

94
2 es.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN ORGANO TERMINAL
UTILIZANDO ALEACIONES CON MEMORIA DE
FORMA COMO ELEMENTOS DE ACTUACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

AMADEO ANTONIO LARA OROZCO



DIRECTOR DE TESIS ING. SARA MERCEDES CERRUD SANCHEZ

CD. UNIVERSITARIA

JUNIO 1998

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

203441



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Contenido

Prólogo	i
Capítulo 1 Órganos terminales	
1.1 Organos terminales de sujeción	2
1.2 Criterios de diseño	2
1.3 Fuentes de energía de los órganos terminales de sujeción	4
1.4 Clasificación cinemática de los órganos terminales	5
Capítulo 2 Materiales con Memoria de Forma	
2.1 Marco histórico	12
2.2 La transformación martensítica	14
2.3 La transformación martensítica y el efecto memoria de forma.	20
2.4 Aplicación de los materiales con memoria de forma	23
Capítulo 3 Modelos matemáticos	
3.1 Introducción	28
3.2 Modelo cinemático	29
3.3 Análisis dinámico	35
3.3.1 Cinemática del manipulador ER-VII de Eshed Robotech	35
3.3.2 Características de la matriz de transformación total	43
3.3.3 Cinemática del manipulador SCORBOT ER-VII	45
3.3.4 Dinámica del cuerpo transportado	56
3.4 Transferencia de calor	60
3.4.1 Análisis de transferencia de calor (primera aproximación)	60
3.4.2 Análisis de transferencia de calor (segunda aproximación)	86
Capítulo 4 Construcción del Chasis del Gripper	
4.1 Preliminares	92
4.1.1 Caso uno, seis grados de libertad	94
4.1.2 Caso dos, ocho grados de libertad	97
4.2 Diseño	100
4.2.1 Los dedos	100
4.2.2 Selección de materiales	113
4.2.3 Maquinado de las piezas	116

4.3 Impresión de los encoders en los dedos	125
Capítulo 5 Software de control	
5.1 Lenguaje de programación	126
5.2 Estructura	127
5.2.1 Archivo	128
5.2.2 Simulación	128
5.2.3 Control	129
5.2.4 Ayuda	130
5.3 Programación	130
5.3.1 Variables	130
5.3.2 Algoritmos	132
Conclusiones y recomendaciones	138
APÉNDICE A Planos	140
APÉNDICE B Programas de control numérico	146
APÉNDICE C Definición de variables	155

Prólogo

El presente trabajo expone el proceso de diseño de un órgano terminal de sujeción que utiliza aleaciones con memoria de forma como elementos de actuación. Adicionalmente, dicho órgano terminal fue diseñado con una arquitectura tal que le permita sujetar una amplia gama de objetos, diversos tanto en su forma como en tamaño.

- El dispositivo pretende solucionar dos problemas que en apariencia no tienen relación: el exceso de peso aunado a la falta de flexibilidad de los dispositivos de sujeción y la poca aplicación que se ha dado a las aleaciones con memoria de forma que son materiales con la excepcional cualidad de recuperar deformaciones plásticas muy grandes al aumentar su temperatura. El trabajo desarrollado muestra paso a paso un proceso formal de diseño en todas las partes que conforman el proyecto.

En el capítulo uno se proporciona una breve bosquejo de los órganos terminales, en especial de aquellos cuya función es la sujeción, sus tipos, su arquitectura y los parámetros que para su diseño deben ser considerados. Además se tratan aspectos fundamentales relacionados con las aleaciones con memoria de forma y el fenómeno causante de dicho comportamiento: la transformación martensítica. Es éste capítulo el que involucra el mayor trabajo de investigación

bibliográfica, por lo que no es de admirarse la abundante presencia de referencia a las fuentes originales.

El capítulo tres es el más importante pues en el se desarrollan todos los modelos matemáticos que permitirán optimizar el diseño de los componentes, para evitar en la medida de lo posible el rediseño amen de hacer éste más fácil en los casos en los que se presente. Además de optimizar el diseño, los modelos matemáticos permitirán la mejor operación del dispositivo. Son tres los modelados matemáticos expuestos en éste capítulo, un modelo cinemático que se requiere para la operación del dispositivo; un modelo dinámico que permite la correcta elección de los parámetros que intervienen en la arquitectura del mismo, en esta sección se incluye una análisis de las aceleraciones a las que se ve sometido el objeto que se pretenda transportar; así como la variación en las fuerzas de cierre de cada uno de los dedos, originadas por las aceleraciones durante el transporte. Por último tenemos al modelo de transferencia de calor que interactuá grandemente con el análisis dinámico del manipulador, ya que la velocidad del aire relativa a los elementos de actuación tienen gran influencia en los coeficientes de transferencia por convección.

