16
<b>CAPITULO 3 Implementacion del Nitinol al hardware del sistema</b>	<b>20</b>
3.1 Características para el diseño.	
3.2 Banco de pruebas para el Nitinol.	
3.3 Prototipo de mano mecánica.	23
3.3.1 Despiece de la mano mecánica.	24
3.4 Descripción de componentes del prototipo de mano mecánica.	26

<b>3.5</b>	Adecuación del nitinol al prototipo de mano mecánica.	27
<b>3.6</b>	Circuito electrónico 1.	29
<b>3.6.1</b>	Propuesta de diseño del circuito electrónico.	30
<b>3.7</b>	Desarrollo del circuito electrónico 1.	31
<b>3.8</b>	Software del microcontrolador del circuito1.	33
 <b>CAPITULO 4 Diseño del circuito electrónico de operación.</b>		 36
<b>4.1</b>	Puntos a considerar para el diseño del circuito electrónico de operación de la mano mecánica.	38
<b>4.2</b>	Propuesta para el diseño del circuito de medición de movimiento.	
<b>4.2.1</b>	Sensores de capturar de movimiento.	
<b>4.2.2</b>	Justificación del sensor a utilizar.	41
<b>4.3</b>	Configuraciones para la medición del movimiento con el flexsensor.	42
<b>4.4</b>	Diseño del circuito de medición de movimiento.	46
<b>4.5</b>	Software del microcontrolador del circuito electrónico -2.	52
<b>4.6</b>	Selección de la fuente de alimentación.	
<b>4.6.1</b>	Tipos de baterías.	54
<b>4.6.2</b>	Justificación de la batería a utilizar.	55
<b>4.7</b>	Circuito acoplador de voltaje microcontrolador-fuente de alimentación.	58 60
<b>4.8</b>	Diagrama del circuito electrónico de operación de la mano mecánica.	64

<b>CAPITULO 5 Resultados y conclusiones.</b>	66
<b>5.1 Prototipo 1.</b>	
<b>5.2 Prototipo 2.</b>	69
<b>5.3 Conclusiones.</b>	72
<b>5.4 Trabajos a futuro.</b>	73
Referencias bibliográficas	74

#### **Anexo A.**

**Propuesta de fuente de cd.**

#### **Anexo B**

**Circuitos impresos utilizados durante el desarrollo del prototipo**

#### **Anexo C**

**Funcionamiento**

## **Objetivo**

Diseñar un circuito electrónico para comprobar la fiabilidad del alambre de nitinol aplicado como actuador en un prototipo de mano mecánica.

## Introducción.

Hoy en día son de vital importancia los avances y estudios en tecnología donde robots y maquinas poseen una área fundamental de estudio y desarrollo. De la misma manera se trabaja en la búsqueda de nuevos materiales especiales, que sean capaces de realizar acciones de una manera más sencilla haciendo a un lado los sistemas de constitución compleja.

Por un lado podemos mencionar a los materiales con memoria de forma (MMF) los cuales tienen la capacidad de producir movimiento en línea directa, sustituyendo elementos actuadores complejos en muchas áreas de la ingeniería, donde es posible sustituir motores eléctricos por alambres de nitinol.

Tan solo imaginemos una mano robótica que en vez de motores tenga tendones de alambre de nitinol, usada para manipular cierto objeto. Y así infinidad de operaciones.

Por ejemplo en el área biomédica existe una variedad de aplicaciones como son (prótesis articulares, grapas para unir fracturas en el sistema óseo, endoprotesis usadas para abrir conductos del cuerpo humano, etc.) ó en la parte mecatronica construyendo pequeños actuadores que empleen este tipo de materiales.

Cabe mencionar que para desarrollar aplicaciones con (MMF) es necesario en primer lugar estudiar el comportamiento de estos materiales, la ventaja es que actualmente se cuenta con los fundamentos teóricos necesarios para emprender esta tarea.

A consecuencia a estas demandas tecnológicas en este proyecto de investigación el objetivo es emplear alambre con MMF de una aleación Níquel-Titanio (nitinol), el cual se adaptara en un prototipo de mano mecánica, el papel del alambre con memoria de forma será generar movimiento en la mano mecánica, y mediante el diseño de un circuito electrónico modificar las configuraciones geométricas según la capacidad del nitinol lo permita.

En el primer capítulo “Manos robóticas” se hace una descripción de las características de actuación de distintos diseños de manos robóticas en el transcurso del tiempo.

El segundo capítulo “Nitinol y sus características” Se define lo que es el Nitinol así como las causas que llevan a cabo en la transición de fases en este material.

En el tercer capítulo “implementación del nitinol al hardware del sistema” se utilizan y adaptan alambres de nitinol como actuadores en el prototipo de mano mecánica con el fin de conocer las condiciones de funcionamiento, para el desarrollo del circuito de operación.

En el cuarto capítulo “Diseño del circuito electrónico de operación” se diseña el circuito electrónico en base a los resultados de la implementación del nitinol como actuador.

En el quinto capítulo “Resultados y conclusiones” se muestra una serie de imágenes del diseño final, además de un análisis de los alcances logrados en el proyecto, y algunas propuestas de mejora.



# 1. Manos robóticas.

Como sabemos la herramienta más importante para el hombre es la mano, con ella podemos hacer desde una tarea simple como rascarse hasta una compleja como deformar algún objeto o manipularlo, escribir y hasta comunicarnos por medio de formas.

Si se habla de robotizar, es la forma de hacer un mecanismo autónomo para realizar cierto proceso o actividad. El sector industria trajo consigo el uso de robots que a diferencia con el desempeño humano, los robots pueden realizar tareas en entornos peligrosos sin tener riesgo alguno.

Al hablar de manos robóticas no solo hablamos de las de uso industrial si no también podemos mencionar las herramientas robóticas para uso humano, estas son las prótesis biónicas, que buscan beneficiar a personas que sufren algún tipo de discapacidad o que no cuentan con alguna extremidad. En el mercado existe una gran variedad de prótesis en su mayoría para piernas o brazos y en menor medida para manos por tanto se requieren más y mejores diseños.

Es conocido que la reproducción de una mano robótica es compleja ya que la mano humana es un órgano altamente sofisticado, cuenta con una gran cantidad de grados de libertad y además su capacidad sensorial nos permite entre otras cosas reconocer objetos simplemente por tacto y forma. Esto hace que la mano robótica sea la parte más compleja reproducir en un robot ya que para que se pueda comparar con la mano humana debe contar con sensores de distintos tipos.

Centrándose en la reproducción de la mano humana encontramos que el mayor inconveniente lo suponen la gran cantidad de grados de libertad y el número de actuadores usados para este fin, dentro de este tipo de actuadores podemos mencionar los servomotores o motores de cd que tiran cables a manera de músculos y tendones de aire comprimido, entre otros. El problema más común son las dimensiones y el peso de este tipo de actuadores que aplicados en prótesis robóticas tienen una desventaja por el peso.

A continuación estudiaremos un grupo de manos robóticas desarrolladas en el transcurso del tiempo. Tomando en cuenta los dispositivos empleados para la actuación del mecanismo así como también las características de su funcionamiento.

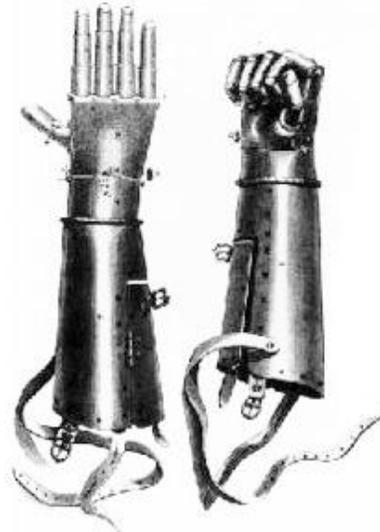


## 1.1 Evolución de las manos robóticas en el tiempo.

Las manos mecánicas están destinadas a remplazar una mano real, ya sea por índole cosmético en el caso de una amputación ó por uso práctico en algún proceso de fabricación peligroso para una mano humana, por eso es importante conocer un poco sobre los avances hasta ahora desarrollados .

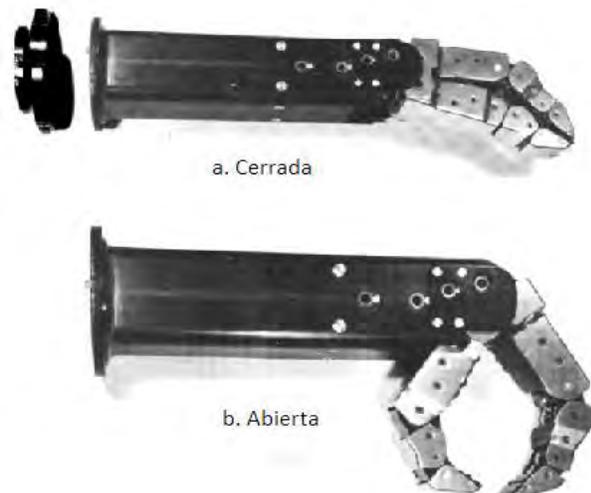
### Mano de hierro de Götz von Berlichingen.

Esta mano de hierro, utilizada por el alemán Götz von Berlichingen (1500 d. C.) A quien le fue arrancada la mano derecha por un cañón durante una guerra. Esa prótesis, le valió el sobrenombre "aquel de la mano de hierro" Diez ruedas mecánicas permitían fijar las articulaciones de manera rígida en la posición que le fuera necesaria, lo cual le permitió tomar objetos nuevamente [1].



### Handyman.

General Electric desarrollo la Handyman en el año 1960 contaba con tres movimientos, uno para efectuar la curvatura de cada uno de los tres dedos que se encontraban mecánicamente conectados y los otros dos en la muñeca y antebrazo, estas articulaciones eran movidas por cables a modo de músculos operados mecánicamente por una persona [2].





### **Mano Utah/MIT dextroux.**

Desarrollada por la universidad de Utah en el año de 1982. Consistía en 4 dedos movidos por cables de tensión como tendones que a su vez eran activados por un complejo sistema de control de 32 cilindros neumáticos, para medir la posición de la mano se empleaban sensores de efecto hall montados en las articulaciones [3].



### **Robot matsuoka hand**

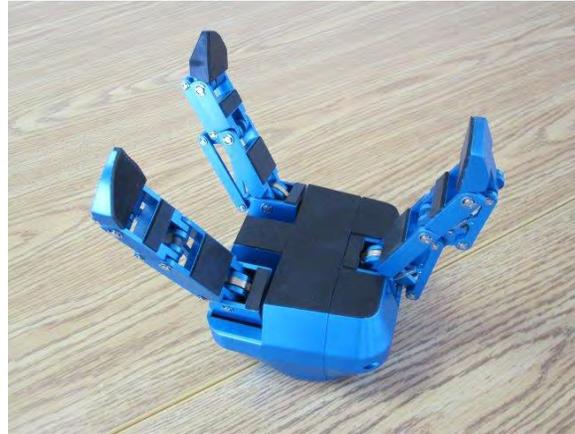
Esta mano fue construida en el laboratorio de neurorobotica de la universidad de washington en el año de 1995. Cada dedo esta compuesto de dos falanges y dos juntas articuladas las articulaciones son controladas por un sistema de cable polea motor, es autosuficiente aunque los motores dan mucho peso y tamaño a esta mano [4].





## Barrett Hand.

Es una de las manos con mayor éxito en el mercado la barretthand de Barrett Technology Inc. Se comercializó en 1998 su estructura consistía en tres dedos que se configuraban en tiempo real para realizar varios tipos de agarre. Su medio de actuación consistía en una serie de motores que transmitían su movimiento por medio de un tornillo sin fin y engranes [5].



## Las manos del Robonaut

La NASA comenzó en 1999 el desarrollo de un robot astronauta, pensado para trabajar en misiones espaciales. Cada mano del Robonaut cuenta con cinco dedos con 14 grados de libertad 14 motores como actuadores. La retroalimentación es proporcionada por encoders incrementales, sensores táctiles y celdas de carga, combinando la cinemática y la fuerza [6].





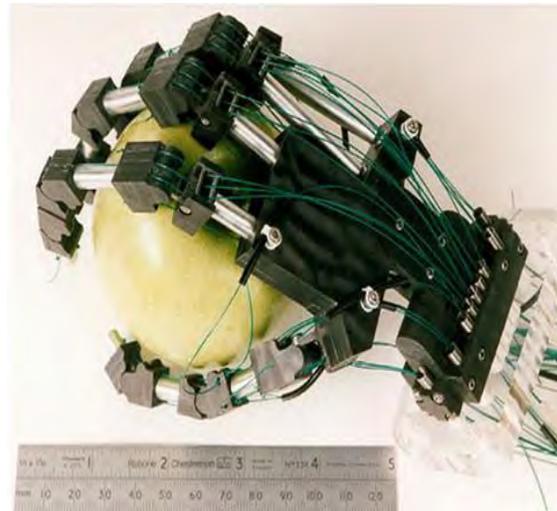
## Mano DLR

Creada en el año 2000 por el instituto German Aerospace center, cuenta con 4 dedos idénticos con 4 articulaciones y tres grados de libertad en cada uno, y otro adicional en la muñeca, es actuada por motores de CD, 11 en medio de la articulación y 24 para las articulaciones interfalángica, en un cada dedo cuenta con 3 sensores de posición, 3 sensores de torque, 3 sensores de velocidad en motores y tres sensores para compensación de temperatura [7].



## Mano Sheffield.

En el año de 2002 investigadores de la universidad Sheffield hallan, fabricaron una mano robótica para la investigación de un nuevo actuador de polímeros electroactivos consiguiendo movimientos parecidos a los de una mano humana. La mano esta compuesta por 5 dedos y 12 grados de libertad [8].





## **Shark Hand.**

El diseño de esta mano esta basado en la barrethand, cuenta con tres dedos que se configuran una y otra vez en tiempo real. La ventaja que tiene este ante las otras es la percepción a la dimensión de objetos debido a la implementación de su sistema de electrolocalización que emite un campo eléctrico pequeño llamado electrorecepción que detecta la forma de los objetos en la punta de los dedos [9].



## **Shadow Hand.**

Shadow hand Lanzada por shadow robot en 2002, es una de las mano robótica mas avanzada del mercado, esta actuada por 40 tendones de aire, cuenta con 5 dedos sus dimensiones son similares a las de una mano humana, cuenta con 24 grados de libertad, la información de la posición de sus dedos es proporcionada por una serie de sensores de efecto hall. En 2009 shadow robot lanzo su nueva versión de la shadow hand que cuenta con 24 motores de cd [10].





### **Prótesis i-LIMB.**

I-LIMB de Touch Bionics, es la primera prótesis robótica en el mercado desarrollada alrededor del 2066. En la cual se pueden controlar individualmente cada uno de los cinco dedos. Cuenta con 25 micromotores responsables de su actuación. El modo de control es por señales amnióticas que provienen de la parte amputada y son recuperadas por electrodos que se colocan en la piel de la misma [11].

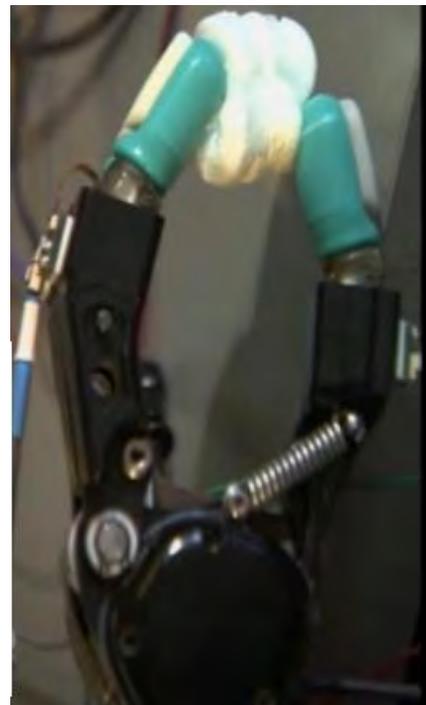


### **Mano robótica sensible al tacto.**

En este 2012, ingenieros biomédicos de la escuela de ingeniería Viterbi, del sur de California, lograron fabricar una mano capaz de sentir texturas.

Cuenta con sensores táctiles, llamados BIO tac, que en combinación de algoritmos pueden interpretar texturas del medio que tocan con las puntas de sus dedos mecánicos.

Los dedos de la mano tienen un tamaño similar al de la mano humana, su actuación es por medio de pequeños servomotores activados por señales mioeléctricas [12].





Los diseños de manos robóticas puede ser indefinida, con el paso de los días aparecen nuevas propuestas en cuanto a mejoras de funcionalidad, peso, tipo de dispositivos de actuación, numero de movimientos y control, etc.

Si analizamos los distintos diseños se puede percatar que la mayoría de los actuadores empleados en estas manos robóticas son motores o cilindros, ya sean eléctricos, neumáticos o hidráulicos, esta es la consecuencia de que los diseños lleguen a ser pesados y de dimensiones grandes y si hacemos una comparación de los actuadores de mayor uso en los diseños robóticos analizados con los materiales con memoria de forma (nitinol). El nitinol tiene la propiedad de asemejarse a los músculos humanos por eso el nombre de alambres musculares, cabe mencionar las características de importancia para su uso como actuador, son: ligeros, ocupan poco espacio en los diseños lo que los hace candidatos en infinidad de aplicaciones, además de ser un elemento silencioso a la hora de actuar es biocompatible, características que los ponen por encima de los actuadores convencionales.



## 2. Nitinol y sus características

En este capítulo se estudia un poco de la historia y las características de manera microscópica y macroscópica del nitinol, con el fin de entender su comportamiento.

### 2.1 Historia del nitinol.

El investigador sueco Arne Orlander observó por primera vez el efecto con memoria de forma en una aleación de oro y cadmio (Au-Cd) [13] posteriormente haciendo pruebas se percató de la capacidad que tenía la aleación para generar movimiento.

En los años cincuenta investigadores de la universidad de Columbia Nueva York, desarrollaron distintos experimentos para tratar de entender los cambios en la estructura cristalina de la aleación. Así demostraron que el efecto de memoria de forma era útil para generar trabajo. Estas investigaciones condujeron al desarrollo de una nueva aleación con estas propiedades, esta aleación estaba compuesta por indio titanio teniendo algunos problemas por su toxicidad [13].

El laboratorio de Artillería Naval de los Estados Unidos, liderado por W. Beuhler, mientras desarrollaban una aleación no corrosiva, descubrieron una nueva aleación que constaba de níquel y titanio la cual bautizaron con el nombre de Nitinol, esta aleación fue menos costosa, más segura, biocompatible, resistente a la corrosión y su temperatura de transición podía ser establecida fácilmente. Tras este descubrimiento en el año de 1969 y 1973 se desarrollaron nuevas aleaciones en el campo de los materiales con memoria de forma como fueron Cu-Al-Ni, Cu-Sn, Cu-Au-Zn, Cu-Zn-Al, Fe-Pi, Ni-Al y Mn-Cu Al y Mn-Cu [15].

### 2.2 Que es el nitinol?

El Nitinol es una aleación (Níquel - titanio) a la que se le atribuye el efecto de memoria de forma (MMF). La memoria de forma es la acción de recordar el tamaño o forma original después de que el material es sometido a estímulos externos [16]. Estos estímulos se producen cuando el material es expuesto a un cambio térmico, cambiando de la primera fase martensita a la segunda fase austenita. La fase martensita se obtiene al enfriar el material mientras que la fase austenita a diferencia de la fase anterior se llega a ella calentando el material. Este material puede deformarse hasta un 8% al ser expuesto a un determinado rango de temperaturas y recuperar su forma original después de retirarle la fuente de temperatura externa.



## 2.3 Transformación martensítica.

En los metales existen dos tipos de transformación martensítica por desplazamiento y por difusión [19]. La transformación por difusión consiste en crear una nueva fase, desplazando un número de átomos a grandes distancias. Dado que se requiere una migración atómica la evolución de este tipo de transformación depende del tiempo y de la temperatura. Para la transformación por desplazamiento no se requiere un amplio número de movimientos, para este caso los átomos se reordenan formando así una estructura cristalina pero sin cambiar la naturaleza del material. Dado que no se necesita una migración atómica, estas transformaciones por desplazamiento generalmente son independientes del tiempo y el movimiento de la interface entre las dos fases es tremendamente rápido [16].

Resumiendo las principales características de la martensita, podemos ver que se forma enfriando, aumentando una fracción de volumen de martensita mientras la temperatura se va reduciendo heredando su composición atómica debido a la ausencia de difusión [16]. (Ver figura 2) se ilustra la estructura austenita (a), y la progresión a una estructura totalmente martensita que se produce de (b) a (c).