El capítulo cuatro se refiere a la construcción física del prototipo tratando aspectos que pudieran considerarse como parte del diseño mismo, tales como la elección de materiales y la selección de herramientas y equipo; dicha elección involucra a su vez el cálculo de la potencia necesaria en cada una de las operaciones, así como de la capacidad de espacio de la máquina. El complemento de este capítulo son los **apéndices A y B**. El apéndice A incluye todos los planos de fabricación y ensamble necesarios; el apéndice B consta de todos los programas de control numérico utilizados en la manufactura de los componentes.

En el capítulo cinco se detalla la elaboración del software de control, que realiza además tareas tales como solución y simulación de los modelos matemáticos obtenidos en el capítulo tres. Aquí de nuevo se hace referencia a las fuentes originales en cuanto a los algoritmos y métodos utilizados. Mucho de lo que se refiere a este capítulo era nuevo para el autor por lo que fue necesario la improvisación de algoritmos propios que fueran mas entendibles que los ya existentes.

El capítulo cinco describe el proceso de educación del material con memoria de forma, por medio del cual se logrará obtener de este la configuración adecuada que permita alcanzar las posiciones que se establecieron como necesarias durante el proceso de diseño.

Capítulo 1

Órganos Terminales

Sin duda alguna el órgano terminal constituye la parte mas importante de un robot, ya que será éste el que tenga contacto directo con la pieza de trabajo. Operaciones tales como la soldadura, el remachado, pintado, ensamblado, control de calidad, y por supuesto la sujeción son realizadas por los órganos terminales. Es por ello que el diseño de un órgano terminal específico requiere de todo el empeño y cuidado por parte del diseñador quien deberá preocuparse de múltiples aspectos.

Por la función que desempeñan, los órganos terminales se clasifican en dos grupos básicos:

- Herramientas
- Sujetadores

Los órganos terminales tipo herramientas realizan una gama tan amplia de funciones como necesidades puedan surgir. En la mayoría de los casos un mismo robot puede realizar varias funciones sin modificar su estructura mas que en el órgano terminal. Incluso en los modernos complejos manufactureros, donde la presencia de robots es notable, un mismo autómatas puede realizar una mayor cantidad de tareas con el solo hecho de cambiar su órgano terminal. En ocasiones, este cambio se hace de forma manual, por medio de un operario, sin embargo es cada

vez mayor la tendencia a que sea el robot mismo, el encargado de cambiar el órgano terminal tomándolo de un alimentador también automático.

Debido a la diversidad de herramientas que pueden emplearse como órganos terminales solo se tratará lo referente a los órganos terminales de sujeción conocidos más comúnmente con el nombre de grippers¹. Estos tienen como función sujetar las piezas de trabajo, generalmente para su transportación, sin embargo operaciones como ensamble y control de calidad no están excluidas de entre las que pueden realizar los grippers.

1.1 ORGANOS TERMINALES DE SUJECIÓN

Sin importar cuán sofisticado o preciso sea un manipulador, si no cuenta con un elemento de sujeción adecuado al tipo de objeto que se sujetará, no podrá realizar su trabajo eficientemente. Desde el desarrollo primigenio de los robots, se ha buscado encontrar un órgano terminal "universal" que se adapte a la forma del objeto que se sujetará sin importar cuán complicada o caprichosa sea ésta. Por desgracia esto no se ha conseguido y en muchas ocasiones es necesario cambiar el gripper cuando se modifica la forma de los objetos que se sujetan; por ejemplo en los modernos sistemas de manufactura, es común que se utilice un gripper para montar la pieza en bruto en la máquina, y sea necesaria la utilización de uno diferente para retirarla de la máquina una vez concluido su mecanizado.

Con el propósito de disminuir ésta desventaja se ha tratado de diseñar grippers imitando la morfología de la mano humana, adicionando una gran cantidad de sensores de todo tipo. Por otro lado el problema ha sido atacado desde otra perspectiva, diseñando sistemas de intercambio de órganos terminales, tales que el robot pueda llevar a cabo éstos cambios de manera autónoma. Todo lo anterior incrementa considerablemente el costo de los sistemas.

1.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Independientemente de cuál sea la solución que al problema de flexibilidad de los órganos terminales se encuentre, éstos deberán ser capaces de realizar las siguientes acciones :

- 1.- Sujetar la pieza,

¹ En este trabajo se usarán indistintamente los términos gripper y órgano terminal

- 2.- Mantener la orientación del objeto durante su transporte, o en su defecto orientarlo en los puntos extremos de la trayectoria
- 3.- Sensar la posición de la pieza relativa al gripper.

Por si fuera poco, los aspectos que se deben tomar en consideración para el diseño de un órgano terminal son quizá ,mayores en número que los que se consideran para el resto del manipulador. Estos aspectos son :

1.- Características del manipulador en especial la carga máxima que éste puede soportar, tanto estática, como dinámicamente.

2.- Características del objeto tales como :

- Peso,
- Rigidez,
- Temperatura,
- Naturaleza del material (fragilidad, propiedades magnéticas, rugosidad),
- Geometría dimensiones y estructura,
- Posición y orientaciones inicial y final,
- Superficies de contacto,
- Fuerzas actuantes sobre el objeto (inerciales, gravedad, magnéticas, presión)
- Condiciones ambientales (temperatura, humedad, accesibilidad)

3.- Flexibilidad del gripper que permita rápido replazo o facilidad de modificación externa, así como su adaptación a familias de objetos.

Lo anterior es una muestra de lo difícil que resulta diseñar este tipo de dispositivos. Además aspectos operativos tales como la velocidad a la que el objeto será transportado y la aceleración máxima que se presente durante dicho transporte influyen en el robustecimiento de un diseño específico.

Como se puede apreciar, el objeto a sujetar impone la mayor parte de las restricciones, sin embargo es posible clasificar a todos ellos en cuatro grupos principales a saber :

- 1.- *Materiales planos Curvados*, cortados, moldeados, metales (posiblemente magnéticos) plásticos, aleaciones ligeras, vidrio y cerámicos.
- 2.- *Piezas voluminosas de cualquier forma*, Moldeados, estampados y maquinados.
- 3.- *Empaques y contenedores*. Vidrio, plástico aluminio, papel.
- 4.- *Arreglos de componentes*.

1.3 FUENTES DE ENERGÍA DE LOS ÓRGANOS TERMINALES DE SUJECIÓN

Se reconocen tres fuentes de energía para la activación de los grippers. No constituye una restricción el uso exclusivo de uno solo de estos tipos de alimentación de energía; por el contrario, es común el diseño de sistemas que utilicen en combinación dos y tres de estas fuentes de alimentación. Además no es una exigencia que el sistema de activación de un robot sea el mismo que el utilizado por su órgano terminal.

Neumáticos

Los sistemas neumáticos utilizan aire comprimido o con presión de vacío como fuente de energía para su accionamiento. Por lo general, estos sistemas se auxilian de una fuente externa de aire comprimido a una bomba de vacío según sea el caso. Es muy común que robots eléctricamente activados o neumáticamente activados usen gripper neumáticos para la manipulación del objeto. Existen muchos tipos de grippers neumáticos, entre ellos están los que cuentan con copas de vacío, dedos neumáticos, globos internos o externos².

Eléctricos

La energía eléctrica puede ser utilizada por si sola o en combinación con alguna de las otras para el accionamiento de los grippers. Por lo general son motores eléctricos los encargados de aprovechar la energía eléctrica transformándola en movimiento. Los dispositivos magnéticos de sujeción se incluyen también dentro de éste grupo ya que en todos los casos el campo magnético se produce al variar una corriente eléctrica. Además como ya se mencionó, los gripper deben contar con una serie de sensores los cuales requieren a su vez de alimentación eléctrica

² Los globos internos son aquellos que tienen contacto con alguna superficie interna de la pieza a sujetar, mientras que los externos lo tienen en superficies exteriores

independientemente de cual sea su naturaleza. De manera general, los gripper de accionamiento eléctrico son los que proporcionan una mayor precisión y repetibilidad, ya que su control es sencillo.

Hidráulicos

La energía hidráulica no solo se usa para abrir y cerrar los grippers, por el contrario tiene una gran cantidad de aplicaciones sobre todo en lo que a los órganos terminales tipo herramienta se refiere, ya que muchas de estas utilizan aire comprimido como fuente de energía. Debido a los requerimientos especializados de estos sistemas, los grippers neumáticos son usados casi exclusivamente en robots neumáticamente activados.

El dispositivo que se diseñó puede considerarse como eléctricamente activado, ya que es a través de el paso de una corriente eléctrica como se consigue el movimiento de las partes. Sin embargo, como se verá mas adelante cualquier otra fuente de calor como lo son el aire caliente o el vapor pueden ser usados. Por ello es difícil clasificar al dispositivo propuesto desde el punto de vista de la fuente de energía.