Se puede observar que a medida que la transformación avanza, cada capa de átomos es desplazada una pequeña distancia y finalmente esos pequeños movimientos darán paso a la nueva fase martensítica.

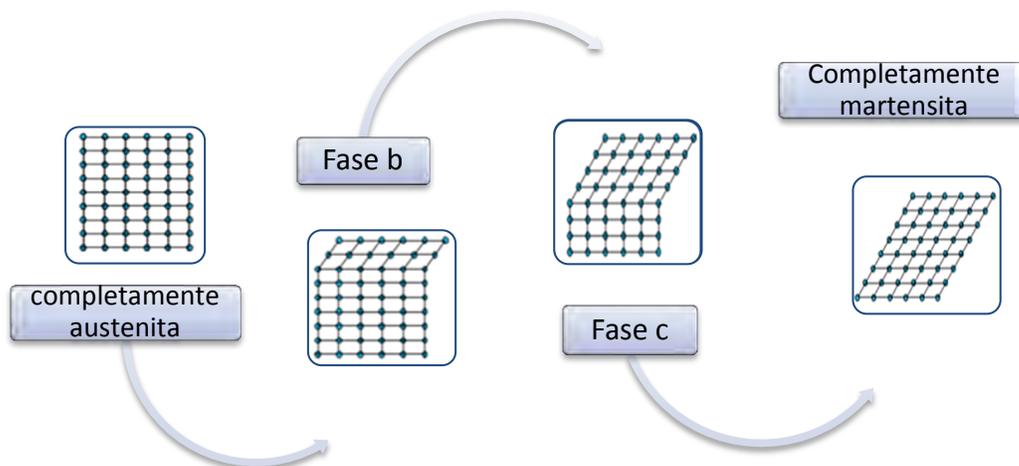


Figura 2 Transformación atómica de austenita a martensita.



La recuperación de una nueva estructura martensita se produce por medio de dos mecanismos de acomodo de los átomos, por deslizamiento o por maclado (ver figura 2.1) por deslizamiento es el mecanismo más común en la martensita, pero para que se dé la memoria de forma de un modo significativo es necesario el acomodo por maclado.

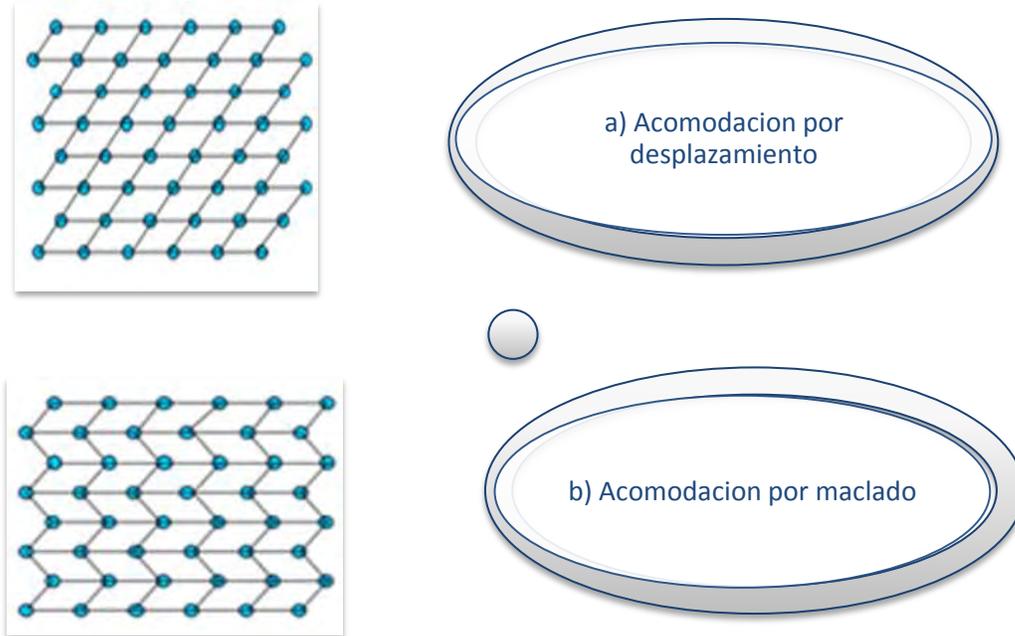


Figura 2.1 Modos de acomodación de los átomos a nivel molecular

En el acomodo por deslizamiento los enlaces atómicos de las esquinas de la estructura se encuentran rotos mientras que en el acomodo por maclado los enlaces atómicos se observan intactos y al aplicarle una tensión el reacondicionamiento se hará de manera más favorable por lo que podemos decir que es un mecanismo reversible.



## 2.4 Comportamiento mecánico de los materiales con memoria de forma.

Cuando el material es deformado a baja temperatura en fase martensítica al ser calentado vuelve a su fase austenítica y a su forma inicial. Para entender mejor este proceso tenemos que definir las temperaturas de transformación de una aleación con memoria de forma (ver figura 2.4)

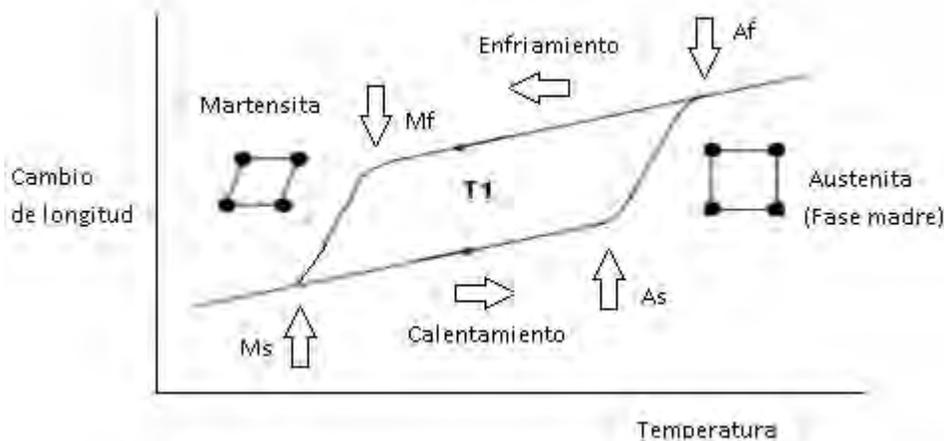


Figura 2.4 Curva de transformación martensita – austenita [18]

**T1**: histéresis, **Ms**: comienzo de martensita, **Mf**: final de martensita, **As**: comienzo de austenita, **Af**: final de austenita.

En el proceso de enfriamiento la primera de estas temperaturas es la temperatura de inicio de la transformación martensítica (**Ms**), a partir de la cual se empieza a formar martensita por temperatura

Esta transformación termina a medida que decrece la temperatura cercana **Mf** o temperatura final de la transformación martensítica. La formación de la fase austenítica empieza a medida que durante el proceso de calentamiento alcanza la temperatura **As**, se comienza a formar entonces una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, rígida y dura, que se termina de formar alrededor de **Af** cuando el elemento se enfría más allá de esta temperatura la deformación se recupera completamente obteniendo el efecto de memoria de forma [16][17][19].

La consecuencia de la transformación austenita-martensita provoca una histéresis de la transformación que se puede asociar al rozamiento debido al movimiento de



las maclas de martensita y se caracteriza por la diferencia del ancho de pico de austenita respecto a la martensita ( $A_p / M_p$ ) la temperatura de histéresis depende del tipo de aleación pero por lo regular oscila entre los 20 y 40 °C para los materiales con memoria de forma.

### Memoria de forma.

Considerando su transformación de manera macroscópica (ver figura 2.4) Cuando el material es deformado en estado martensítico, recupera su estado inicial calentándolo encontrándonos con el efecto de *memoria de forma simple*, el material solo recuerda una configuración a la que retorna el al ser calentado por encima de  $A_f$ .

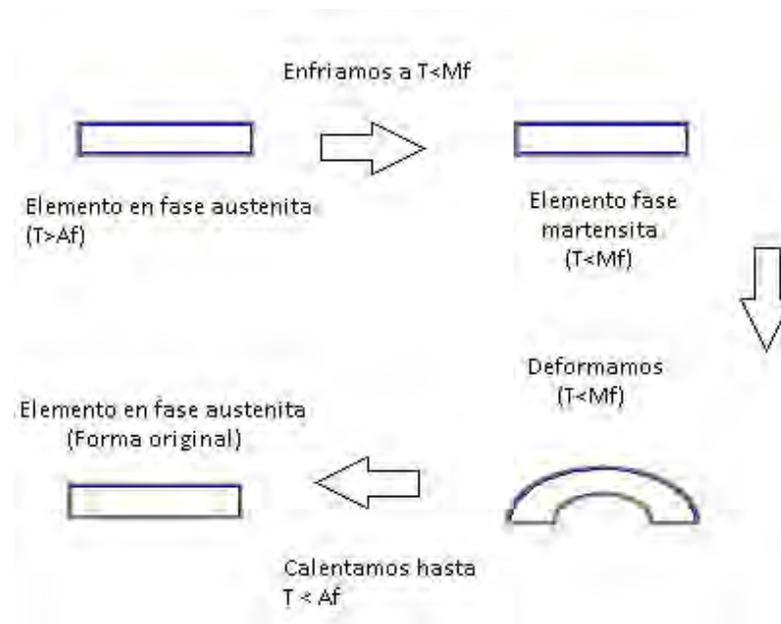


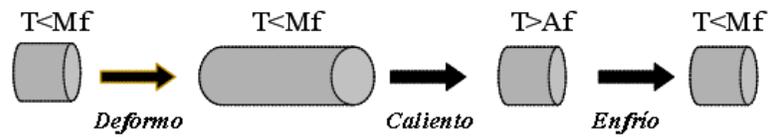
Figura 2.4 Efecto memoria de forma simple [16]

### Memoria de forma doble.

Si hablamos de el efecto de doble memoria de forma (ver figura 2.4.1) debemos tener en cuenta que este efecto recuerda dos formas una para la fase martensita otra para la fase austenita dicho de otra manera recuerdan su forma correspondiente a altas y bajas temperaturas. Crear aleaciones Ni-Ti con memoria de dos caminos implica un proceso de entrenamiento algo complejo [16]. Estos tratamientos, consisten en la repetición de ciclos termomecánicos en fase austenítica y otros en fase martensita que van creando una microestructura.



*Efecto Memoria de forma simple*



*Efecto Doble Memoria de forma*

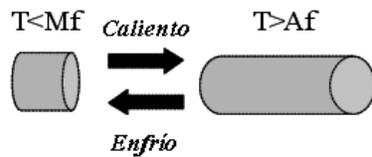


Fig. 2.4.1 Comparación memoria de forma simple y memoria de forma doble. [16]

**Efecto superelástico.**

La superelasticidad aparece cuando el material es deformado por encima de  $A_s$ . En este rango la martensita puede hacerse estable con la aplicación de la tensión, pero se vuelve inestable cuando se retira la tensión (ver figura 2.4.2)

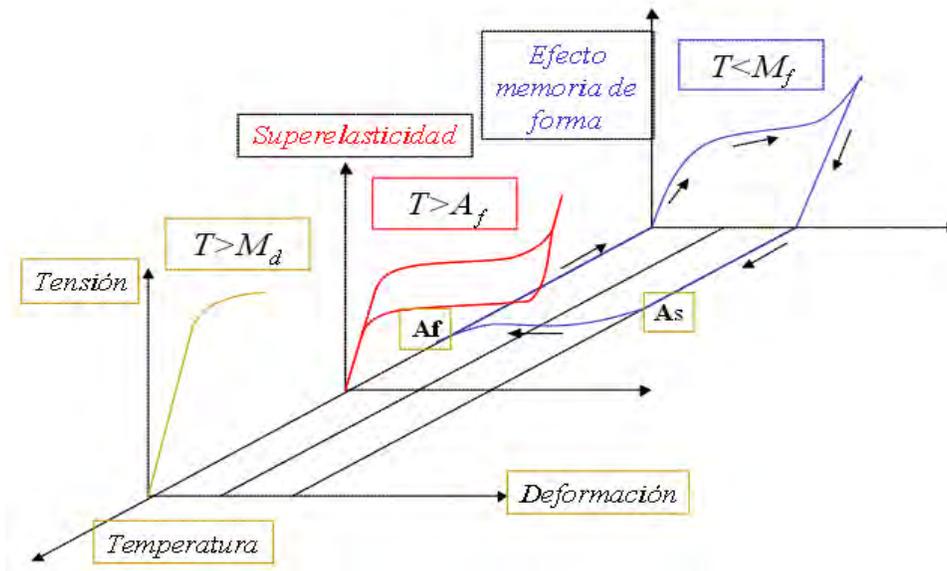


Figura 2.4.2 comportamiento del nitinol



En la figura anterior es un diagrama esfuerzo – deformación – temperatura, donde se puede observar que a una temperatura menor que  $M_f$  el material es cargado se deforma y permanece en ese estado teniendo una deformación macroscópica y cuando el material es calentado por encima de la temperatura  $A_f$ , este recupera su forma retornando a la fase austenítica a este estado se le denomina memoria de forma simple. Ahora cuando el material está por encima de una temperatura mayor que  $A_f$  es decir en fase austenítica y se le aplica una carga estamos hablando del efecto superelástico el cual asocia a la transformación martensítica inducida por esfuerzo [19].

Resumiendo el efecto de memoria de forma de un material con características termomecánicas, consiste en [15] [16]:

- 1.- Partir de un material en fase austenítica y enfriar el material hasta una temperatura por debajo de  $M_f$ , bajo una tensión nula. Esto provoca una transformación martensítica completa pero sin deformación macroscópica.
- 2.- Aplicar y dejar de aplicar una tensión al material en el estado martensítico. Se deforma plásticamente y de manera estable. Después de la descarga estamos en presencia de un estado totalmente martensítico y deformado respecto al estado inicial austenítico.
- 3.- Calentar el material hasta una temperatura mayor a  $A_f$ , bajo una tensión nula. Esta última secuencia da lugar a la transformación inversa de la martensita hacia austenita, provocando una deformación inversa a la creada por la aplicación de la tensión, por tanto el material vuelve a su forma inicial.

## 2.5 Propiedades del nitinol.

El Nitinol presenta un rango de solubilidad moderada para exceso de níquel o titanio, así como para otros elementos metálicos, esta solubilidad supone que pueden usarse otros elementos para cambiar las propiedades mecánicas y las temperaturas de transición del material, agregando cromo o hierro puede bajarse la temperatura de transición [14]. Variando la composición porcentual de níquel y titanio y agregando otros elementos puede cambiarse la temperatura de transición en un rango que va de 200 °C a 110°C [14]

Otras propiedades son su naturaleza no magnética, biocompatibilidad, alta resistencia a la corrosión, y una excelente maleabilidad y ductilidad que en el caso de los alambres de Nitinol permite una elongación de hasta del 25%.

Un alambre de Nitinol de una sola memoria de forma puede deformarse hasta un 8.5% mientras que con un alambre de Nitinol de doble memoria se obtienen deformaciones de hasta un 5%.



La gran maleabilidad y ductilidad del Nitinol permite ser manufacturado de diversas maneras: como alambres, barras, cintas, laminas, tiras y tubos. Este material es especialmente útil para dispositivos muy finos y pequeños siendo elementos muy usados por investigadores y aficionados ya que son cortados con facilidad y permiten su activación por medio de corriente eléctrica.

La propiedad especial que tienen estos materiales puede tener un gran rango de aplicaciones pero antes de continuar es indispensable conocer cómo se pueden usar, la memoria de forma puede generar fuerza o movimiento, la superelasticidad puede almacenar energía. Podemos emplear el efecto de *recuperación libre*, deformando el material en estado martensítico a temperatura ambiente y calentándolo para que recupere su forma, este efecto es utilizado en los acoplamientos. Por el contrario si a temperatura ambiente estiramos y fijamos el material tendremos una *recuperación impedida*, al calentar se vencerá la fuerza opositora generando un trabajo y al enfriar el material este se reseteara a causa de la fuerza opositora.

## 2.6 Aplicaciones del Nitinol en la ciencia.

Uno de los campos más importantes de la aplicación de los materiales con memoria de forma son los actuadores, empleados en diversas áreas de la ciencia, por ejemplo un sensor de temperatura en una válvula que permite el paso de agua caliente, el posicionamiento de una persiana al percibir la temperatura ambiente o en tal caso se utilizan para recuperar energía a partir del movimiento de un mecanismo generado al realizar un cambio de fase al recibir calor ya sea de una caldera o el escape del motor de un automóvil.

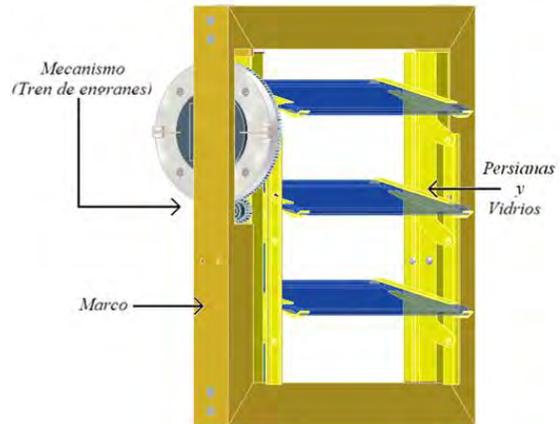
Algo muy importante acerca del nitinol es que es un material biocompatible y gracias a sus propiedades de memoria de forma y superelasticidad que es el efecto más usado en aplicaciones biomédicas como son: traumatología, estomatología, cardiología, por mencionar algunas, se abre un importante lugar en el desarrollo de la ciencia.

En el siguiente listado se muestran algunas de las aplicaciones desarrolladas con las propiedades que tienen el nitinol usando distintos métodos de operación y utilización.



Un diseño rentable y diferente fue el que llevo a cabo el Laboratorio de Mecánica Aplicada del Centro Tecnológico de la FES Aragón.

Esta aplicación importante son las llamadas **persianas inteligentes**. Que al percibir un cambio de temperatura ambiente se abren o cierran. Cambiando de fase austenita a martensita un resorte de nitinol que es el elemento actuador en estas persianas. [32]

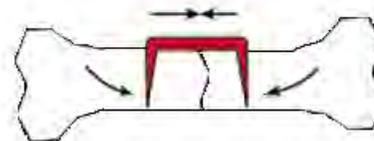


En el área de **traumatología** el uso de grapas con memoria de forma simple. Se introducen en (martensita) y, al estar en contacto con la temperatura del cuerpo humano, recuperan la forma previa (austenita), que reacomoda el hueso con fractura y lo mantiene unido en cada extremo.

GRAPAS PARA UNIR FRACTURAS



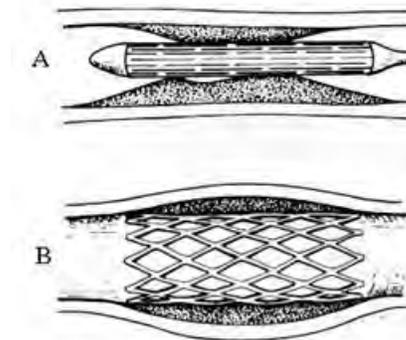
Se introduce en la fase martensita



Al recibir la temperatura corporal recupera su forma normal (austenita) que propicia la union de los huesos

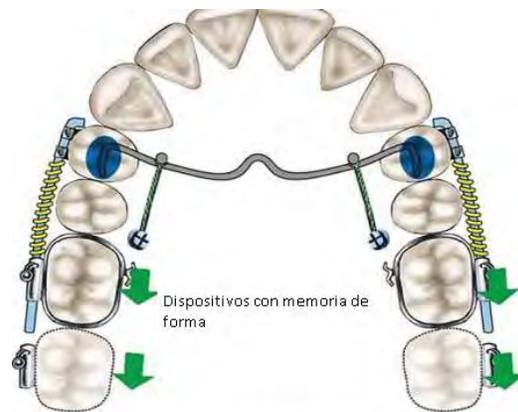


Una aplicación muy interesante son las llamadas endoprotesis que son un pequeño tubo que se introduce en el cuerpo y permite mantener abierto el conducto biliar, el conducto pancreático traqueal o vascular dependiendo el caso, el proceso es el siguiente se introduce un tubo deformado con diámetro reducido y, al estar en contacto con la temperatura corporal recupera su tamaño y abren la obstrucción



- A) Endoprotesis introducida a nivel de sofago
- B) Endoprotesis expandida y abriendo la obstrucción

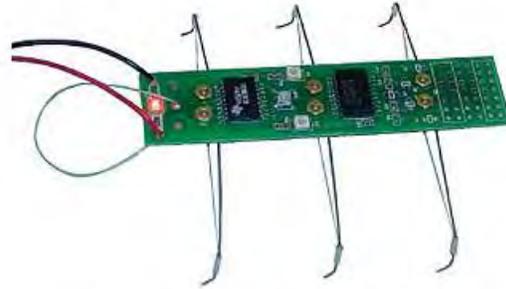
En la **estomatología** las aplicaciones se centran en los tratamientos de ortodoncia. En este caso se deforma previamente el material para que, una vez colocado en la boca del paciente, comience a realizar una fuerza constante hasta que se haya conseguido la corrección necesaria



Resortes con memori de forma en ortodoncia



En el ámbito del **mecatrónica** este tipo de aleaciones son empleadas como micro actuadores que entregan fuerza y movimiento tratando de emplear lo mínimo de energía. Stiquito. Es un ejemplo muy común de aplicación de los MMF. Es un robot ocho centímetros de longitud. Utiliza materiales con memoria de forma como músculos, en vez de los tradicionales motores.



Sistema motriz con alambres musculares

La imagen en cuanto aplicaciones que presentan estos materiales puede ser infinita, aún existen muchas limitaciones en cuanto su uso, algunas investigaciones realizadas presentan a estos materiales como no óptimos para el desarrollo de nuevas tecnologías, en los siguientes apartados comprobaremos que tan eficaz es este material aplicado como elemento actuador por el método de recuperación impedida en un prototipo de mano mecánica.



### 3. Implementacion del nitinol al hardware del sistema.

Investigaciones realizadas en el campo de los materiales con memoria de forma arrojan que estos materiales, tienen ciertas ventajas en comparación con los actuadores robóticos convencionales, son mucho más ligeros y ocupan poco espacio, además el método de actuación es más simple.

En este capítulo se estudiará el comportamiento del nitinol, mediante un mecanismo de experimentación donde se aplicarán distintas fuerzas de extensión de manera heurística y distintos niveles de corriente eléctrica para generar calor por efecto joule en el material. Posteriormente conociendo el comportamiento del material actuador se implementará en el prototipo de mano mecánica, el conjunto de alambre de nitinol y el prototipo se controlará por medio de un circuito electrónico simple.

#### 3.1 Características para el diseño.

El Nitinol tiene la característica de actuar a base de corriente eléctrica al aumentar su temperatura. Por lo tanto es sencillo emplearlo como actuador, usualmente se utiliza aplicando una fuerza de tensión opuesta a la dirección de su contracción, esta fuerza repone el alambre a su longitud inicial en la fase de baja temperatura. A esta fuerza aplicada se le conoce también como fuerza de extensión (Ver figura 3.1).

Si se lleva un alambre de Nitinol a su temperatura de transición sin una fuerza de extensión, se contraerá pero cuando se enfríe no retornará a su longitud original. A consecuencia, cuando el alambre se vuelva a calentar, no habrá una nueva contracción.

Un punto importante a mencionar es la resistencia mecánica del material, se sabe que la vida útil del Nitinol es de millones de ciclos antes de adquirir un daño.

#### 3.2 Banco de pruebas para el Nitinol.

Un banco de pruebas es una plataforma o módulo para experimentar con una variedad de elementos enfocados a la ciencia y así generar teorías respecto a la investigación. El objetivo de utilizar este banco de pruebas es conocer el funcionamiento físico del nitinol y así, deducir las características de mayor relevancia para el desarrollo de la investigación.

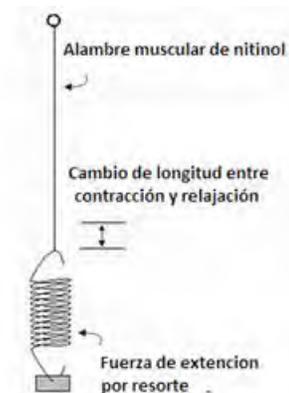


figura 3.1 Fuerza de extensión aplicada a un alambre de nitinol



## Descripción y funcionamiento del banco de pruebas.

El banco de pruebas (ver figura 3.2) esta basado: en la aplicación de una fuerza de extensión (3), los extremos (1) y (2) son las terminales donde se aplican distintas cantidades de voltaje de la fuente con las siguientes características 25V – 1 A (ver tabla 3), para conocer la reacción del alambre de Nitinol ó musculo de Nitinol, llamado así en aplicaciones de robótica.

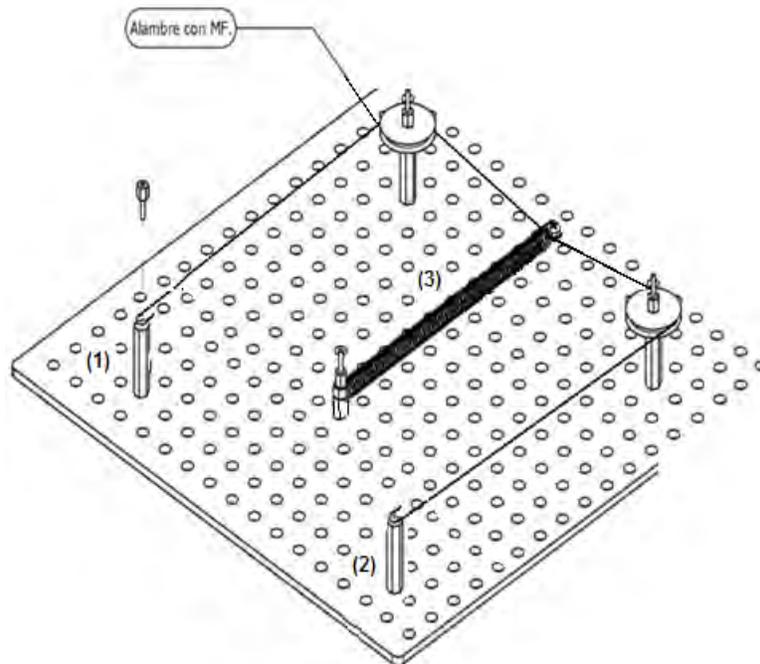


figura 3.2. Arreglo basado en la aplicación de una fuerza de extensión por medio de resorte.

Se recomienda que para sujetar el musculo de Nitinol a los puntos de aplicación de corriente (1) y (2), se utilicen terminales eléctricas (ver figura 3.2.1) debido a que el fabricante de Nitinol no recomienda soldar el alambre, debido a que los componentes de la soldadura pueden cambiar las propiedades del nitinol.

El muelle o resorte (3) esta sujeto por un extremo al poste del centro (ver figura 3.2) y el otro extremo al musculo de Nitinol. Se han empleado varios resortes con distintas constantes elásticas para la experimentación, en base a los resultados se seleccionara el adecuado de manera heurística para nuestro modelo.

Las poleas permitirán darle una menor fricción al alambre y direccionar la fuerza motriz, con el fin de evitar ocasionar un daño mecánico al material.



Como ya es conocido, el alambre tiene una resistencia óhmica dependiendo de su diámetro, y por tanto al hacer circular una corriente se produce el efecto joule, de esta manera lograremos activar el efecto de memoria de forma en el musculo de Nitinol.

Cabe mencionar que el material debe pasar por un proceso de educación para que este llegue a tener una contracción considerable. Este proceso de educación se lleva a cabo mediante el calentamiento y enfriamiento del material aumentando el valor de la fuerza de extensión en ambos ciclos, posteriormente se reduce la fuerza de extensión, por lo tanto el material recordara la forma que obtuvo cuando se tenia una fuerza de extensión mayor. Dicho de otra manera debemos estirar el alambre y después calentarlo para que recupere su forma.

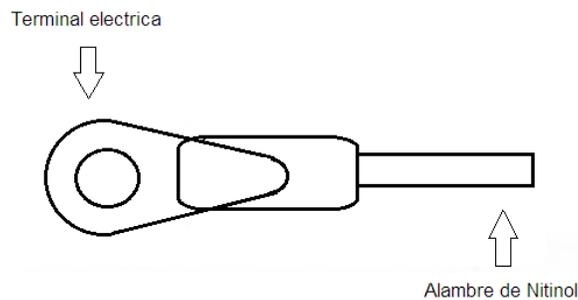


Figura 3.2.1 Terminal de enganche para alambre de Nitinol

Resultados de experimentación, del alambre de nitinol con un diámetro de (0.010")

Mencionemos los puntos de mayor importancia del comportamiento del alambre de nitinol.

1. La velocidad de reacción del Nitinol depende de la cantidad de corriente circulante.
2. El Nitinol adquiere una temperatura muy alta en los extremos donde se conectan las terminales de la fuente de tensión, casi de manera instantánea.
3. Si circula una corriente pequeña por el material este reacciona de manera proporcional.
4. La recuperación del material es más lenta que su reacción.



Diametro Pulg (mm)	Resistencia Ohms/pulg (ohms /m)	Corriente aproximada en 1 seg. (mA)
<b>0.0015 (0.38)</b>	22.6 (890)	55
<b>0.002 (0.050)</b>	12.7 (500)	85
<b>0.003 (0.076)</b>	5.9 (232)	150
<b>0.004 (0.10)</b>	3.2 (126)	200
<b>0.005 (0.13)</b>	1.9 (75)	320
<b>0.006 (0.15)</b>	1.4 (55)	410
<b>0.008 (0.20)</b>	0.74 (29)	660
<b>0.010 (0.25)</b>	0.47 (18.5)	1050
<b>0.012 (0.31)</b>	0.31 (12.2)	1500
<b>0.015 (0.38)</b>	0.21 (8.3)	2250
<b>0.020 (0.51)</b>	0.11 (4.3)	4000

Tabla 3 Parámetros de corriente para el Nitinol

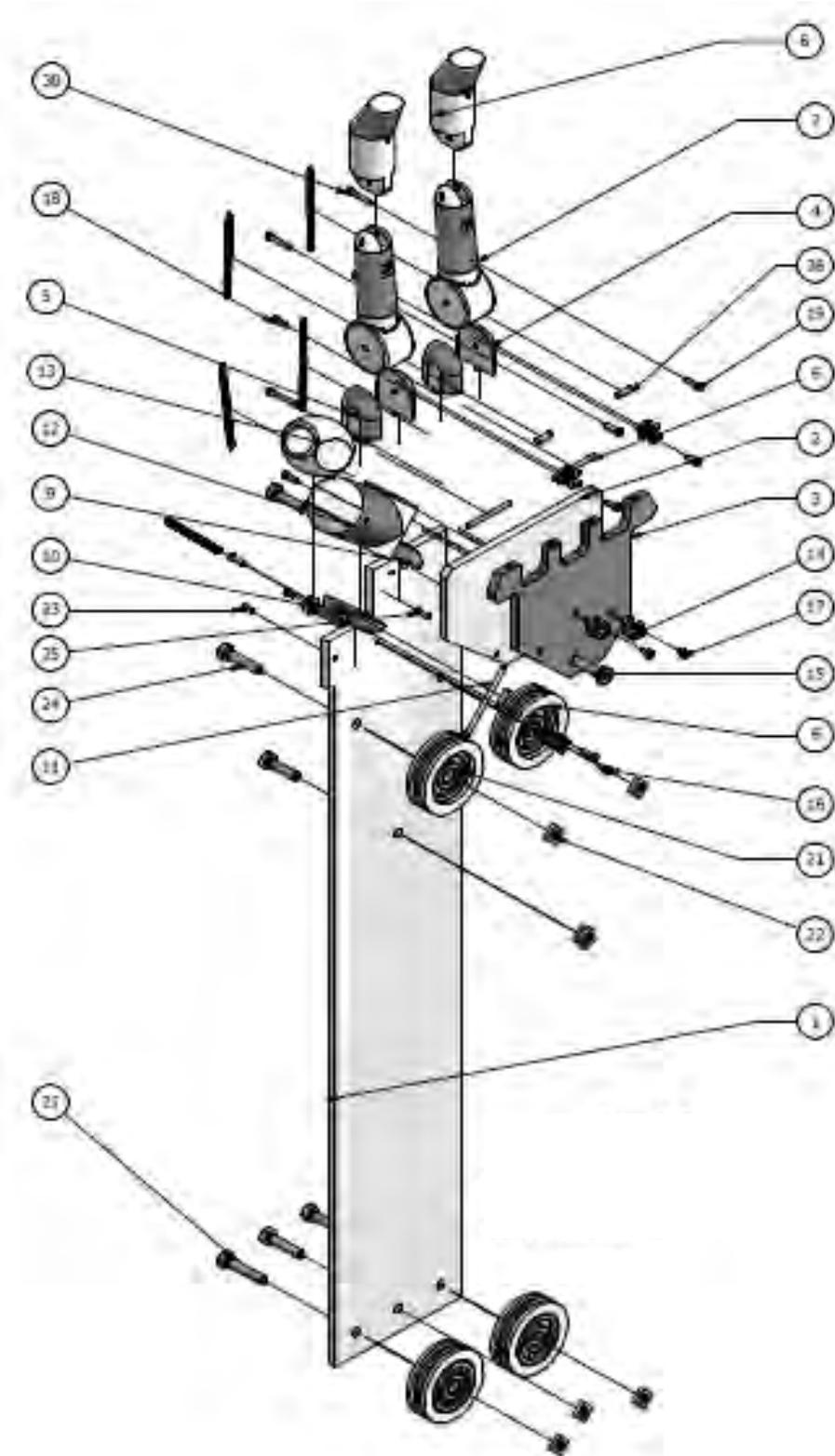
Conociendo un poco sobre el funcionamiento del alambre de nitinol como actuador, el siguiente paso es adaptarlo al sistema mecánico, para llevar a cabo este procedimiento analicemos la composición y funcionamiento del prototipo de mano mecánica conocido como hardware del sistema al igual que el circuito electrónico.

### 3.3 Prototipo de mano mecánica.

Este prototipo fue elaborado en el laboratorio de Mecánica Aplicada de la FES Aragón. Su constitución es sencilla cuenta con tres dedos ubicados sobre una superficie plana (palma), dos de ellos son manipuladores con la misma longitud y con dos grados de libertad, mas el pulgar que solo tiene un grado de libertad, el movimiento es independiente para cada dedo. Este diseño permite tener una opción no muy lejana de similitud con la mano humana en cuanto a proporción.



### 3.3.1 despiece de la mano actuada por Nitinol.





Pieza	Cantidad	Nombre y descripción
1	1	Barra parte superior
2	1	Palma de la mano inferior
3	1	Palma de la mano superior
4	3	Soporte para articulación derecho
5	3	Soporte para articulación izquierdo
6	5	Ejes de articulación dedo índice y medio
7	2	Articulación inferior
8	2	Articulación superior
9	1	Barra parte inferior
10	2	Tornillo de montaje para la mano
11	1	Eje de articulación dedo pulgar
12	1	Articulación inferior dedo pulgar
13	1	Parte superior dedo pulgar
14	8	Sujetadores
15	1	Tornillo de montaje de palmas a la barra
16	1	Tornillo de montaje de polea superior derecha
17	2	Tornillos de montaje en para sujetadores en palma
18	3	Tornillos de montaje para resortes en palma
19	6	Tornillos de montaje para sujetadores en dedos
20	7	Tornillos de montaje para resortes en dedos
21	4	Poleas de direccionamiento del alambre
22	6	Tuercas
24	1	Tornillo de montaje polea superior izquierda
25	1	Tornillo de montaje de palmas superior e inferior
26	2	Obstructores de movimiento de articulaciones
27	3	Tornillo de montaje para poleas derecha izquierda parte inferior

### 3.4 Descripción de componentes del prototipo de mano mecánica.

El trabajo en conjunto de cada uno de los componentes beneficia la operación del material actuador permitiendo una mejor eficiencia de funcionamiento.

Los componentes que se describirán a detalle en esta sección son:

1. Mano mecánica.
2. Barra simuladora de brazo.
3. Alambre con memoria de forma.
4. Resortes helicoidales de tracción.
5. Poleas.



## **Mano mecánica.**

El mecanismo usado en el diseño de la mano actuada por Nitinol esta basado en ciertos movimientos de la mano humana centrándose más en los dedos. Lo que se pretende es lograr movimientos que sean funcionales, haciendo uso de los materiales con memoria de forma.

## **La barra simuladora de brazo.**

Esta barra sirve como soporte para la mano así como también para el soporte de las poleas de tal manera que se encuentran sujetas rígidamente a la misma. La barra es de un material rígido para evitar deformaciones causadas por el actuador.

## **Alambre con memoria de forma.**

Este elemento del sistema constituye una de las partes más importantes del prototipo ya que de su comportamiento se derivan los criterios de diseño. La función del alambre es brindar el movimiento de las articulaciones. Este desplazamiento es debido a las fluctuaciones térmicas inducidas por una corriente eléctrica y a que en todo momento se encuentra sujeto a una fuerza proveniente de un resorte helicoidal que trabaja en tracción.

## **Resorte.**

Los resortes helicoidales se encuentran acoplados a cada articulación de los dedos. La función del resorte en el dispositivo, es mantener una fuerza de extensión en el alambre la cual es indispensable para que se dé el efecto de contracción y elongación del mismo ya que el material empleado no fue sometido previamente a ningún proceso de educación. Así mismo, el resorte tiene como fin hacer que regrese el alambre a la posición original al ser enfriado. La fuerza que produce el resorte es contraria a la reacción del alambre el alambre deberá vencer esta fuerza para que las articulaciones tengan movimiento.

## **Poleas.**

La acción de estas poleas es cambiar la dirección así como también reducir la fricción en el alambre, permitiendo que el material no tenga que deslizarse sobre una superficie en la cual genere calor y un esfuerzo mecánico en el material. De esta forma obtendrán mejores resultados en la operación del prototipo.



### 3.5 Adecuación del nitinol al prototipo de mano mecánica.

Conociendo la estructura del prototipo y sus dimensiones (ver tabla 3.5), determinaremos la longitud necesaria en el alambre del nitinol, y así conseguir la mayor cantidad de movimiento en los dedos de la mano prototipo.

Consideremos el ángulo que se genera al trasladar el dedo del punto A al punto B (ver la figura 3.5.1). Y realicemos los siguientes pasos:

1. Calcular la longitud que se desplaza el dedo.
2. Relacionar la longitud de la mano con el porcentaje de contracción del alambre y la distancia que recorre el dedo.

Con estos datos se obtendrá una aproximación de la longitud de alambre.

Pieza	Características	Dimension (cm)
Dedo manipulador 1	1er falange	7
	2do falange	2
Dedo manipulador 2	1er falange	7
	2do falange	2
Dedo pulgar	1er falange	6
Palma	Ancho	8
	Altura	10
Barra simuladora de brazo	Longitud	27
Poleas	Radio	1.5

3.5 Dimensiones de prototipo de man

Considerado la longitud del dedo en el punto A y la longitud en el punto B que es menor, por el efecto de contracción de la punta del dedo, encontraremos la distancia que recorre dicho dedo.

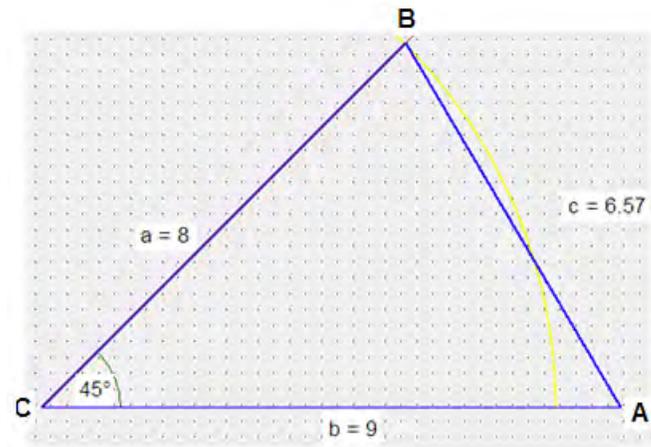


Figura 3.5.1 simulación de translación del dedo

Usando ley de cosenos

Tenemos:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

$$c^2 = 9^2 + 9^2 - 2(81) \cos(45)$$

$$c^2 = \sqrt{47.445}$$

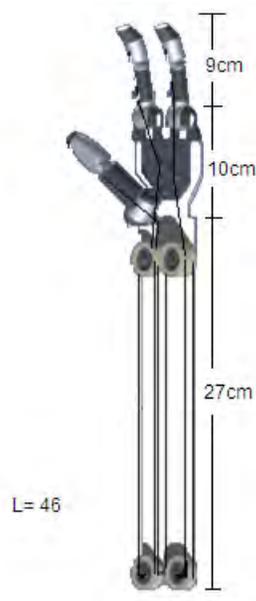
$$c = 6.57$$

Sabemos que el alambre de nitinol se contrae aproximadamente un 8% de su longitud, y considerando que la distancia que debe recorrer el dedo es casi 7 centímetros.