1.4 CLASIFICACIÓN CINEMÁTICA DE LOS GRIPPERS

Los sujetadores se pueden clasificar en tres tipos principalmente, de acuerdo al tipo de movimiento relativo que realizan sus partes, y son :

- 1.- Sistemas de acción unilateral,
- 2.- Sistemas de acción bilateral y
- 3.- Sistemas de acción multilateral.

Cada uno de estos tipos pueden ser dotados de sensores que permitan realizar de una manera más adecuada las tareas de sujeción, estos sensores deberán proveer al sistema de control de las siguientes señales :

- 1.- Fuerza aplicada por el gripper sobre el objeto.

- 2.- Posición relativa de los elementos móviles del gripper en relación con el elemento fijo³.
- 3.- Flexibilidad en los objetos transportados,
- 4.- Posición del objeto a sujetar relativa al brazo del manipulador.

Vale la pena abundar más en los tres puntos anteriores porque nos permitirá clasificar al dispositivo que se propone dentro de un grupo de acuerdo a sus características cinemáticas.

Sistemas de Acción unilateral.

Los grippers de acción unilateral presentan movimiento de una de sola de sus partes, con frecuencia llamada dedo. El tipo de articulación que permita el movimiento de este dedo puede ser tanto cilíndrica como rotatoria, dependiendo en gran parte de las características del objeto que se sujetará. Cualquiera de los tipos de energía mencionados en la sección anterior pueden ser utilizados en el accionamiento de sistemas de acción unilateral, siendo el más común el hidráulico, debido a que los sistemas unilaterales son de escasa precisión y repetibilidad inherentes a su arquitectura (no se requieren tolerancias muy cerradas). La figura 1.1 muestra un ejemplo de un gripper de acción unilateral.

³ El elemento fijo se refiere a la parte del órgano terminal que se une al último eslabón de un manipulador. Se considera fijo al sistema de referencia de éste último, pero en realidad presenta movimiento relativo a la base del conjunto.

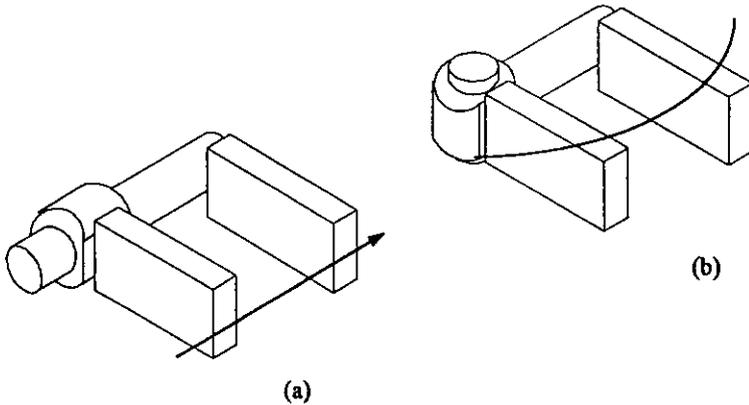


Fig. 1.1 Grapper de acción unilateral

Sistemas de Acción Bilateral .

En los sistemas de acción bilateral, son dos las partes del grapper que presentan movimiento relativo, siempre concurrente a un mismo punto, línea o plano, también llamadas dedos como en el caso anterior, estas partes pueden ser accionadas por medio de los tres distintos tipos de fuentes de energía mencionadas. La arquitectura propia de estos dispositivos permite una mayor flexibilidad y precisión en la sujeción de las piezas con respecto a aquellos de acción unilateral. El movimiento de los dedos puede ser dependiente o autónomo según sean las necesidades de operación. La figura 1.2 muestra un ejemplo esquemáticos de estos sistemas.

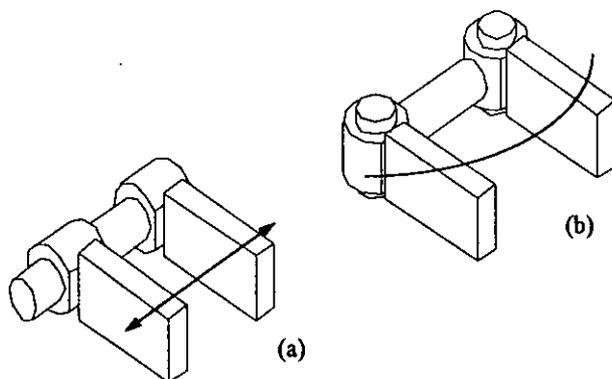


Fig. 1.2 Gripper de acción bilateral

Sistemas de Acción Multilateral

Los sistemas de acción multilateral son aquellos que poseen más de dos grados de libertad⁴ sin restricciones en el límite superior de estos. Entre ellos se encuentran los grippers tipo cadena como el que se muestra en la figura 1.3, de globo, y los grippers antropomorfos como el caso del que se diseñó.

⁴ Los grados de libertad de un manipulador se definen como el número de parámetros necesarios para posicionar y orientar un objeto en el espacio. Los grados de libertad del órgano terminal, no se contabilizan para obtener los del manipulador

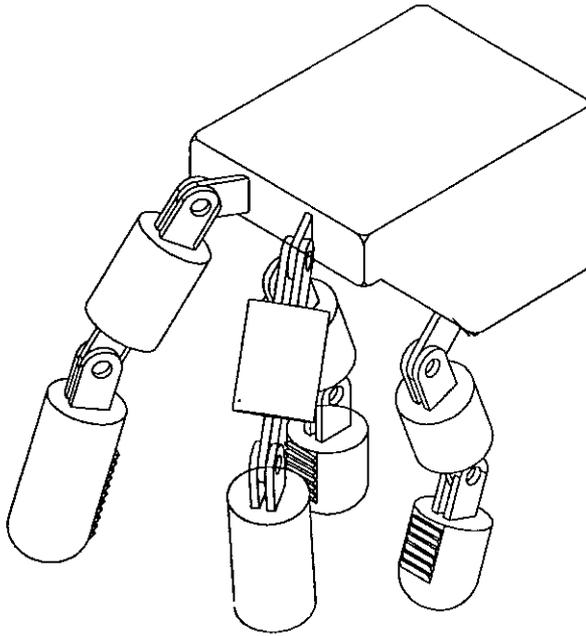


Fig. 1.3 Gripper de acción multilateral

Una vez dada la clasificación general de los órganos terminales es posible ubicar al dispositivo que se diseñó dentro de una categoría en cada uno de los grupos, así podemos afirmar que el órgano terminal propuesto es un *órgano terminal de sujeción eléctricamente activado de acción multilateral*. El único punto donde la clasificación pudiera no ser exacta es que el se refiere a la fuente de energía. La electricidad es solo un medio para conseguir la elevación de temperatura la cual es la verdadera causante del movimiento del gripper. Otros medios tales como el vapor y/o el aire caliente pudieron haber sido usados de igual manera para conseguir el aumento de temperatura.

En la siguiente sección se tratan aspectos fundamentales del efecto memoria de forma, así como el fenómeno que lo provoca: la transformación martensítica.

Capítulo 2

Materiales Con Memoria de Forma

Sin duda alguna la parte medular de este trabajo de tesis se centra en los materiales con memoria de forma que servirán como elemento de actuación del gripper. Las razones por las cuales se ha elegido este tipo de materiales se han expuesto con anterioridad en este trabajo sin embargo vale la pena recapitular en ello .

- 1.- Disminución de peso
- 2.- Disminución de costos
- 3.- Simplificación del diseño
- 4.- Eliminación de elementos de transmisión de fuerza.
- 5.- Reducción de las fuerzas de inercia.
- 6.- Eliminación de ruido (mecánico y eléctrico)
- 7.- Disminución de las vibraciones

FALTA PAGINA

No. 111

Por su importancia se tratarán a continuación temas relacionados con las aleaciones de memoria de forma, los aspectos teóricos, las aplicaciones, y las perspectivas de aplicación de estos materiales.

Los materiales con memoria de forma son aleaciones metálicas que tienen la propiedad de recuperar una determinada forma aún después de haber sido sometidas a grandes deformaciones. Una vez deformados estos materiales permanecerán así hasta su calentamiento; durante el cual espontáneamente recuperarán su forma original. La base de este fenómeno es que en estos materiales ocurre fácilmente la transformación desde γ a martensita. Es por ello que se deberá dar atención especial al fenómeno de transformación martensítica a fin de entender mejor los mecanismos que dan origen al efecto memoria de forma.

2.1 MARCO HISTÓRICO

Los primeros en observar la transformación que da origen al efecto memoria de forma fueron Chang y Read en 1932. Ellos notaron la reversibilidad de la transformación martensita-austenita en una muestra de Au-Cd a través de observaciones metalográficas y cambios en la resistividad eléctrica de las muestras, así en el año de 1951 el efecto memoria de forma fue observado por primera vez en una barra de AuCd. En 1938 la transformación fue observada en latón (CuZn). Sin embargo no fue sino hasta 1962 cuando Buehler y colaboradores descubrieron ese efecto en la aleación equiatómica de Ti-Ni, que es la más famosa de las aleaciones tanto metalúrgicamente como por sus aplicaciones prácticas.