Tenemos:

$$\frac{100\% * 7cm}{8\%} = 87.5 cm$$

donde : 87.5 cm Es la longitud del alambre de nitinol para conseguir una contracción del 7 cm aproximadamente. Pero tomemos es cuenta las dimensiones del prototipo (ver figura 3.5.2)



La suma de las longitudes del prototipo nos da un resultado de 46 cm, que es un poco mas de la mitad de la longitud calculada, por lo que se tomara como longitud total el doble 92 cm.

Consideremos que a mayor longitud del alambre mayor será la contracción por lo que podemos utilizar alambres de mayor longitud para pruebas experimentales, por tanto en cada uno de los dedos emplearemos un cable de 92 cm.

### 3.5.2 Prototipo de mano mecánica

## 3.6 Circuito electrónico 1.

La resistencia óhmica con la que cuenta el alambre produce el efecto joule generando calor y provocando el cambio de fases en el material. Para lograr esto es necesario hacer circular corriente eléctrica.

Anteriormente se conecto una fuente de tensión variable en el modulo de pruebas, esto permitía la contracción inmediata del musculo de Nitinol y no el control de activación y desactivación, ni la velocidad de contracción del mismo, además generaba un calentamiento excesivo.

La solución mas sencilla de las variables anteriores se logra manipulando el paso de corriente en cada musculo de nitinol mediante un interruptor el cual proporcionara una señal de entrada de activación al sistema para entregar una señal de salida adecuada para cumplir esta necesidad.

La velocidad de contracción se definirá mediante una prueba con distintas ondas cuadradas generadas por un microcontrolador, una onda cuadrada tiene ciertas ventajas en el material actuador, la oscilante entre encendido y apagado permite que el calor fluya hacia las zonas frías reduciendo los puntos de acumulación de calor, que son por lo regular los extremos donde se aplica la corriente eléctrica, permitiendo mantener un control del material por mayor tiempo, sin causar daños



por el calor. Estas variables se resolverán desarrollando un circuito de conmutación. Que será activado en función de dicha señales que generara el microcontrolador, después de procesar la señal de entrada generada por el operador.

### 3.6.1 Propuesta de diseño del circuito electrónico.

Tomando en cuenta lo anterior y el diseño de la mano mecánica se determinaron los puntos en los cuales estará basado el sistema electrónico (Ver figura 3.6.1).

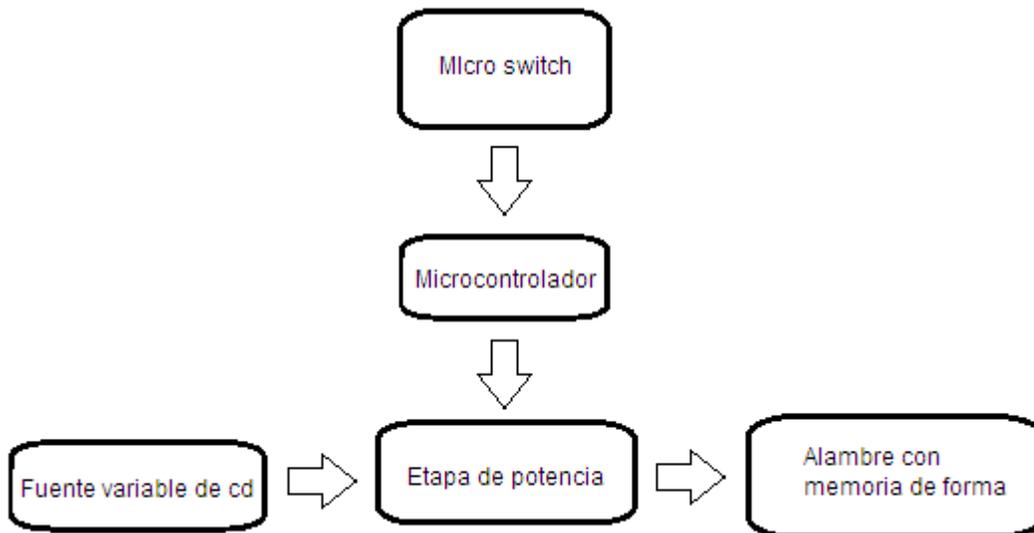


Fig. 3.6.1 Secuencia de diseño.

#### Descripción de componentes.

En este punto se explica a detalle los componentes de mayor importancia que componen cada una de las cuatro etapas del circuito electrónico.

#### Micro-Switch.

Esta etapa se denomina de activación esta compuesta por tres micro-Switch que serán activados por la fuerza física del operador a elección libre, cada uno de los micro-switch activaran alguno de los tres dedos según su asignación.



## **Microcontrolador.**

Es de gran ventaja el uso de un microcontrolador dentro del sistema electrónico, ya que se puede reprogramar el modo en que procesara las señales de entrada para posteriormente generar una salida de conveniencia para el material actuador, el microcontrolador que se empleara es de la familia de micro controladores PIC de microchip el integrado PIC16F627.

## **Etapa de potencia y conmutación.**

La etapa de potencia nos sirve como conector entre el microcontrolador y el material actuador. Esta compuesta por tres un transistores uno para cada dedo, los transistores conmutaran en función de la señal cuadrada, haciendo que la corriente que circule por los músculos de Nitinol también señal cuadrada los transistores a emplear en el circuito de conmutación es el TIP 41 cumple con las necesidades para el circuito soporta una corriente en su colector de hasta 4 Amp un rango mayor al que le será aplicado con la fuente de poder. Para poner en corte y en saturación el dispositivo.

## **Fuente variable de cd.**

La fuente variable de tensión es la parte generadora de calor, al ser variable nos permite llevar a cabo pruebas de velocidad de actuación al cambia el nivel de voltaje de salida.

La determinación de la cantidad de corriente esta relacionada con el diámetro del material, entre mas grueso sea el calibre del alambre se necesitara mayor cantidad de corriente circulante para generar calor y provocar la transición del material.

## **3.7 Desarrollo del circuito electrónico 1.**

En resumen el circuito electrónico (ver figura 3.7) está diseñado para un total de tres músculos o alambres de Nitinol representados por las resistencias R7, R8, R9 conectadas en paralelo dentro del diagrama, los botones B0, B1, B2 activaran la operación de cada uno de los músculos conectados en serie a los colectores de los transistores Q1, Q2, Q3. La asignación de los botones es la siguiente B0 para el transistor Q1, B1 para el transistor Q2, B2 para el transistor Q3, los transistores trabajaran en corte y saturación, la forma de trabajo de cada transistor se lleva a cabo por medio de una señal de prueba cuadrada en la base del transistor generada por el microcontrolador cuando sea activado alguno de los micro-switch.

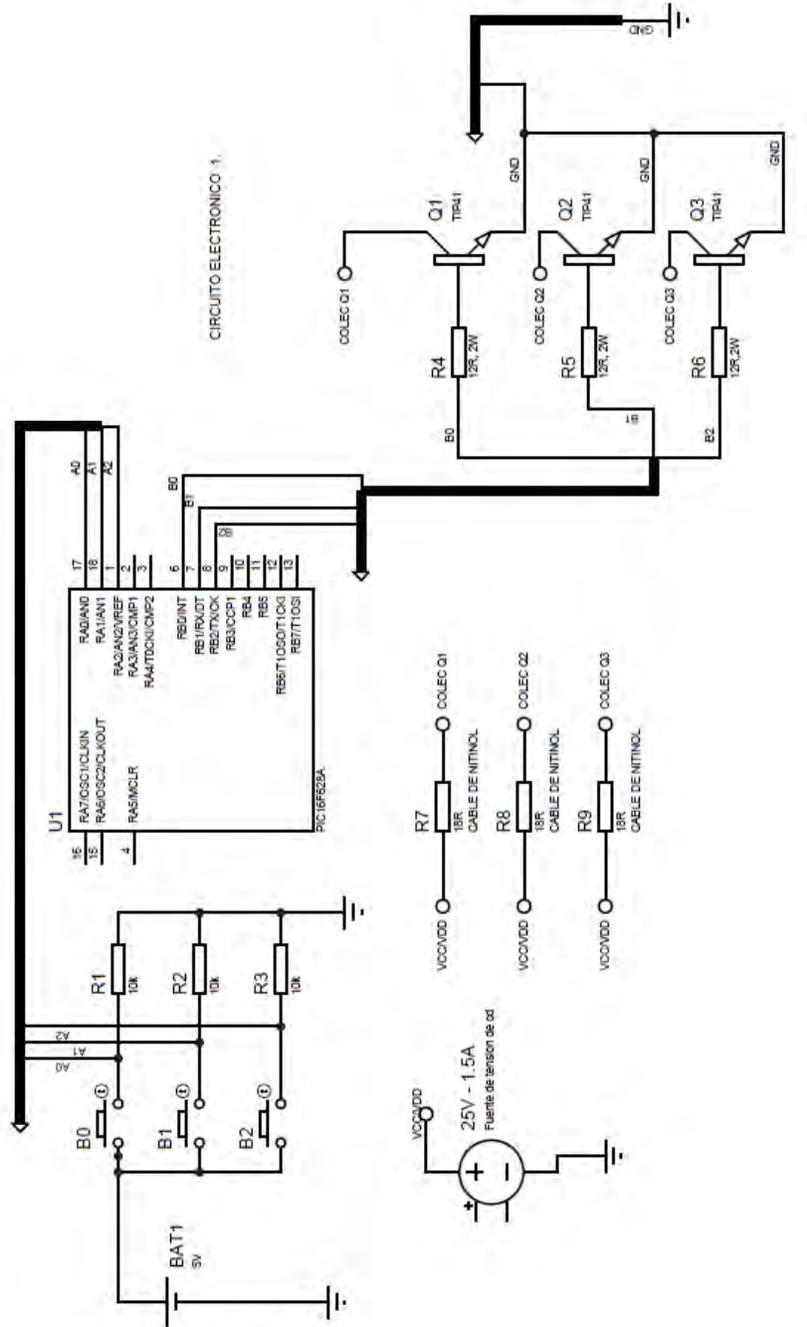


Figura 3.7 Diagrama 1 circuito para la operación de actuadores de la mano mecánica



### 3.8 Software del microcontrolador del circuito1.

Deducirá las funciones que efectuara el circuito electrónico. Este algoritmo detectara los datos de entrada generados por el operador. 1 para cuando sea necesario activar el dedo, y 0 para desactivarlo.

Una vez que es obtenido el dato lógico de cualquiera de los tres switch que sea accionado se procesara esa información en el microcontrolador para posteriormente generar una señal de salida de onda cuadrada a 5000 pulsos por segundo para el dedo pulgar, 2500 y 1500 pulsos por segundo para los dedos restantes. Esto permitirá contemplar la velocidad con la que actúa cada uno de los dedos de la mano.

El diagrama de flujo muestra la secuencia que se debe seguir para la programación del algoritmo que cargaremos al microcontrolador. (Ver figura 3.8)

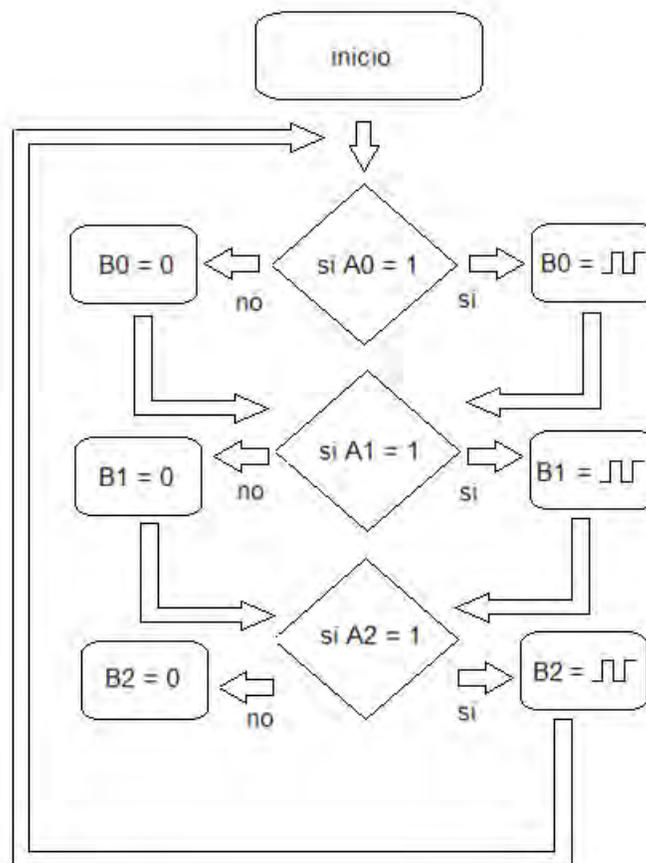


Figura 3.8 Algoritmo de programación 1



En seguida se observa el código a cargar en el microcontrolador ya comprobado su funcionamiento en el simulador proteus.

Proteus es una herramienta que permite simular circuitos electrónicos con microcontroladores. Sus prestaciones los han convertido en el más popular simulador para la familia PIC.

#### **CODIGO 1**

} }

```
#include <18F2550.h>

#fuses HS,NOWDT
#use delay(clock=20000000)
#use standard_io(A)
#use standard_io(B)

void main () {

while (1)
{
if(input(PIN_A0)==1) {
output_high(PIN_B0);
delay_us(5000);
output_low(PIN_B0);
delay_us(5000);
}
else{
output_low(PIN_B0);
}
if(input(PIN_A1)==1){
output_high(PIN_B1);
delay_us(2500);
output_low(PIN_B1);
delay_us(2500);
}
else{
output_low(PIN_B1);
}
if(input(PIN_A2)==1){
output_high(PIN_B2);
delay_us(1500);
output_low(PIN_B2);
delay_us(1500);
}
else{
output_low(PIN_B2);
}
```

El código está desarrollado en el compilador CCS de ccsinfo, la ventaja de escribir en lenguaje c es que permite que la extensión de los programas realizados en este lenguaje sea de menor número de líneas, ya que cuenta con ciertas librerías para la configuración y programación de los microcontroladores PIC, además de que permite transportar los códigos de un PIC a otro (de cualquier familia) sin esfuerzo alguno. Esto permite que sea más fácil el desarrollo de proyectos con este tipo de microcontroladores.



## 4. Diseño del circuito electrónico de operación.

Los resultados del diseño anterior, dan pauta a enfocarse en el control del alambre de nitinol, para realizar un mejor estudio del comportamiento del material, se utiliza un nuevo diseño de mano mecánica que es actuada con un solo hilo de nitinol. En este apartado se estudiara un poco sobre el nuevo prototipo, una vez conocidas sus características se plantean los puntos para el diseño del circuito electrónico.

### **Segundo prototipo de mano mecánica.**

El prototipo anterior y este nuevo prototipo tienen bastante similitud en funcionamiento y componentes utilizados para su desarrollo. Cada uno de estos componentes tiene una función en particular que contribuye a aprovechar el comportamiento del alambre con memoria de forma.

En la siguiente serie de imágenes (Ver tabla 4.1) se muestra la constitución del prototipo en uso. Y se describirán a detalle los elementos que lo componen.

Descripción de componentes en el prototipo:

6. Mano.
7. Barra simuladora de brazo.
8. Alambre con memoria de forma.
9. Resortes helicoidales de tracción.
10. Poleas.

### **Mano.**

Su funcionamiento es parecido a un gripper, cuenta con tres grados de libertad, es activada por un solo hilo de Nitinol, dándonos una ventaja en cuanto al consumo de corriente. Se pretende lograr movimientos funcionales, haciendo uso de los materiales con memoria de forma.



A	B	C
 <p data-bbox="264 877 613 1150">El prototipo tiene una composición sencilla, similar a un gripper, es activado por un solo alambre de nitinol que ejerce una fuerza en la parte superior del dedo manipulador que a su vez moviliza el dedo pulgar.</p>	 <p data-bbox="634 877 984 1115">El alambre de nitinol al contraerse, provocara una acción de cierre en las articulaciones y viceversa al recuperarse por medio de la temperatura ambiente y la fuerza de extensión.</p>	 <p data-bbox="1008 877 1357 1073">La cantidad de corriente circulante provocara en las articulaciones cierta posición, que se busca lograr por medio de la modulación de ancho de pulso.</p>

Tabla 4.1 nuevo prototipo 1

### Barra rígida.

Esta barra sirve como soporte para la mano así como también para el arreglo de dos poleas para direccionar el alambre de nitinol, estas se encuentran sujetas rígidamente. La barra es de un material rígido para evitar deformaciones causadas por el la contracción del material actuador.

### Alambre con memoria de forma.

Este elemento constituye una de las partes más importantes del prototipo, los criterios de diseño se derivan del comportamiento del material. Por un lado el alambre dará vida a las articulaciones debido al desplazamiento provocado por las fluctuaciones térmicas inducidas por una corriente eléctrica.



## **Resorte.**

Los resortes helicoidales se encuentran acoplados a cada articulación de los dedos. La función del resorte en el prototipo es mantener una fuerza de extensión en el alambre de nitinol, siendo indispensable para que se dé el efecto de contracción y elongación del mismo. La fuerza que produce el resorte es contraria a la reacción del alambre el alambre deberá vencer esta fuerza para que las articulaciones tengan movimiento.

## **Poleas.**

La acción de las poleas es cambiar la dirección así como también reducir la fricción en el alambre, permitiendo que el material no tenga que deslizarse sobre una superficie en la cual se genere un esfuerzo mecánico.

## **4.1 Puntos a considerar para el diseño del circuito electrónico de operación de la mano mecánica.**

Conocidas las características del prototipo en uso y de algunos antecedentes, los puntos para el diseño del circuito electrónico son los siguientes:

1. Circuito de medición de movimiento, este circuito tiene que ser capaz de percibir las señales que genere el operador por medio de un sensor.
2. Software del microcontrolador, procesara las señales provenientes del circuito de medición de movimiento y generara las necesarias para operar el músculo de nitinol.
3. La fuente de alimentación tendrá las siguientes característica debe ser ligera y portátil para su transporte dentro del prototipo.

Objetivos para el desarrollo.

En cuanto al diseño del circuito de medición de movimiento, se plantea captar movimientos del operador, lo cual se puede resolver por medio de un sensor de movimiento y una adecuación de señal para poder emplearla en nuestro microcontrolador.

El microcontrolador mantendrá la posición de las articulaciones. Esto se desarrollara de manera experimental por medio de una corriente modulada por ancho de pulso generada por este dispositivo al captar la señal del circuito de activación. Y en conjunto controlaran la operación de apertura y cierre de la mano.

Mencionemos algunos puntos para el diseño de la fuente de alimentación. Al usar una mano mecánica actuada con un solo alambre de Nitinol, se tendrá un menor consumo de corriente en comparación con el prototipo anterior, tomando en



cuenta esta característica se buscara la mejor opción para alimentar el prototipo, ya sea con una batería, con las características de ser ligera y que ocupe poco espacio o un circuito elevador de voltaje, diseñado según las necesidades.

## **4.2 Propuesta para el diseño del circuito de medición de movimiento.**

Existen distintos métodos para activar los mecanismos de las manos robóticas. Como son: señales mioeléctricas, señales de voz ó movimiento, entre otras.

- a) Las señales mioeléctricas son señales electromiográficas que generan los músculos las cuales son procesadas para el control virtual o físico de una prótesis.
- b) Una señal de voz es procesada y comparada con un patrón específico, al ser similar genera una nueva señal que puede ser aprovechada con cualquier fin.
- c) Una señal de movimiento, es generada cuando un sistema específico capta movimiento, por ejemplo de un dedo, del antebrazo o alguna otra articulación del cuerpo.

Se pueden mencionar un sinfín de métodos de generación de señales. Pero basémonos en el método más práctico para el prototipo, la generación de señales por medio del movimiento, el diseño del circuito se basara en detectar el movimiento del cuerpo, lo cual lograremos por medio de algún sensor. Como primer paso se estudiaran algunos tipos de transductores que midan el movimiento y a su vez se seleccionara el más adecuado para el proyecto.