Conforme el efecto memoria de forma fue mejor entendido, un número significativo de nuevas aleaciones ha sido descubierto. En la tabla 2.1 se muestran algunas de las aleaciones que exhiben este comportamiento, así como sus propiedades de interés: De todas ellas es la aleación de Ti-Ni la que se usa más extensamente, junto con algunas aleaciones con base de cobre.

La temperatura a la cual la aleación recuerda su forma de fase austenítica al ser calentada puede ser ajustada por pequeños cambios en la composición de las muestras o a través de un tratamiento térmico adecuado. Por ejemplo en el caso del Ti-Ni se puede ajustar la temperatura de transformación desde los 100° hasta los -100° . Adicionalmente el intervalo de temperatura entre el principio y el fin de la transformación es muy pequeño y se puede ajustar también para que éste sea aún menor (1 o dos grados de ser necesario)

Aleación	Composición	Temperatura de transformación °C	Histéresis de la transformación °C
Ag-Cd	44/49 at. % Cd	-190 a -50	15
Au-Cd	46.5/50 at. % Cd	30 a 100	15
Cu-Al-Ni	14/14.5 wt. % Al	-140 a 100	35
	¾.5 wt. % Ni		
Cu-Zn	38.5/41.5 wt % Zi	-180 a -10	
Cu-Sn	15 at. Sn	-120 a 30	
Cu-Zn-X	al few wt. de X	180 a 200	10
In-Ti	18/23 at. % Ti	60 a 100	4
Ni-Al	36/38 at. %Al	-180 a -100	10
Fe-Pt	Aprox 25 at. % Pt	-130	4
Mn-Cu	5/32 at. % Cu	-250 a 180	25
Fe-Mn-Si	32 wt % Mn	-200 a 150	100

Tabla 2.1 Algunas propiedades de aleaciones específicas

A pesar de sus ventajas, las aleaciones con memoria de forma no son para todas las aplicaciones, se deben de tomar en consideración las fuerzas, desplazamientos, condiciones de temperatura, y número de ciclos requeridos para un actuador en particular. Las ventajas del Nitinol empiezas a ser más convenientes en tanto que el tamaño de los equipos disminuye; En mecanismos grandes se pueden utilizar solenoides, motores y electroimanes de manera mas conveniente. Pero en aplicaciones donde éste tipo de actuadores no pueden ser usados las aleaciones con memoria de forma proveen una excelente alternativa. Son pocos los mecanismo que tienen la misma relación productividad-peso que tiene Nitinol.

Por su importancia en el efecto memoria de forma, se dará un breve bosquejo de lo que es la transformación martensítica y como está transformación da origen no solo al ya mencionado efecto memoria sino que hace posible fenómenos como la superelasticidad y la elevada capacidad de amortiguamiento que exhiben este tipo de aleaciones.

2.2 LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA

Detrás del efecto memoria de forma encontramos una transformación de fase sólida conocida como transformación martensítica. Aunque la transformación martensítica ha sido ampliamente estudiada en los aceros, estos no son los únicos materiales en los que la transformación martensítica tiene lugar, otros tales como aleaciones no ferrosas, metales puros, cerámicos, minerales, compuestos orgánicos, gases solidificados y polímeros. Incluso en el reino de lo vivo podemos encontrar transformación martensítica, el virus T4 exhibe transformación martensítica al entrar en contacto con los linfocitos del organismo invadido.

A pesar de que no existe todavía una definición formal de martensita, los términos martensita y austenita fueron originalmente asignados a fases en el acero y a pesar de algunos argumentos en contra, este nombre ha sido dado de manera más generalizada al tipo de productos de la transformación y no a una composición específica específica como pudiera ser en el caso del acero. A continuación se dará una clasificación de la transformación martensítica desde distintos puntos de vista.

La transformación martensítica es una transformación sólida **adifusiva**¹ de primer orden. Es adifusiva debido a que la nueva fase se obtiene a partir de la primera por pequeños movimientos de los átomos, siempre menores al parámetro de red o láctice. Durante la transformación adifusiva, los átomos se mueven de manera coordinada hacia sus nuevas posiciones en una estructura cristalina de mayor estabilidad, y debido a que no existe difusión de átomos la composición tanto del producto como de la fase madre no cambia. Es también debido a la falta de migración, que el progreso de este tipo de transformación es independiente del tiempo, estando limitada la velocidad de movimiento de la interface entre la fase martensítica y la fase madre, solo por la velocidad del sonido en el sólido.