### **4.2.1 Sensores de capturar de movimiento.**

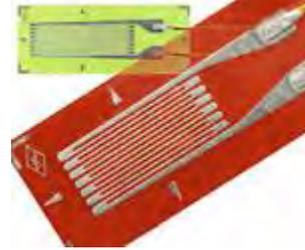
Un sensor es un dispositivo que mide una señal externa por lo cual es llamado también (sensor), esta señal es aprovechada por algún elemento que actúa de acuerdo a la señal de entrada.

Existen distintos tipos de sensores capaces de medir movimiento por ejemplo: las galgas extensométricas, sensores resonantes, flexensores, electrodos para captar las señales electromiográficas, etc.



## Galgas extensométricas.

Una galga extensométrica permite obtener una lectura de acuerdo a la deformación de la superficie en la que se ha adherido la galga. Basicamente una galga es una resistencia eléctrica, este tipo de sensor está constituido por una base muy delgada de material no conductor, sobre el cual va adherido un hilo metálico distribuido paralelamente, la resistencia de la galga es la misma que la del alambre y varía cuando se expone a una deformación.[5]



## Flex sensor

El Flex sensor, es un sensor que cambia su resistencia dependiendo de la cantidad de curva que experimenta. Cuanto más es la curva mayor es el valor resistivo. Su resistencia está entre los 10KΩ a 40KΩ aproximadamente, son de uso frecuente en guantes para detectar el movimiento del dedo





## Electrodo superficial de cloruro de plata

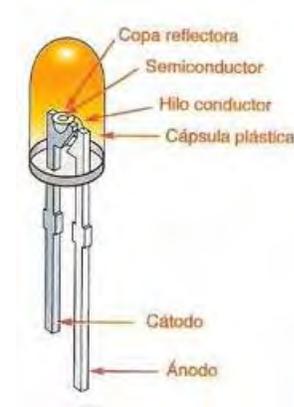
Estos electrodos son colocados sobre la piel, la capa de cloruro de plata permite que la corriente emitida por los músculos pase libremente a través de la juntura, generando pequeños potenciales pequeños.

La manera en que los electrodos son colocados en la piel para detectar los potenciales de acción de un músculo es el papel más importante y más complicado. Al colocar los electrodos en la piel se tiene que tener bien definido cuál será el músculo que proporcionará el potencial de acción.



## Sensores ópticos (fotodiodo)

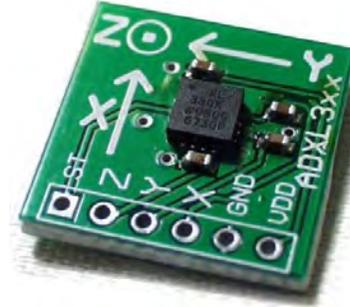
El silicio es un material refractivo, como son algunos otros materiales que se usan en la fabricación de dispositivos semiconductores por ejemplo el aluminio. Esta técnica, se hace incidir luz sobre el fotodiodo y excita un electrón creando un hueco con carga positiva, produciendo una fotocorriente. De esta manera se puede monitorizar el desplazamiento o deformación mediante un análisis del patrón de interferencia resultante.





## Acelerómetro.

Este sensor consiste en una masa suspendida de un delgado puente. Cuando el dispositivo es acelerado, la fuerza que experimenta dobla el delgado micropuente. Con piezorresistores situados cerca del micropuente de esta manera se puede detectar la aceleración. Otra opción es captar capacitivamente el desplazamiento de la masa.



### 4.2.2 Justificación del sensor a utilizar.

Al revisar algunos sensores con los cuales se puede medir el movimiento, se optó por utilizar el Flex sensor. Para esto se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- a) El sensor se puede acoplar a cualquier articulación del cuerpo permitiendo medir la flexión o estiramiento.
- b) Cuando el sensor es doblado se produce una resistencia de salida proporcional al el radio de la curva, lo cual nos sirve para controlar la posición del material actuador.

Trabaja con un voltaje de 5V de cd, al igual que algunas partes que constituyen el circuito.

- c) Su costo es muy accesible.
- d) Tiene un gran rango de aplicaciones, como son: aparatos de medición, guantes de mando en video juegos, instrumentos musicales, etc.

Tomando en cuenta sus características como son la opción de poder colocarlo en alguna articulación del cuerpo, su modo de funcionamiento, su facilidad para el



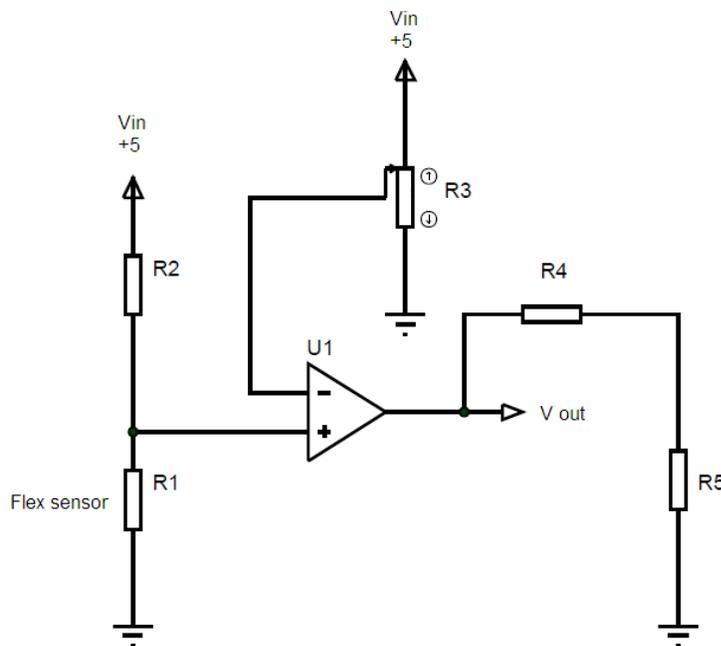
acondicionamiento de la señal y su bajo costo, el Flex sensor se ajusta de manera adecuada para el proyecto.

### 4.3 Configuraciones para la medición del movimiento con el Flexsensor.

A continuación describiremos las configuraciones, con las cuales el fabricante recomienda trabajar en diferentes aplicaciones, y finalmente seleccionaremos la de mayor conveniencia.

#### 1. Circuito comparador para accionamiento

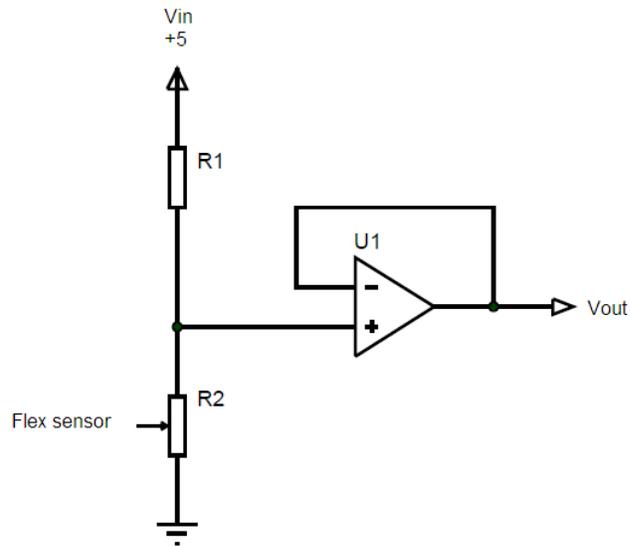
Si la tensión de entrada en el borne positivo es mayor que la señal de tensión en el borne negativo, el voltaje de salida ( $V_{out}$ ) será de la misma magnitud que el voltaje de la entrada positiva. Entonces el Flex sensor trabajara como interruptor, sin pasar a través de un microcontrolador (ver figura 4.3.)



4.3 Circuito comparador para accionamiento

#### 2. Divisor de voltaje

El Flex sensor está conectado en serie con  $R_1$  como se observa en la figura 4.3.1 Al variar la deflexión del sensor el voltaje de salida aumenta. El voltaje de  $R_2$  resultante es el voltaje en la salida. Con la ecuación [4.] se obtiene  $V_{out}$ .

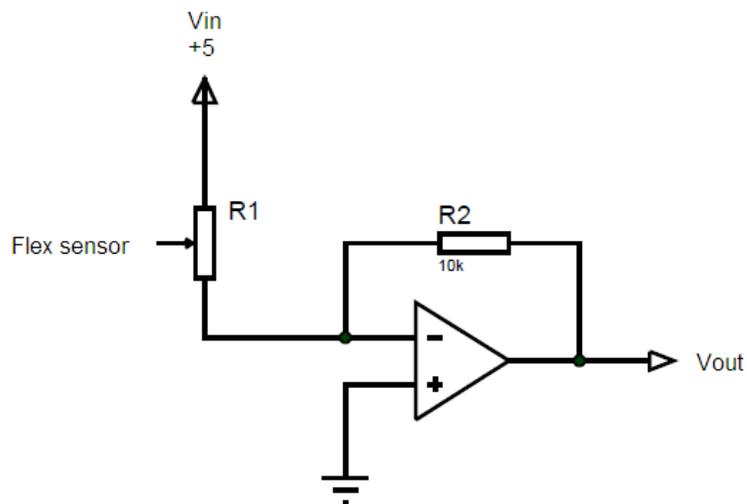


4.3.1 Flex sensor como divisor de voltaje

$$V_{out} = V_{in} \left( \frac{R2}{R1 + R2} \right) \quad Ec. [4.3]$$

### 3. Amplificador inversor

La entrada positiva está en la masa, y la señal se aplica a la entrada negativa a través del Flex sensor (R1), con retroalimentación desde la salida a través de R2. Debe usarse en casos cuando se trabaja con pocos grados de deflexión. Figura (4.3.2)



4.3.2 Amplificador inversor



$$V_{out} = -V_{in} \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad Ec. [4.3.1]$$

### 4.3.1 Justificación del método seleccionado.

Analicemos los métodos mencionados anteriormente, para seleccionar el más adecuado en el desarrollo del diseño del circuito.

#### 1. Divisor de voltaje

Estando el Flex sensor sin flexionar, podemos encontrar el voltaje min de salida utilizando la ecuación [4.3]

Se asume una  $R_1 = 20K\Omega$  y se tiene una  $R_{2min} = 14K\Omega$  (resistencia sin flexión)

Por lo tanto:

$$V_{out \min} = V_{in} \left( \frac{R_{2min}}{R_1 + R_{2min}} \right)$$

$$V_{out \min} = 5V \left( \frac{16K\Omega}{20K\Omega + 16K\Omega} \right)$$

$$V_{out \min} = 2.22V$$

Ahora calculemos el voltaje máximo de salida.

Tenemos que  $R_1 = 20K\Omega$  y tenemos una  $R_{2Max} = 38K\Omega$  (resistencia con flexión)

$$V_{out \max} = V_{in} \left( \frac{R_{2max}}{R_1 + R_{2max}} \right)$$



$$V_{out\ max} = 5 \left( \frac{38k\Omega}{20k\Omega + 38k\Omega} \right)$$

$$V_{out\ min} = 3.27V$$

Calculamos la variación de voltaje haciendo una resta entre  $V_{out\ máx.}$  Y  $V_{out\ min.}$

$$\Delta V = V_{out\ max} - V_{out\ min} \quad Ec. [4.3.2]$$

$$\Delta V = 3.27V - 2.22V$$

$$\Delta V = 1.05V$$

Haciendo un análisis se puede decir que esta configuración es la más adecuada ya que a la salida del circuito se tienen voltajes positivos del orden de los volts.

## 2. Circuito comparador para accionamiento.

Sabemos que el Flexsensor no actuara como interruptor en nuestro diseño por lo tanto no podemos utilizar esta configuración.

## 3. Amplificador inversor.

Al tener un voltaje de salida con signo negativo es de mayor trabajo adecuar la señal para ingresarla a un microcontrolador, para ello tendríamos que considerar una etapa más para obtener la señal positiva.

## 4.4 Diseño del circuito de medición de movimiento.

Una vez seleccionada la configuración de divisor de voltaje, procederemos a normalizar el voltaje por medio de un circuito basado en amplificadores operacionales. Con este circuito se generara una señal normalizada de salida que varíe de 0 a 5 volts, cuando el Flexsensor se encuentre sin flexionarse el voltaje de salida sea 0 V, y cuando se vaya incrementando la flexión el voltaje comience a incrementar de 0 hasta 5 V.



Mano del operador	Flexsensor	Prototipo de mano
		
		

Tabla 4.4 Propuesta de diseño

En la tabla 4.4 se observa la secuencia que debe llevar el diseño del circuito de medición de movimiento, el flexsensor se situara en el dedo medio de la mano derecha del operador por medio de un guante diseñado para montarse en la mano derecha como se observa en la figura, este al flexionarse contraerá el flexsensor aumentando su resistencia eléctrica, por tanto la mano mecánica deberá cerrarse. Cuando el flexsensor se encuentre extendido disminuirá su resistencia eléctrica provocando la recuperación de la mano mecánica.

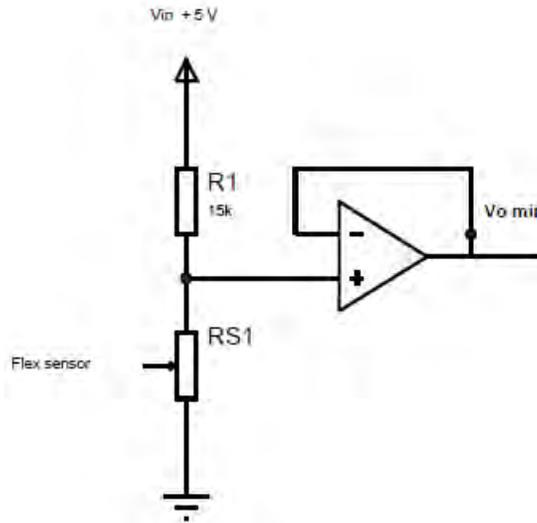
Tomando en cuenta los siguientes datos se inicia el diseño del circuito electrónico de normalización de voltaje:

1. Resistencia mínima del flexsensor  $8.7K\Omega$  el voltaje de salida deberá ser igual a  $0V$
2. Resistencia máxima del flexsensor  $15K\Omega$  el voltaje de salida máximo será igual a  $5V$

Consideremos que se trabajara con un voltaje de  $5V$  de DC para energizar el circuito de activación



Calculemos el voltaje de salida mínimo ( $V_o \text{ min}$ ), utilizando el circuito divisor de voltaje (ver figura 4.4.1) y su ecuación característica (Ec. 4.3.3).



4.4.1 Circuito divisor de voltaje

Tenemos que el  $V_o \text{ min}$  está dado por la siguiente ecuación.

$$V_o \text{ min} = \frac{R_{\text{min}}}{R_{\text{min}} + R1} * V_{cc} \quad \text{Ec}(4.3.3)$$

Se asume que  $R1 = 15k\Omega$

$$V_o \text{ min} = \left( \frac{8.7k\Omega}{8.7k\Omega + 15k\Omega} \right) * 5V_{cc}$$

$$V_o \text{ min} = 1.84V_{cc}$$

Ahora sustituyamos  $R_{\text{min}}$  por  $R_{\text{máx}} = 15k\Omega$ . Para calcular el voltaje de salida máximo.

$$V_o \text{ max} = \left( \frac{15k\Omega}{15k\Omega + 15k\Omega} \right) * 5V_{cc} \quad \text{Ec}(4.3.4)$$

$$V_o \text{ max} = 2.5V_{cc}$$

Haciendo un análisis se debe restar 2.5 volts a  $V_o \text{ min}$  para que cuando se tenga una resistencia mínima tengamos un voltaje a la salida de 0Volts



Entonces:  $V_{o2} = V_{omin} = 1.84V = \text{voltaje a restar}$

En siguiente circuito (ver figura 4.4.2) generaremos el voltaje a restar.

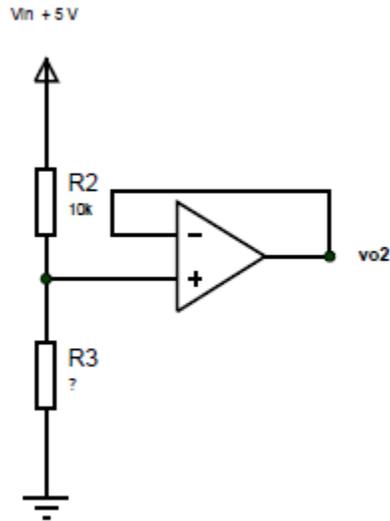


Figura 4.4.2 Circuito para generar Vo2

Tenemos que:

$$V_{o2} = \frac{R3}{R3 + R2} * v_{cc}$$

$$R3 = \frac{R2 * V_{o2}}{V_{cc} - V_{o2}} \quad Ec(4.3.5)$$

Asumimos a  $R2 = 10K\Omega$

$$R3 = \frac{10K\Omega * 1.84V}{5V - 1.84V}$$

$$R3 = 5.822K\Omega$$

Será necesario añadir un circuito restador para obtener el resultado deseado. Utilizando el siguiente circuito (ver figura 4.4.3) para realizar la operación de resta.

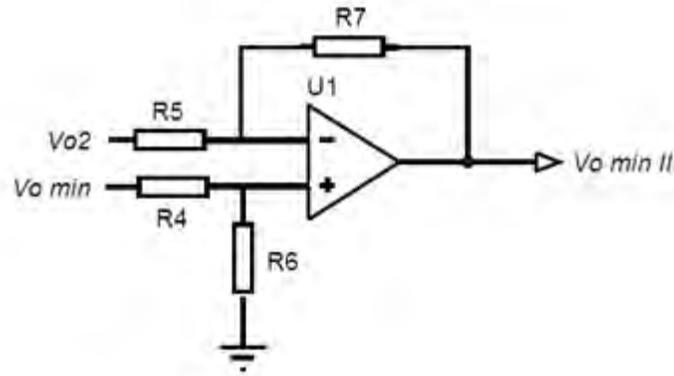


Figura 4.4.3 Circuito restador

Se emplea la ecuación (4.5) para restar  $V_{o2}$  y  $V_{o\ min}$ :

Se sabe que  $R5=R4$  y  $R6=R7$   
Es conocido que  $V_{o2} = 2.541V$

$$V_{o\ minII} = \frac{R6}{R4}(V_{o\ min} - V_{o2}) \quad Ec(4.3.6)$$

$$V_{o\ minII} = \frac{R6}{R4}(1.84V - 1.84V)$$

$$V_{o\ minII} = 0V$$

Ahora para calcular el  $V_{o\ maxII}$ , se utiliza la ecuación (4.3.7)

$$V_{o\ maxII} = \frac{R6}{R4}(V_{o2} - V_{o\ max}) \quad Ec(4.3.7)$$

Se despeja a  $R6/R4$  de (4.3.7):

$$\frac{R6}{R4} = \frac{V_{o\ maxII}}{V_{o\ max} - V_{o2}} \quad Ec(4.3.8)$$

Se asume que  $V_{o\ máxII} = 5V$



Entonces se tiene que:

$$\frac{R6}{R4} = \frac{5V}{2.5V - 1.84V}$$

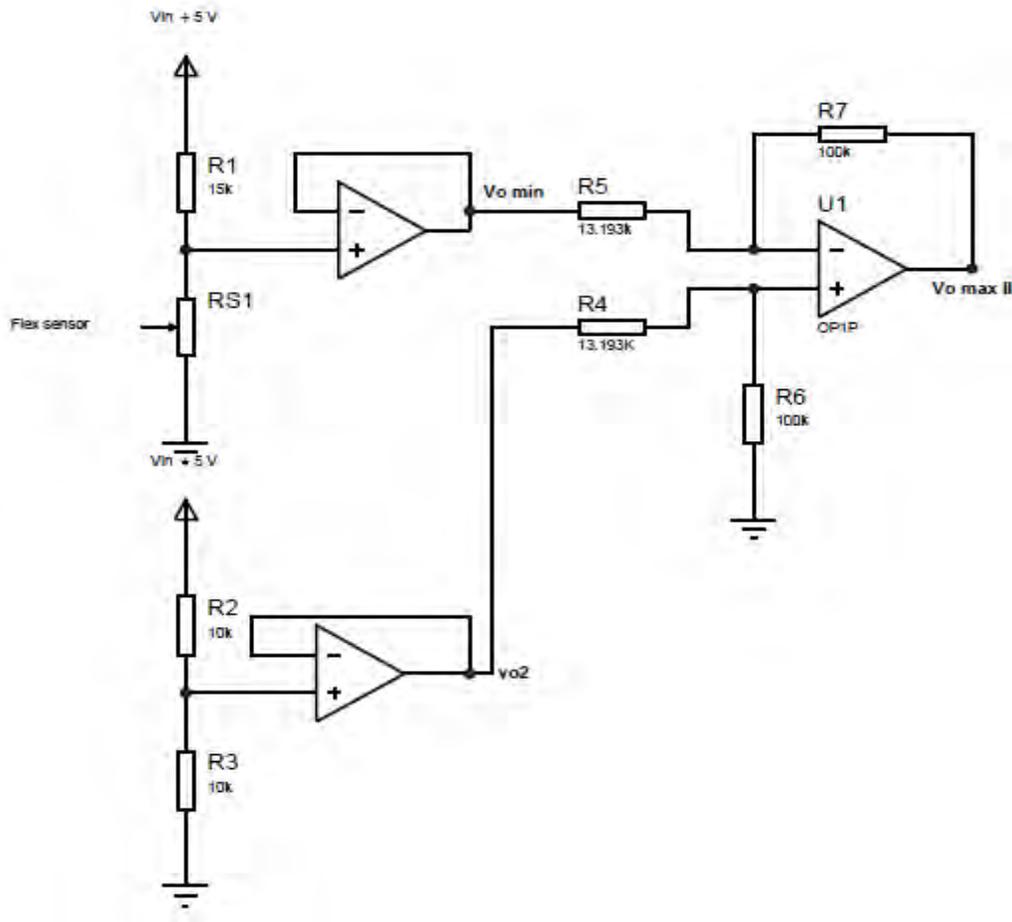
$$\frac{R6}{R4} = 7.58V$$

Se asume a  $R6 = 100k\Omega$ , entonces:

$$\frac{100K\Omega}{7.58V} = R4$$

$$R4 = 13.193K\Omega$$

La figura (4.4.4) Muestra el diagrama del circuito para la normalización de los voltajes del circuito de accionamiento.





Se pueden utilizar potenciómetros de mayor valor resistivo a los calculados para ajustar el voltaje de salida o usar resistencias, según valores comerciales más cercanos.

Se empleara el integrado (LM324N). Este dispositivo cuenta con cuatro amplificadores operacionales dentro de su encapsulado y puede ser polarizado con voltajes desde (3 hasta 32V) de corriente continua. Siendo un dispositivo Ideal para esta etapa del circuito ya que se evitamos generar tensiones negativas.

Lecturas del diseño.

Unidad	Inicial		Final	
	Calculado	Medido	Calculado	Medido
$R (\Omega)$		8.7K		15K
$V (v)$	0	0.04	5	4.898

Tabla 4.5 lecturas de salida del circuito de normalización.

Los resultados medidos con los calculados (ver tabla 4.5) tienen una tolerancia de  $\pm 0.5V$  aproximadamente. Cuando se tiene una resistencia de  $8.7K\Omega$  se obtiene un valor de voltaje de  $0.04V$  para cuando se tiene una resistencia máxima de  $15K\Omega$  en la salida tenemos  $4.898V$ .

Una vez normalizado el voltaje de entrada del Flexsensor, continuaremos con la segunda parte del diseño del circuito electrónico, lo que es el software para unir las distintas etapas del sistema, para lo cual utilizaremos un microcontrolador PIC16F876 de microchip.

#### 4.5 Software del microcontrolador del circuito-2.

El software del diseño anterior generaba tres señales cuadradas variables en frecuencia una para cada dedo de la mano. En este diseño se generara una señal cuadrada fija en frecuencia con un ciclo de trabajo variable (Ver figura 4.5). Un microcontrolador PIC será el encargado del procesamiento de datos provenientes del circuito de activación y generar los datos convenientes a la salida.

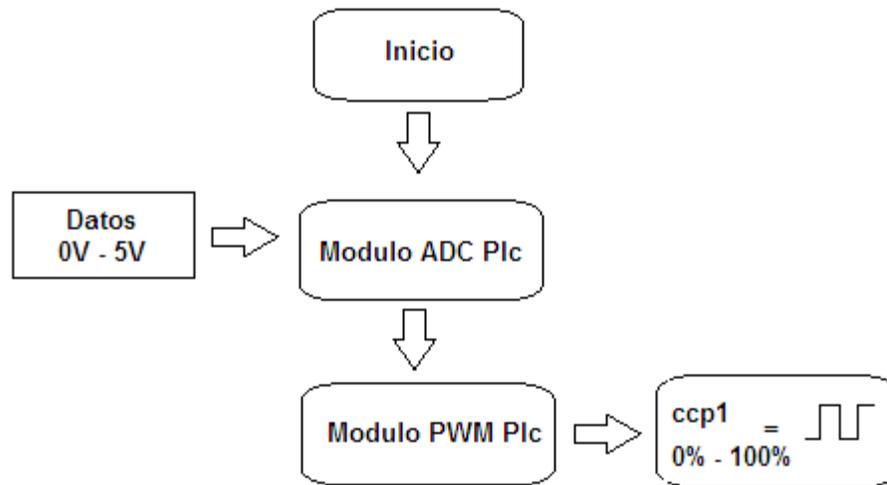


Figura 4.5. Secuencia de procesamiento de datos

El circuito de activación entrega una señal variable de 0 a 5 volts, los cuales serán capturados por el microcontrolador en una de sus entradas analógicas (A0), estos datos serán procesados en el convertidor analógico digital del microcontrolador para generar una señal cuadrada con el módulo PWM, correspondiente al valor de voltaje de entrada. Por ejemplo cuando se tenga un valor de 0 volts el ciclo de trabajo de la señal cuadrada sea 0% y cuando exista un valor de 5 volts el ciclo de trabajo sea el 100% de manera ideal.

La modulación del ancho pulso controlara la cantidad de energía circulante en el material actuador, buscando mantener la posición de las articulaciones de la mano en función de la energía entrante.

El siguiente código realiza la secuencia planteada en el diagrama de flujo (figura 4.5) del procesamiento de datos, fue elaborado en el compilador CCS y simulado en proteus.

## CODIGO 2

```

#include <16f876.h>
#define device adc=10
#define fuses HS,NOWDT
#define use delay (clock = 20000000 )
  
```

```

int16 valor;
#define int_ad
void ad_int(){
  
```



```

set_adc_channel(0); //Función interrupción AD
valor=read_adc(); //Valor de fuente analógica...
set_pwm1_duty(valor); //a Duty de PWM
}
void main() {
  disable_interrupts(global);
  setup_port_a(ALL_ANALOG); //Habilitación RA0 analógico
  setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); //Reloj interno RC canal 0

  setup_timer_2(T2_DIV_BY_1,99,1); //PR2=99, Tpwm=225us
  setup_ccp1(CCP_PWM); //CCP1 en modo PWM
  setup_ccp2(CCP_COMPARE_RESET_TIM //CCP2 modo comparacion
  setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_1); //Configuración TMR1
  set_timer1(0); //Puesta a 0
  ccp_2=1000; //Muestreo cada 1ms
  enable_interrupts(INT_AD); //Habilitación Interrupción AD
  enable_interrupts(global); //Habilitación Interrupción global

do {
} while (TRUE);
}

```

Resumen de conexión de los componentes al microcontrolador.

Puerto	Pines	Circuito
A	RA0	Acondicionador de voltaje del flexsensor
C	CCP1	Acoplador de señal con el elemento actuador

#### 4.6 Selección de la fuente de alimentación.

Considerando que por el actuador de nitinol debe circular aproximadamente 1Amp de corriente para que la mano mecánica actúe a una velocidad de contracción considerable debemos tomar en cuenta el valor resistivo del alambre, que es de 21.75Ω.

Entonces de la Ec 4.5 calculemos el valor del voltaje necesario que debe tener la fuente.

$$V = I * R$$

Ec 4.6



$$V = 1A * 21.75\Omega = 21.75V$$

La fuente de alimentación debe tener las siguientes características consideremos un voltaje y corriente un poco mayor para la selección.

Características de la fuente de alimentación	Valor
Voltaje	21.75 (V)
Corriente	1 (A)

La fuente de alimentación debe ser pequeña, ligera y portátil. Lo más viable para cumplir estas características es seleccionar una batería. Por lo cual revisaremos algunos tipos.

#### 4.6.1 Tipos de baterías.

Una batería es un dispositivo que almacena energía, existen distintos tipos por lo que se refiere a su tamaño y algunas otras características externas o internas, la siguiente lista muestra una serie de acumuladores habitualmente usados.

##### Baterías de ácido plomo (Pb).

Características:

Está constituida por dos electrodos de plomo, de manera que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo, incrustado en una matriz de plomo metálico; el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico. Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones, entre ellas en los automóviles.

- Bajo costo.
- Altamente contaminantes.
- Peso excesivo, al estar compuesta principalmente de plomo.
- Voltajes normalizados de 6/4Ah, 12/1Ah



### **Pila de níquel-hierro (Ni-Fe)**

El cátodo se compone por hileras de finos tubos formados por láminas enrolladas de acero niquelado, estos tubos están rellenos de hidróxido de níquel u oxihidróxido de níquel. El ánodo está formado por cajas perforadas delgadas de acero niquelado que contienen polvo de óxido ferroso. El electrolito es alcalino, una disolución de un 20% de potasa cáustica en agua destilada. Los electrodos no se disuelven en el electrolito, las reacciones de carga/descarga son completamente reversibles y la formación de cristales de hierro preserva los electrodos por lo cual le da una gran duración.

#### **Características:**

- Bajo coste
  - Fácil fabricación
  - Admite sobrecargas, repetidas descargas totales e incluso cortocircuitos sin pérdida significativa de capacidad
  - No es contaminante, no contiene metales pesados y el electrolito diluido se puede usar en aplicaciones agrícolas.
  - Muy larga vida útil, algunos
- Desventajas:**
- Voltajes 1,2/800mAh y 1.4/600mAh

### **Baterías de níquel cadmio (Ni-Cd).**

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada, para su reutilización. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan poca capacidad.

#### **Características:**

- Admiten sobrecargas aun que ya no almacena energía
- Admiten un gran rango de funcionamiento
- Voltaje proporcionado: 1,2V.  
Capacidad usual: 0.5 a 1.0 Amperios (en pilas tipo AA)



**Baterías de polímeros de litio (Li- Po) Características:**

Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes. Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración, como manos libres bluetooth.

Las baterías LiPo se venden generalmente de 1S a 4S lo que significa el número de celdas que contiene una batería:

Li-PO 1S: una celda, 3,7 V.

Li-PO 2S: dos celdas, 7,4 V.

Li-PO 3S: tres celdas, 11,1 V.

Li-PO 4S: cuatro celdas, 14,8 V.

Tabla comparativa de los diferentes tipos de acumuladores.

Tipo	Pb	Ni-Fe	Ni-Cd	Li-ion	Li-Po
Voltaje por elemento (v)	2	1.2	1.25	3.16	3.7
No de recargas	1000	+ de 10.000	500	4000	5000
Tiempo de carga (h)	8-16	4-8	10-14	2-4	1-1.5



### Efecto memoria en las baterías.

El efecto memoria, se produce por una mala gestión en la carga de las baterías o por calentamiento reduciendo el voltaje y su potencia, lo que ocurre en el interior de la batería es que los compuestos encargados de generar la corriente eléctrica crean cristales que modifican las características antes mencionadas (ver figura 4.6.1). Esto se llega a producir después de un largo tiempo de uso, para evitar esta causa es recomendable descargar completamente la batería para el caso de las baterías de Níquel-cadmio, en las de iones de litio pasa lo contrario lo mejor es evitar que se descarguen por completo y evitar las sobrecargas, la baterías de iones de litio o similares apenas y sufren de este efecto.



Figura 4.6.1 Efecto memoria

### 4.6.2 Justificación de la batería a utilizar.

Las baterías de iones de litio y las de polímero de litio son las que cumplen mejor con las características necesarias para el accionamiento del prototipo de mano mecánica, tienen una capacidad de descarga superior a las de otro tipo de compuesto, sus dimensiones son pequeñas y entregan una mejor potencia y duración, el efecto memoria es muy reducido en este tipo de baterías.

La siguiente descripción se refiere a una batería de polímero de litio encontrada en el mercado.



## Batería de polímero de litio



## Características

- Dimensiones - 1 X 4.5mm
- Peso - 30 gr
- No de celdas - 2
- Voltaje de salida – 7.4v
- Corriente -1000mah
- Corriente de carga 800mA
- Su precio oscila entre los 200 y 250 M/N

Para conseguir los 21.75 volts para nuestro diseño será necesario hacer un arreglo de 3 baterías conectadas en serie donde tendremos un voltaje a la salida de 22.5 V que entran en el rango de operación.

Las recomendaciones que dicta el fabricante en cuanto al funcionamiento es evitar que la batería no llegue a menos de 3.5V mientras se está descargando, para evitar esto se diseñó el siguiente circuito comparador de voltaje.

De la Ec.4.6.2

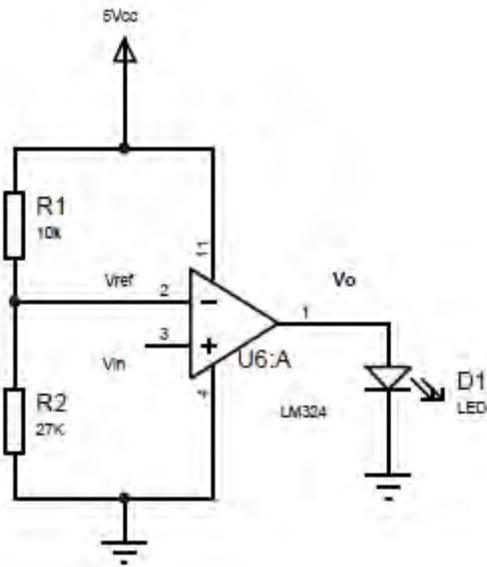
$$V_{ref} = \frac{R1}{R1 + R2} * v_{cc} \quad Ec(4.6.2)$$

$$R2 = \frac{R1 * V_{ref}}{V_{cc} - V_{ref}} \quad Ec(4.6.3)$$

Suponemos a  $R1 = 10K$  y  $V_{ref} = 3.5$

$$R2 = \frac{10K\Omega * 3.5V}{5V - 3.5V} = 23.33K\Omega$$

Para la resistencia  $R2$  utilizaremos una de  $27K\Omega$  basándonos en valores comerciales, utilizaremos la siguiente configuración.



Circuito comparador de voltaje con lm324

El funcionamiento es el siguiente cuando  $V_{in}$  sea mayor que el  $V_{ref}$  se tendrá una salida positiva cercana al voltaje de alimentación por tanto el led encenderá. Cuando  $V_{in}$  sea menor que  $V_{ref}$  se tendrá una salida de 0 volts y el led se apagará. Esta será la indicación para recargar la batería antes de que llegue a los 3.5V.

$$V_{in} > V_{ref} (V_o = V^+ = 5V) \text{ salida positiva}$$

$$V_{in} < V_{ref} (V_o = V^- = 0V) \text{ salida negativa}$$

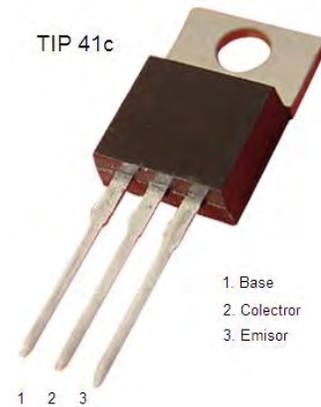
#### 4.7 Circuito acoplador de voltaje microcontrolador-fuente de alimentación.

Este circuito recibirá la señal del pin CCP1 del microcontrolador, la finalidad es trabajar con diferentes niveles de voltaje y a su vez tener un aislamiento eléctrico con el actuador, esto lo lograremos con un transistor BJT el cual trabajara en corte y saturación por lo cual es necesario calcular su resistencia de base. Para realizar esta tarea se propuso el transistor TIP 41c del tipo NPN de propósito general del cual analizaremos algunas de sus características.



## Tip41c.

Es un transistor BJT formado por un cristal de silicio activado por corriente que puede trabajar en tres zonas diferentes activa, corte y saturación, la zona activa se usa cuando es necesario amplificar señales, las zonas de corte y saturación trabajan de tal manera que son semejantes a un interruptor.



Características a máximo grado		TIP41c	
	Símbolo	Valor	Unidad
Corriente de colector	$I_c$	6	A
Corriente de base	$I_b$	2	A
Voltaje colector – emisor	$V_{CEO}$	100	V
Voltaje colector – base	$V_{CBO}$	100	V
Características eléctricas			
	Símbolo	Mínimo	Máximo
Ganancia de corriente continua	$h_{fe}$	15	75
Voltaje colector-emisor	$V_{EB}$	1.5	V



Para un transistor bipolar, la operación de conmutación es la siguiente: cuando la base está a unos 0,7 voltios por encima del emisor (y se suministra corriente suficiente a la base) el transistor conduce y entra en saturación. En esta situación, el transistor se comporta idealmente como un interruptor cerrado entre el colector y el emisor, como ilustra (Ver figura 4.7). Cuando la base está a menos de 0,7 V por encima del emisor, el transistor no conduce y se comporta como un interruptor abierto entre el colector y el emisor.

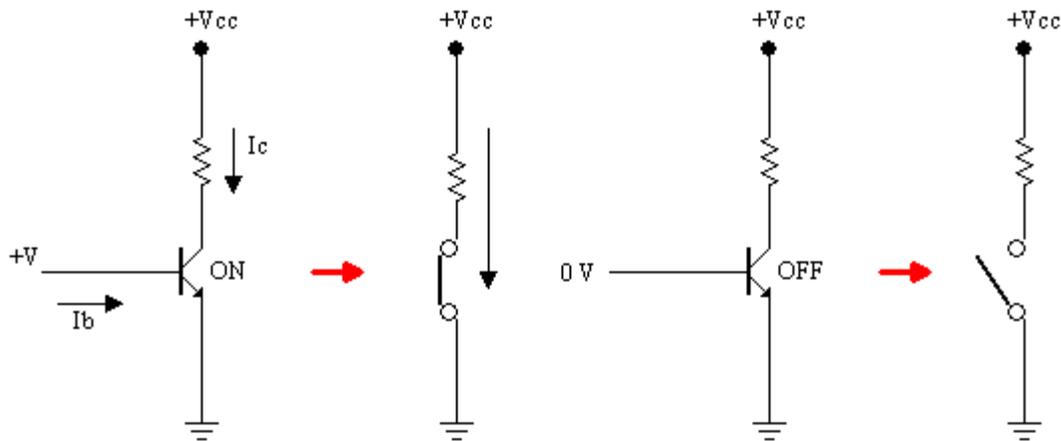


Figura 4.7 a) Transistor en saturación

b) Transistor en corte

Conocido su comportamiento y algunas de las características del transistor seleccionado, se concluye que cuenta con lo necesario, este soporta una corriente máxima de 6 Amp en operación continua y solo se empleara aproximadamente 1 Amp como máximo de corriente que es la que consumirá el elemento actuador, su rango máximo de voltaje entre colector y emisor es de 100V y en el circularan 21 V de corriente continua.

Para el diseño de esta etapa tomemos en cuenta lo siguiente, el transistor trabajara en corte y saturación, como ya se mencionó anteriormente es necesario calcular la resistencia de base, analicemos el siguiente circuito (ver figura 4.7.1).

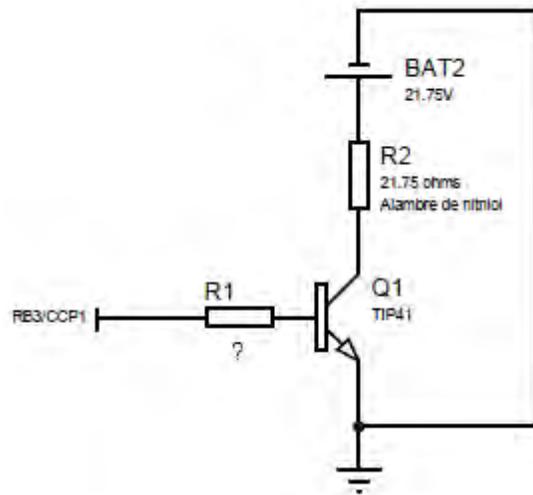


Figura 4.7.1 Circuito de análisis para el cálculo de la resistencia de base

De la Ec. 4.0 se calcula la corriente de colector:

Tenemos que  $R2 = R_C$

$$21 - R_C I_C - V_{CE} = 0 \quad \text{Ec. 4.0}$$

$$I_C = \frac{21.75 - V_{CE}}{R_C}$$

Conocemos que  $V_{CE} = 1.5$  y  $R_C = 25\Omega$

$$I_C = \frac{21.75 - V_{CE}}{R_C}$$

$$I_C = \frac{21.75V - 1.5V}{21.75\Omega} = 0.98mA$$

Una vez encontrada la  $I_C = 0.98mA$  calculemos la corriente de base con Ec 4.8

Conocemos que  $h_{fe} = 15$

$$I_B = I_C / h_{fe} \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$I_B = 980mA / 15$$

$$I_B = 65mA$$



De la Ec. 4.2 calculemos la resistencia de base

$$5V - I_B R_B - V_{BE} = 0 \quad \text{Ec. 4.8.1}$$

$$R_B = \frac{5V - V_{BE}}{I_B}$$

$$R_B = \frac{5V - 0.7V}{65mA} = 66.2\Omega$$

La resistencia de base es de  $66.2\Omega$  lo recomendable es usar una de menor tamaño de valor comercial para garantizar la saturación del transistor en este caso se propondrá una resistencia de  $58\Omega$ .