Es de primer orden, por el hecho de existir una liberación de calor durante el desarrollo de la transformación martensítica, además de presentarse una histéresis y de ser posible encontrar a la martensita y la austenita en equilibrio en un intervalo de temperaturas².

¹ Las transformaciones adifusivas reciben también el nombre de transformaciones displacivas.

² Mas estrictamente, se clasifican a las transformaciones en primero y segundo orden de acuerdo al comportamiento de la primera y segundas derivadas de la función de energía libre de Gibbs. Se puede consultar KHACHATURYAN A.G. "Theory of Structural Transformation in Solids"

La transformación martensítica requiere que la interfase entre la nueva fase y la fase madre sean coherente, pues de lo contrario, no sería posible el movimiento coordinado de los átomos. Además, debido a que todos los átomos se mueven cooperativamente, la forma de la región que ocuparía un mismo número de átomos en ambas fases es distinta, lo que origina tensiones que se oponen a que la transformación prosiga en las mismas condiciones en la que se inició por ende, será necesario aumentar la temperatura o bien la fuerza que genere al esfuerzo cortante.

Debido a su carácter displasivo, la transformación martensítica se clasifica como una transformación a térmica, es decir; no requiere ser activada térmicamente, en vez de ello, la transformación martensítica se induce por un esfuerzo cortante en la red cristalina.

Desde el punto de vista cristalográfico, la transformación martensítica puede ser entendida como dos procesos separados, el primero consistente en una deformación de la red por migración coordinada de los átomos en una distancia que es menor del parámetro de red. Este primer proceso es conocido con el nombre de deformación de Bain y aunque cristalográficamente es difícil la comprensión del fenómeno en tres dimensiones su simplificación en dos dimensiones ejemplifica al proceso de manera excelente.

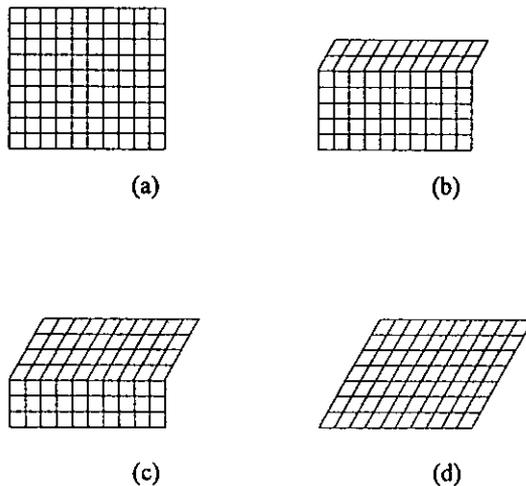


Figura 2.1 Esquema de la transformación martensítica en 2 dimensiones

La **deformación de Bain** ó deformación de estructura consiste de todos los movimientos necesarios para obtener la nueva estructura a partir de la estructura de la fase madre. La figura 2.1 muestra el proceso de cambio de austenita a martensita. Nótese que para que el movimiento de la interfase entre la austenita y la martensita sea posible, cada átomo debe moverse solo una pequeña distancia. El resultado de todos estos pequeños movimientos coordinados es la nueva fase llamada martensita.

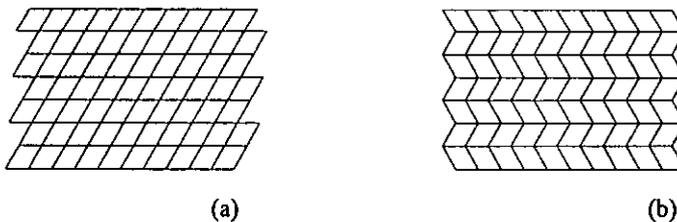


Figura 2.2 Dos variantes del acomodamiento de las celdas de martensita

a) tipo deslizamiento b) tipo macla

La segunda parte de la transformación martensítica, es solo un paso de acomodamiento, que se puede entender mejor si se sabe que la estructura martensítica producida por las deformaciones de Bain tienen una forma y con frecuencia un volumen distinto de la austenita de los alrededores, por ejemplo, la transformación martensítica en el acero involucra ambos cambios, tanto de forma como de volumen, mientras que en las aleaciones de forma como la de Ti-Ni, el cambio en volumen no está presente. Como consecuencia del cambio de forma, la fase madre debe ser reacomodada para absorber los cambios en el espacio disponible. No se sabe si en realidad los

átomos realizan por separados los movimientos debidos a la deformación de Bain y al acomodo de la manera separada, o por el contrario su cambio a las nuevas posiciones se lleva a cabo en un solo paso, pero todo parece indicar que la primera opción es la más probable.