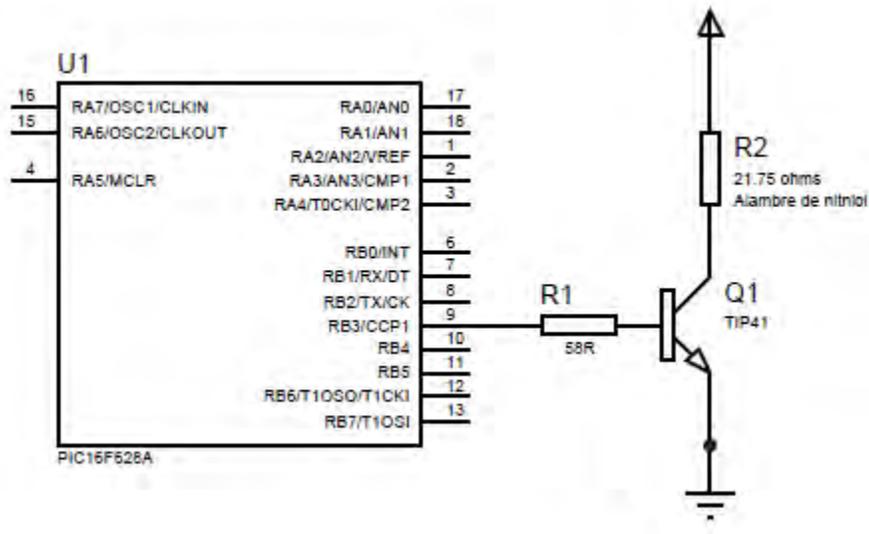


Figura 4.7.2. La resistencia de base se colocara en pin CCp1 del microcontrolador y el alambre de nitinol entre la fuente de alimentación y el colector del BJT.

#### 4.8 Diagrama del circuito electrónico de operación de la mano mecánica.

El circuito está compuesto por tres etapas

1. Etapa de activación donde tenemos el circuito de normalización de voltaje.
2. Etapa de procesamiento de datos caracterizada por el microcontrolador Plc.
3. Etapa de potencia donde se involucra la fuente de voltaje y circuito acoplador de voltajes.

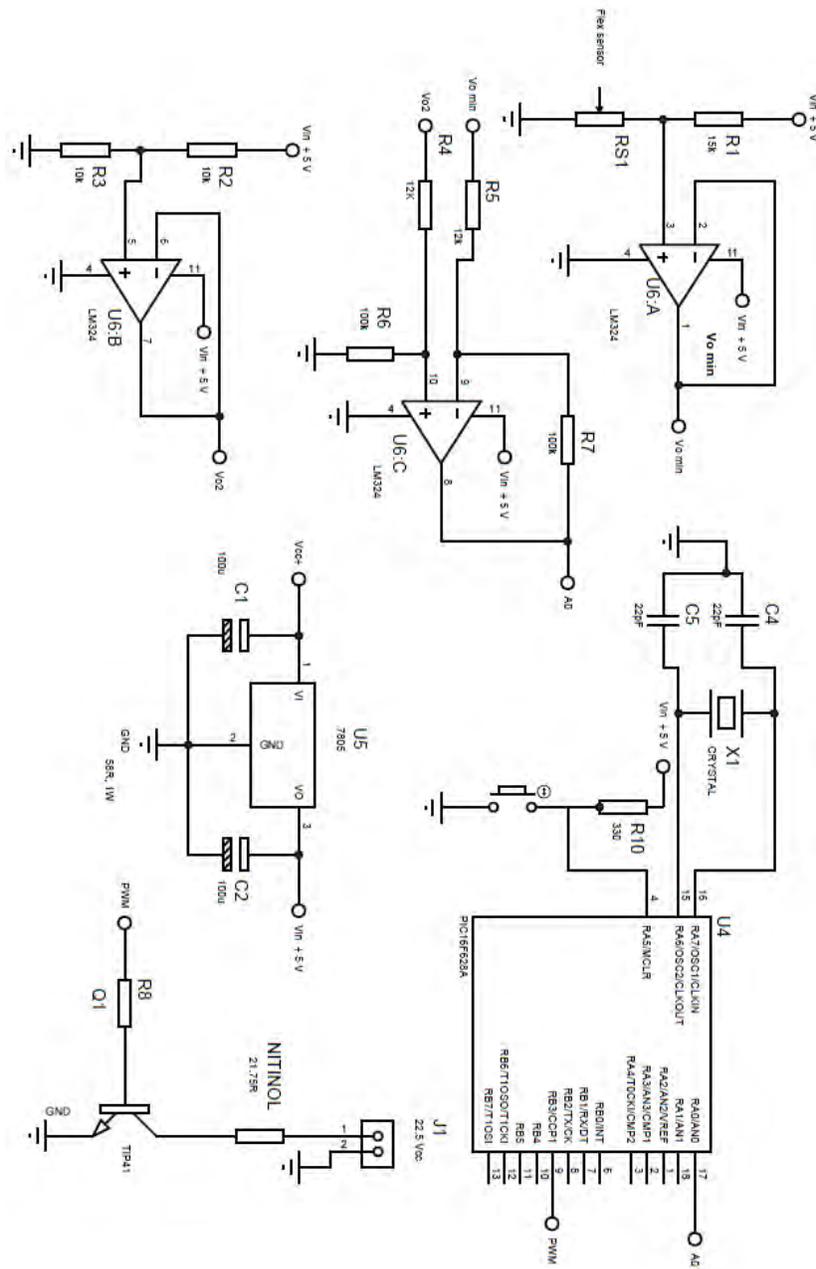


Figura 4.8.1 Diagrama del circuito electrónico de operación.



## 5. Resultados y conclusiones.

En este apartado se muestran las conclusiones y resultados de la experimentación y la experiencia adquirida durante el desarrollo de esta investigación y se plantean algunos puntos para desarrollos a futuro en base a este proyecto o algún otro.

### 5.1 Prototipo 1.

El conjunto mano robotizada - circuito electrónico, mostró resultados favorables, se obtuvo un movimiento en cada articulación al accionar alguno de los micro-switch del circuito, la velocidad de actuación de cada dedo fue distinta para cada número de pulsos asignados a cada salida.

En la siguiente secuencia de imágenes se presentan las características de mayor importancia, y los resultados de las pruebas realizadas al prototipo.

#### a) Prueba de actuación.

Imagen 1  
Posición inicial



Imagen 2  
Dedo pulgar activado.  
Tiempo de actuación: 0.58 seg  
Tiempo de recuperación 1 seg  
Voltaje aplicado: 25V /0.99A  
Frecuencia: 50 kHz





Imagen 3

Dedo manipulador 1 activado.  
Tiempo de actuación: 1.5 seg  
Tiempo de recuperación: 1.2 seg  
Voltaje aplicado: 25V / 0.99A  
Frecuencia: 25 KHz

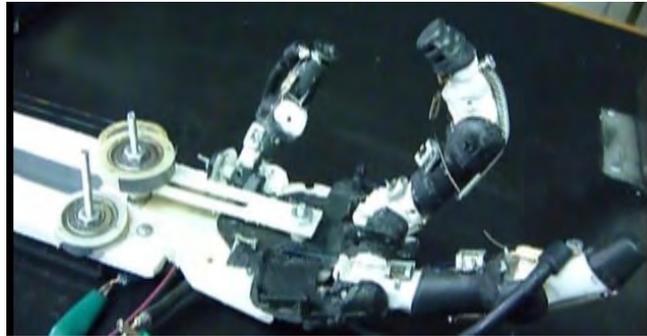


Imagen 4

Dedo manipulador 2 activado  
Tiempo de actuación: 2.0 seg  
Tiempo de recuperación: 1.2 seg  
Voltaje aplicado: 25V / 0.99A  
Frecuencia : 1.5 KHz



Imagen 5

Todos los dedos activados  
Tiempo de actuación: 9.0 seg  
Tiempo de recuperación: 0.8 seg  
Voltaje aplicado: 25V / 0.99A



## Resultados

La corriente circulante en forma de señal cuadrada permitió que:

- 1 Se obtuvieran velocidades de actuación distinta para cada caso.
- 2 El calentamiento de los alambres de Nitinol fuera menor en comparación con la aplicación de corriente directa en el banco de prueba.



- 3 La velocidad de reacción al activar todos los dedos se vio disminuida por la capacidad de la fuente de corriente.
- 4 La recuperación del material actuador es inversa a la velocidad de actuación, si la velocidad de actuación es más rápida la recuperación es más lenta.

b) Prueba de aprehensión.

Imagen 1

Prueba de aprehensión

Forma del objeto: rectangular

Dimensiones: 18x19x4.5

Peso aproximado: 100 gr



Imagen 2

Velocidad de actuación: 4.5 seg.

Tiempo de aprehensión: 1 min

Temp. de los músculos:  $\pm 70$  °C

Voltaje aplicado: 25V /0.99A





Imagen 3

Tiempo de recuperación: 5.75 seg.

Temp. De los músculos:  $\pm 10^{\circ}\text{C}$



La prueba de aprehensión se llevó a cabo con diversos objetos, sin embargo, existieron problemas para retener objetos con texturas lisa.

Resultados:

- 1 La textura de los dedos de la mano es lisa, lo cual disminuye la capacidad de agarre de objetos,
- 2 La distribución de corriente en todos los dedos, no permite que se obtenga un cierre total de la mano.
- 3 Es útil para el agarre de objetos ligeros y de dimensiones parecidas al objeto de prueba.

## 5.2 Prototipo 2.

La circuitería para este diseño se basó en generar una señal cuadrada modulada en ancho de pulso el objetivo es regular la cantidad de energía aplicada a la carga, al alambre de nitinol.

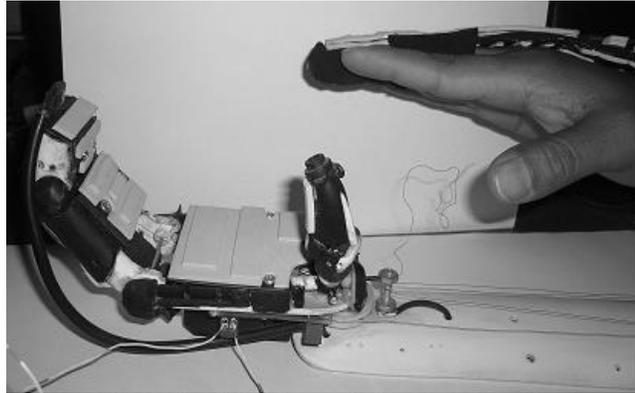
Las siguientes imágenes presentan el resultado de las pruebas realizadas.



### a) Prueba de operación y funcionamiento.

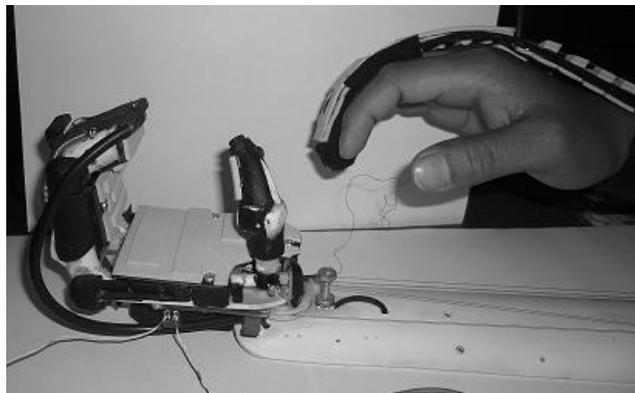
#### Posición inicial

Temp. Del actuador:  $\pm 26^{\circ}\text{C}$   
Voltaje aplicado:  $0.4\text{V} / 0\text{A}$   
 $45^{\circ}$  posición inicial.  
Ciclo de trabajo 0%



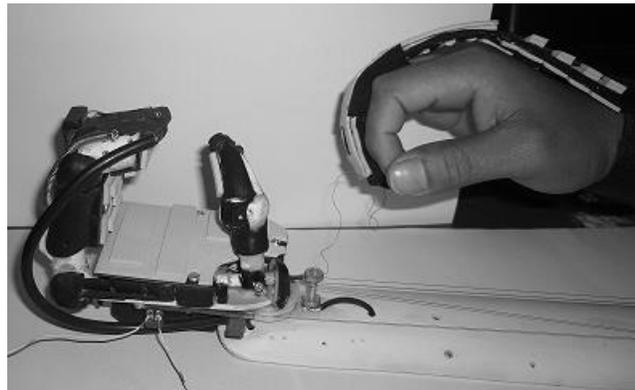
#### Posición media

Temp. Del actuador:  $\pm 65^{\circ}\text{C}$   
Voltaje aplicado:  $12\text{V} / 0.6\text{A}$   
 $48^{\circ}$  después de la posición inicial.  
Tiempo 10 min en posición media.  
Aumento de temperatura  $0.1^{\circ} / 2$  min  
Ciclo de trabajo 60%



#### Posición final.

Temp. Del actuador:  $\pm 60^{\circ}\text{C}$  –  $100^{\circ}\text{C}$   
Voltaje aplicado:  $22\text{V} / 0.95\text{A}$   
 $65^{\circ}$  después de la posición inicial.  
Tiempo 15 min en posición final.  
Aumento de temperatura  $0.5^{\circ} / 1.3$  min  
Ciclo de trabajo 80%





El comportamiento del actuador ante la regulación de energía presento un avance en su control, véanse los siguientes puntos:

#### Resultados.

- 1 El circuito electrónico funciona de tal manera que cumple con lo establecido en los objetivos, regulando la energía entrante en el material actuador controlada por el operador.
- 2 Se logró posicionar cada articulación por un tiempo considerable, sin embargo no se tiene mucha estabilidad, debido a los pequeños incrementos de temperatura. Para llevar la mano a cierta posición se hace fluir corriente modulada en ancho de pulso y posteriormente disminuye para mantener la temperatura adquirida en el actuador.
- 3 La reacción de la mano mecánica es más lenta en función de la acción del operador. Existe un desfase al activarla debido a que el material inicia su cambio de fase a la temperatura de 37 °C.
- 4 La recuperación del material se da en función de la temperatura adquirida durante su operación, entre más caliente este el actuador más lenta será su recuperación.
- 5 Así mismo, la cantidad de temperatura generada en el actuador es equivalente a la corriente aplicada en el mismo.



### 5.3 Conclusiones

Por los experimentos realizados en esta investigación sabemos que un sistema de actuación con nitinol se logra de la manera sencilla, basta con tener una fuente de calor y el material actuador, y como medio de enfriamiento la temperatura ambiente la dificultad es el control del nitinol por no ser un elemento lineal ya que existen diversas variables que pueden alterar su transición de fases

De acuerdo a los objetivos iniciales, la operación y funcionalidad del alambre de nitinol se cumplió en su totalidad. Se logró accionar la mano mecánica con los dos diseños de circuitos electrónicos y se realizaron pruebas del comportamiento del material actuador, arrojando resultados para posteriores estudios.

El sistema electrónico realizó su cometido a la perfección; el guante y el circuito de activación, capturan el movimiento del dedo medio de la mano derecha del operador y lo convierten en una señal modulada en ancho de pulso variante entre 0 y 5 volts, y a su vez el circuito de potencia diseñado con un transistor BJT conmuta de tal manera, que se obtiene una fluctuación térmica en el actuador al circular corriente de la fuente de alimentación.

La fuente de alimentación representada por el arreglo de tres baterías de polímero de litio, es adecuada para alimentar el sistema electrónico y el prototipo de mano mecánica. Cabe mencionar que si se aumenta el voltaje en el actuador, éste actúa más rápidamente. Debemos considerar que no se debe de exceder la corriente aplicada en el material, ya que se puede provocar un daño en el actuador por un calentamiento excesivo.

La primera parte de la experimentación se basó en deducir las características para el diseño, desarrollando un banco de pruebas para elegir el elemento que generaría la fuerza de extensión y así conocer las reacciones eléctricas y mecánicas del actuador para posteriormente adecuarlo al pro tipo de la mano mecánica.

La aplicación de los pulsos de corriente a distintas frecuencias, fue el primer paso para el control de los actuadores de nitinol teniendo un calentamiento más uniforme en el primer prototipo. Por los resultados es conocido que se pudo controlar la velocidad de actuación. La fuente de voltaje no jugó un papel de importancia en estos pasos experimentales, sin embargo se determinó que el consumo de corriente es de 1A para la activación y protección de cada tramo de 100cm de material actuador. Mencionando el funcionamiento físico de la mano mecánica este resulto funcional para seguir con el desarrollo de un nuevo prototipo mecánico y electrónico.



La opción de aplicar una corriente modulada en ancho de pulso para el calentamiento del actuador generó buenos resultados. Como ya se mencionó anteriormente se controló la posición de las articulaciones de la mano con una técnica encontrada mediante la experimentación, la aplicación de pulsos de corriente con determinado periodo hasta tener cierta posición y después disminuir el periodo de los pulsos, por medio del circuito de operación basado en un flexsensor. De esta manera se mantiene una determinada temperatura en el alambre por más tiempo. Aunque debemos considerar que la temperatura sigue aumentando en cantidades muy pequeñas. Estos aumentos de temperatura provocan que no se tenga un control exacto lo que no es benéfico para otro tipo de aplicaciones.

#### 5.4 Trabajos a futuro.

Si el nitinol se comportara como una máquina, convirtiendo la energía eléctrica en calor, lo ideal es que su eficiencia fuera el 100%, pero debido a que la reacción al enfriamiento es más lenta que el calentamiento, su eficiencia es baja.

Una solución a esta desventaja es usar algún método de enfriamiento como; líquidos refrigerantes, disipadores de calor, o bien usar alambres de nitinol más delgados, aunque sabemos que son más susceptibles a los cambios de temperatura, se pueden aislar y tener una linealidad en su funcionamiento, o en su defecto aplicar el uso de controladores clásicos PI, PD y PID para obtener mejores resultados en el control, con el objetivo de desarrollar un sistema más eficiente.



## Referencias bibliográficas.

1. Götz von Berlichingen. Recuperado desde:  
[http://es.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6tz\\_von\\_Berlichingen](http://es.wikipedia.org/wiki/G%C3%B6tz_von_Berlichingen)
2. Handyman <http://cyberneticzoo.com/?p=3005>
3. Mano Utah/MIT dextroux. Recuperado desde:  
<http://libra.msra.cn/Publication/2067238/design-of-the-utah-m-i-t-dextroux-hand>
4. Robot matsuoka hand. Recuperado desde:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/showciting;jsessionid=0DA9C39FC44AFFAF93DA04DD86C9ADB2?cid=5454228>
5. BarrettHand. Recuperado desde:  
<http://www.hizook.com/blog/2010/05/01/new-robot-hand-called-adaptive-gripper-robotiq-canadian-robotics-startup>.
6. Robonaut Recuperado desde: <http://yesidrobonauta.blogspot.mx/>
7. Mano DLR Recuperado desde: <http://www.service-robots.org/technologies.htm>
8. Mano Sheffield. Recuperado desde:  
<http://mindtrans.narod.ru/hands/hands.htm>
9. Shark hand. Recuperado desde:  
<http://www.wired.com/wiredscience/2008/06/video-robotic-h/>
10. Sadow hand. Recuperado desde: <http://www.shadowrobot.com/hand/>
11. Mano I- LIMB. Recuperado desde:  
<http://www.andade.es/fotos/articulos/documentos/2009628131550.pdf>
12. Mano robotica sensible al tacto. Recuperado desde:  
[http://www.tendencias21.net/Crean-un-robot-con-un-sentido-del-tacto-mas-sensible-que-el-de-los-humanos\\_a12213.html](http://www.tendencias21.net/Crean-un-robot-con-un-sentido-del-tacto-mas-sensible-que-el-de-los-humanos_a12213.html)



13. Revista EIA, ISSN 1794-1234 Numero 4p. 104,105. Materiales con memoria de forma. Noviembre 2005, Escuela de Ingenieria de Antioquia, Medellin (Colombia). Recuperado de:  
<http://revista.eia.edu.co/articulos4/art%209%20N4.pdf>
14. GEORGE B. KAUFFMAN. (1996). The Story of Nitinol. The history of Nitinol. The Chemycal Educator. Vol.2, No 2.
15. GÓMEZ ALEJANDRO, CARLOS ANDRÉS RESTREPO. (2005). Cables musculares. Escuela de Ingenieria de Antioquia, Medellin (Colombia). Numero 4p. 103,111.
16. SILVIA DE LA FLOR. (1998). Materiales con memoria de forma. P 13-39. Recuperado de:  
[http:// .td x.cat bitstream 10803 6863 6 06Sfl06de14.pdf](http://.td x.cat bitstream 10803 6863 6 06Sfl06de14.pdf)
17. Baterías, tipos, mitos y verdades. Recuperado desde:  
<http://www.xatakamovil.com/vari0s/baterias-tipos-mitos-y-verdades>
18. Baterías [http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa\\_%28electricidad%29](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_%28electricidad%29)
19. K. Otsuka and C. M. (1998) Wayman. Introducction to Shape Memory Materials. Shape Memory Materials. Cambridge University Press. p.3-45.
20. Lisandro Puglisi y Héctor Moreno, Prótesis robóticas, Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Automática, Ingeniería Electrónica e Informática.
21. Revista EIA, ISSN 1794-1234 Numero 4p. 103-111. Materiales con memoria de forma. Noviembre 2005, Escuela de Ingenieria de Antioquia, Medellin (Colombia)
22. Eduardo García Breijo, Compilador C Ccs y simulador proteus para microcontroladores Pic , Primera edición, Alfa Omega grupo Editor S.A , de C. v, Mexico. PP 117-125, 132-147.
23. Muhammad Rashid, Electrónica de Potencia, Tercera Edicion, Pearson Prentice hall, Capitulo 5 convertidores cd-cd.



24. [Microchip Tecnology Data sheet microcontroller PIC16F876,](#)
25. [Coughlin Robert. Aplicadores Operacionales y Circuito Integrados Lineales, Cuarta edición, Editorial Prentice hall, Mexico](#)
26. [Philips Semiconductors, Data Sheet, amplificador operacional, LM327N.](#)
27. [STMicroelectronics, Data sheet, High Efficiency Fast Recovery Diodes, BYW29](#)
28. [ON Semiconductors, Data Sheet, Silicon Power Transistor, Tip41.](#)
29. [NTE Electronics, Data sheet, Silicon Complementary Transistors General Purpose, NTE390](#)
30. [Spectra Symbol, Data sheet, Flex Sensor \(FS\), FS7954.](#)
31. [Fairchild Semiconductor, Data sheet, regulator de voltage, MC7806.](#)
32. [Persianas inteligentes. Recuperado de:  
http://www.eluniversal.com.mx/notas/459189.html](#)



## Anexo A.

### Propuesta de fuente de cd.

El diseño de este convertidor se realizó durante la experimentación y es considerado como propuesta para la fuente de alimentación.

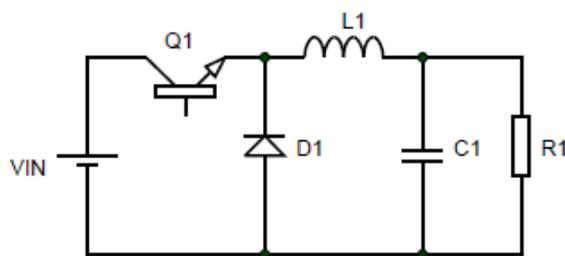
Su funcionamiento es el siguiente para convertir una entrada de voltaje de cd no regulada en una salida controlada también de voltaje de cd a un nivel deseado, por lo general la regulación de corriente se hace por medio de la modulación de un ancho de pulso a una frecuencia fija y el dispositivo de regulación en su mayoría es un BJT, MOSFET o IGBT de potencia. [23]

1 convertidores de voltaje

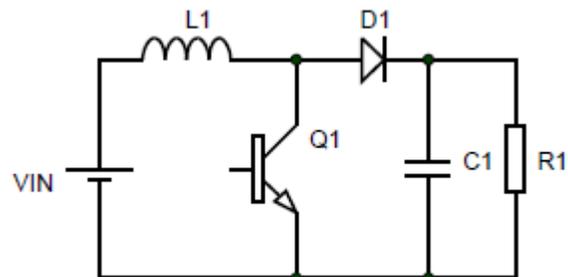
Los convertidores cd-cd básicos son (Ver figuras a, b, c):

- a) Reductor. El voltaje de salida es menor que el voltaje de entrada.
- b) Elevador. El voltaje de salida es mayor que el voltaje de entrada
- c) Reductor - elevador. Suministra un voltaje de salida que puede ser menor o mayor que el voltaje de entrada.

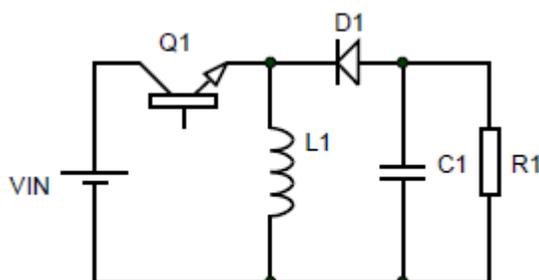
Los componentes principales de un convertidor cd-cd son el interruptor Q y el diodo D, al trabajo en conjunto de estos elementos se le llama proceso de conmutación [23].



a) Reductor



c) Reductor- elevador



c) Elevador

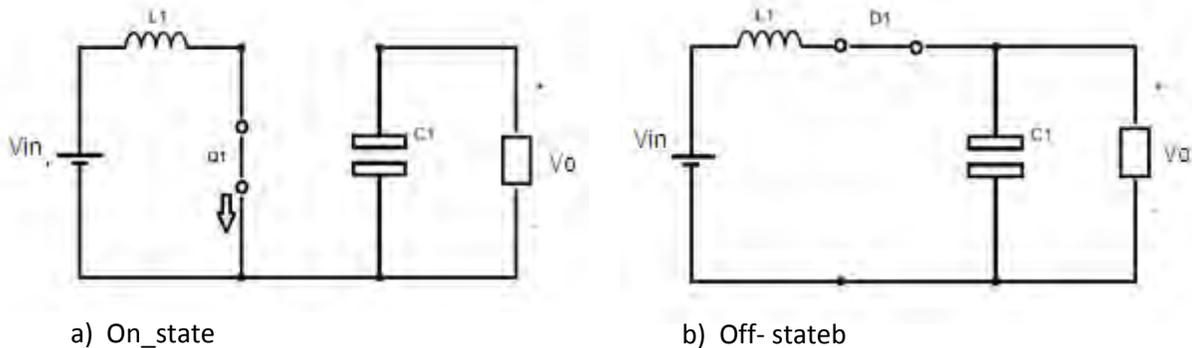


El convertidor más adecuado para el proyecto es el elevador, ya que obtiene a su salida una tensión continua mayor que la de su entrada. Así es posible utilizar una batería y elevar el voltaje de la misma. De esta manera el diseño de la fuente de cd tendrá la característica de ser portable.

### 1.2 Principio básico de funcionamiento del convertidor elevador.

El principio básico del convertidor elevador consiste en dos estados distintos dependiendo del estado del interruptor S (ver fig. 2):

Cuando el interruptor está cerrado a) (On-state) la bobina L almacena energía de la fuente, a la vez la carga es alimentada por el condensador C, Cuando el interruptor está abierto b) (Off-state) el único camino para la corriente es a través del diodo D y circula por el condensador (hasta que se carga completamente) y la carga [3]. Un convertidor elevador incrementa el voltaje de salida sin la necesidad de un transformador, su eficiencia es alta por los pocos componentes,



### 1.3 Diseño del prototipo del convertidor elevador.

El voltaje de entrada corresponde a una batería de plomo-acido a 6 V con una corriente de 4 A. el voltaje a la salida oscilara entre 12 V y 14 V a 2 A aproximadamente. Consideremos que la corriente de salida será la mitad de la corriente de entrada y el voltaje lo doble, según las reglas de este tipo de convertidor. Los siguientes datos muestran las características para el diseño del convertidor (Ver tabla 4.3). Finalmente en la (figura 4.9) se muestra el diseño del prototipo del elevador de voltaje.

Datos:	Donde
$V_i = 6$	$V_i = \text{voltaje en la entrada}$
$V_o = 12$	$V_o = \text{voltaje en la salida}$
$I_i = 4$	$I_i = \text{corriente de entrada}$
$I_o = 2$	$f = \text{Frecuencia de trabajo}$
$f = 50\text{Khz}$	$C = \text{capacitancia}$
$C = 4700\mu\text{F}$	$\Delta I = \text{corriente pico a pico del inductor}$
$\Delta I = 0.043\text{A}$	



Con las siguientes ecuaciones del convertidor elevador se determinaran algunos parámetros de diseño.

1. Ganancia  $M$

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{12v}{6v} = 2$$

2. Ciclo de trabajo  $K$

$$K = \frac{M - 1}{M} = \frac{2 - 1}{2} = 0.5 = 50 \%$$

3. Inductancia  $L$

$$L = \frac{V_i}{\Delta I f} = \frac{(6)(0.5)}{(0.043)(50,000)} = 1.4mH$$

4. Corriente promedio en el transistor  $I_d$

$$I_d = \frac{I_o K}{1 - K} = \frac{(2)(0.5)}{1 - 0.5} = 2A$$

5. Corriente pico en el transistor  $I_{d_{pico}}$

$$I_{d_{pico}} = \frac{I_o}{1 - K} + \frac{V_i K}{2lf} = \frac{2}{1 - 0.5} + \frac{(6)(0.5)}{2(1.4 \cdot 10^{-3})(50^3)} = 4.021A$$

6. Voltaje promedio en el transistor.  $V_{ds_{max}}$

$$V_{ds} = V_o(1 - K) = 12(1 - 0.5) = 6V$$

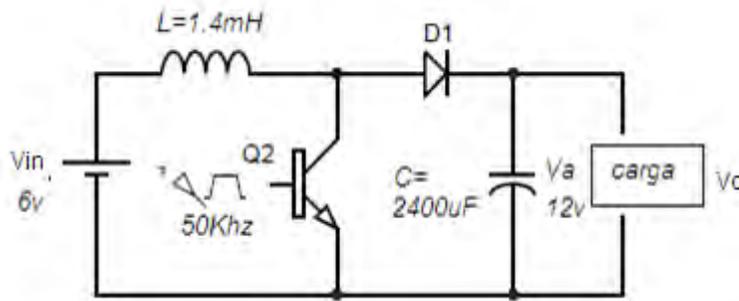
7. voltaje promedio en el diodo  $V_{ak}$



$$V_{ak} = V_o K = 12(0.5) = 6V$$

### 8. Voltaje promedio en el capacitor

$$V_c = V_o = 12V$$



4.9 Prototipo del convertidor elevador

Con los datos obtenidos en los cálculos se obtuvo el valor de la inductancia necesaria para el prototipo, los componentes de conmutación propuestos (Diodo schottky y BJT de potencia) corresponden a las siguientes características (ver tabla 4.5).

Componente	Modelo	Nemónico	Unidad	
<b>BJT</b>	<b>D717</b>		<b>V</b>	<b>A</b>
Corriente de colector continua		$I_C$	10	
Corriente de base continua		$I_b$	3	
Voltaje colector – emisor		$V_{CEO}$	10 0	
Voltaje base – collector		$V_{CB}$	10 0	
Voltaje base – emisor		$V_{EB}$	5	
			<b>Hz</b>	<b>Duty (%)</b>
Impulso de prueba			10 0	5
<b>Schottky</b>	<b>BYW29F-200</b>		<b>V</b>	<b>ns</b>
Tiempo de recuperación inverso		$trr$		25
Caída de voltaje			0.3	
Tensión inversa de pico repetitivo		$VRRM$	20 0	
				<b>A</b>
Corriente de conducción		$I_F$		8

Tabla 4.5



### Características de los componentes de conmutación

El transistor usado es un BJT D717 capaz de soportar una corriente de 10 A en el colector y un voltaje colector emisor de 100 volt de cd. El diodo schottky BYW29 de recuperación de eficacia alta es el otro componente de conmutación su tiempo de recuperación llega es de los 25 ns, tiene una caída de voltaje de voltaje baja alrededor de los 0.3 V, la corriente de conducción equivale a 8A. Los componentes propuestos cuentan con las características necesarias para incluirlos en el diseño del prototipo. La frecuencia de conmutación será aplicada por medio de un generador de funciones modelo (Agilen 33120A) con las siguientes características.

1. Frecuencia de conmutación 50Khz
2. Voltaje pico-pico 2.5Vcd
3. Ciclo de trabajo 50%

Resultados (lecturas al 50% del ciclo de trabajo)

	Nemónico	Características iniciales	Resultados
Voltaje de entrada	$V_i$	6V	
Voltaje de salida	$V_o$		11.85V
Voltaje en el capacitor	$V_c$	12V	11.9V
Voltaje en el diodo	$V_{ak}$	6V	6.052V
Corriente de entrada	$I_i$	4A	
Corriente de salida	$I_o$		2.091A

Tabla 4.4 Resultados de lecturas del prototipo a una frecuencia de ciclo de trabajo del 50 %

Las lecturas de la tabla 4.4 fueron tomadas con una carga a la salida de 18 K $\Omega$  a 4 watts.

Es posible concluir que los resultados obtenidos están mostrando una ganancia de voltaje a la salida, el aumento del ciclo de trabajo incrementa el voltaje a la salida (Ver tabla 4.5).

Duty (%)	Voltaje (V)
50%	11.85
60%	12.4
70%	13.56
80%	14.01

Tabla 4.5 lecturas de voltaje a diferentes %



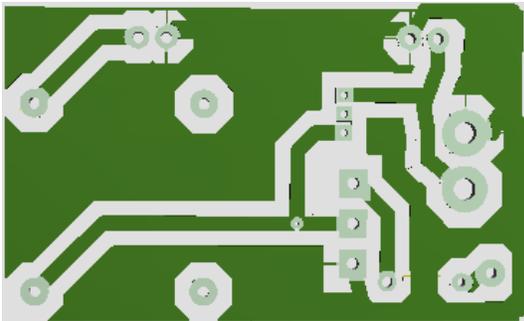
Los 14.01 V y 2 A aplicados en el alambre de nitinol provocaron los cambios de fase en el material, las desventajas de este prototipo son:

- La batería es pesada
- Se tiene que diseñar un circuito adicional que provoque la excitación de los elementos de conmutación.

## Anexo B

Circuitos impresos utilizados durante el desarrollo del prototipo.

Impreso 1.  
Convertidor elevador de voltaje



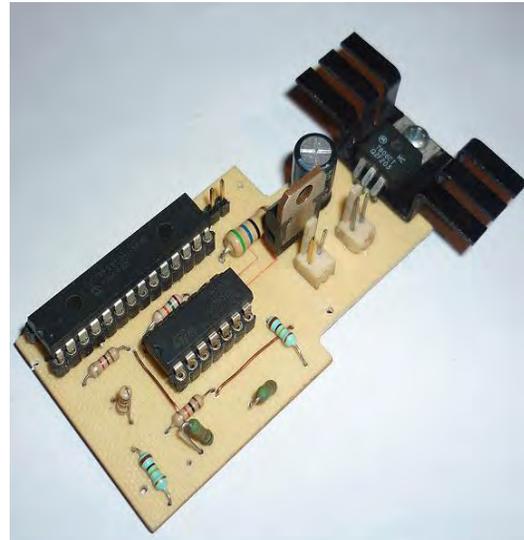
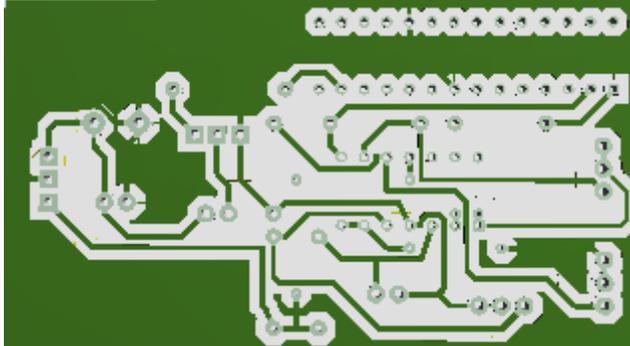
Circuito 1.





mpreso 2.

Tarjeta de control del prototipo de mano mecánica. Circuito 2.



## Anexo C.

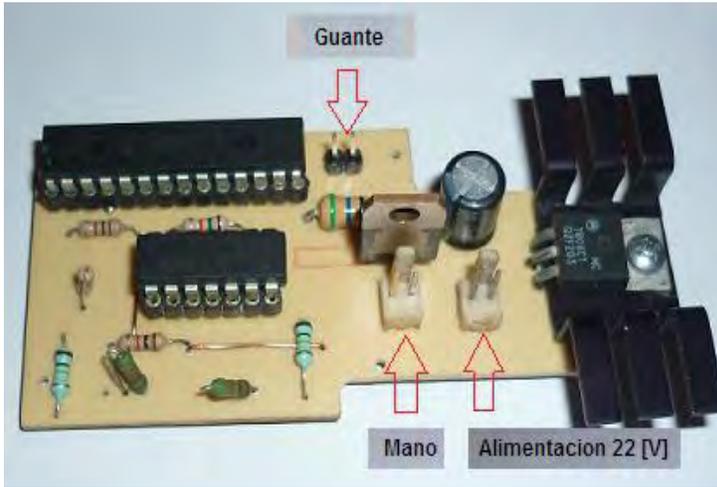
### Funcionamiento:

#### Función general:

El sistema está constituido por un circuito de operación (c1), un prototipo de mano mecánica (c2) y un guante de activación (c3), la interacción entre estos elementos permitirá la operación del prototipo, con el fin de sujetar objetos relacionados a la anatomía de la mano mecánica.



c1



**Características de uso.**

- Las terminales de la mano y del guante se conectan en cada punto determinado del circuito de operación.

**Especificaciones eléctricas**

	Valor	Unidad
Voltaje	23	[V] cd
Corriente	1	[A] cd

c2



- La mano mecánica va montada en el brazo izquierdo del operador, sujeta con los brazaletes de contactel.

Nota:  
Su montaje puede variar según las características físicas del operador.



### C3



- El guante se coloca en la mano izquierda del operador, ajustandolo a la muñeca por medio de un brazalete.
- Este guante contiene el sensor de flexion el cual medira el movimiento de el dedo medio de la mano.

### Mantenimiento.

El prototipo general se compone de los siguientes módulos generales:

- Dispositivo de alimentación, representado por la fuente de voltaje es el principal componente en el sistema, en caso de no obtener ningún resultado al conectarla en su terminas respectiva, verifique con un medidor de voltaje el valor en las terminales de la fuente y si es necesario recargue o remplace.
- Dispositivo de procesamiento central (microcontrolador): contiene el programa de control para su uso independiente, en caso de que la mano no realice ninguna acción. es posible que el dispositivo no tenga cargado el programa de control). Se deberá asegurar que el microcontrolador esté bien conectado y en su defecto programarlo.
- Dispositivo de adecuación de voltajes y comunicación con el microcontrolador. Situándose en el caso anterior es posible que el dispositivo LM324N se encuentre dañado por tanto, es recomendable sustituirlo, por uno igual o su equivalente.



- Dispositivo de posición de la mano mecánica, representado por el guante el cual cuenta con un Flexsensor, en caso de no obtener una señal de aumento y disminución de voltaje oscilando entre los [2.45 - 3.74]V. Conectado en serie y alimentado con 5 V de cd. Proceder a sustituirlo según sus características dimensionales (4.5")
- Si se comienza a tener una apertura y cierre menor en la mano mecánica será el momento de remplazar las baterías o conectar a otra fuente de alimentación.
- Comunicación entre dispositivos, en caso de que los dispositivos anteriormente mencionados se encuentren en perfectas condiciones y aún persiste la falla, revisar los cables de conexión, partiendo desde la alimentación hasta las terminales del elemento actuador.
- En el caso de que el cable de nitinol llegue al fin de su vida útil, por lo cual este se rompa, es necesario cambiar el alambre por uno del mismo calibre. Para tener los mismos resultados en su funcionamiento.