Existen dos mecanismos por medio de los cuales se puede dar este acomodo, estos son llamados deslizamiento y macla. En ambos casos, cada celda tiene la estructura de la nueva fase (martensita) pero la forma global es la de la austenita original. El deslizamiento es un proceso de acomodamiento permanente y resulta común en muchos tipos de martensita. Por lo que respecta a la macla, este acomodo es incapaz de absorber cambios de volumen, pero puede absorber cambios de volumen de manera reversible lo cual es muy importante para los fines que nos interesan.

Para que el efecto memoria de forma se presente de manera extensa en un material, es necesario que la transformación sea fuertemente reversible, por ello el deslizamiento deberá ser el proceso de acomodo predominante. En un modelo simplista en dos dimensiones solo serán necesarias dos direcciones o variantes para restaurar la forma completa de la matriz. En tres direcciones, la situación puede complicarse, por ejemplo la aleación Cu-Zn-Al requiere de 4 y las aleaciones de Ti-Ni requieren de tres.

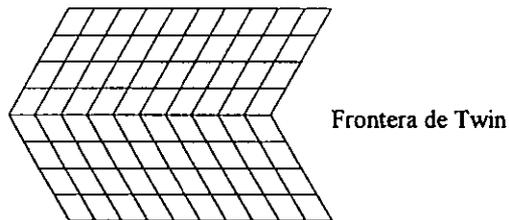


Figura 2.3 Aspecto del patrón twinig de acomodamiento

Debido a que el maclado como proceso de acomodamiento juega un papel preponderante en el efecto memoria de forma es necesario tratarlo con más detalle. Como es posible apreciar en la figura 2.3 la interface del maclado es un espejo entre las dos variantes de martensita, es decir, que cada celda en una variante tiene un equivalente en la variante que se encuentra tras la interface. Otro aspecto interesante de las interfaces tipo macla es que son de muy baja energía y por ende pueden ser movidas con mucha facilidad, esto implica que la estabilidad de la martensita no se ve seriamente afectada por el crecimiento en el número de estas interfases.

Si comparamos los límites de las estructuras mostradas en la figura 2.3, el ordenamiento tipo deslizamiento requiere que los enlaces entre filas de celdas sean rotos, por el contrario el ordenamiento tipo macla mantiene estos enlaces intactos. Además el ordenamiento tipo macla permite un deslizamiento de la interface entre dos variantes de martensita al ser aplicado un esfuerzo, de tal manera que favorece la formación exclusiva de aquella variante que mejor acomode el estado de esfuerzos presente tal y como se muestra en la figura 2.4. El acomodo tipo macla no solo ocurre dentro de las laminillas de martensita, también se presenta en una escala mayor entre las laminillas mismas.

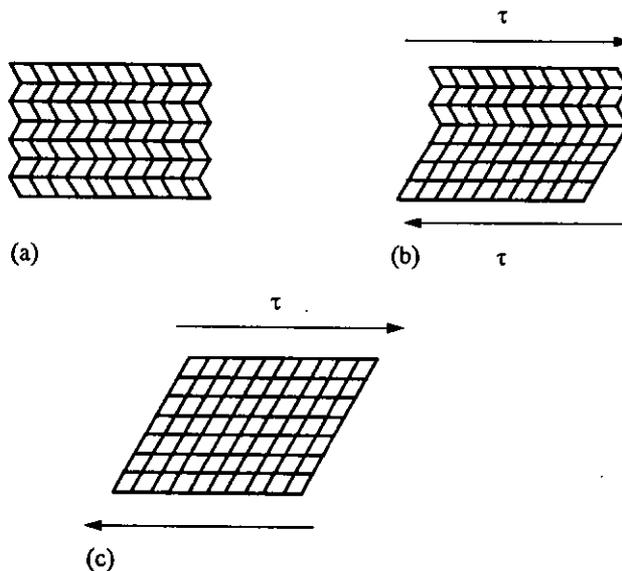


Figura 2.4 Esquema de la transformación martensítica inducida por esfuerzo en dos dimensiones

La martensita como ya se mencionó aparece en laminillas delgadas que se apoyan en un plano cristalográfico complejo llamado plano de hábito. Normalmente, las laminillas de martensita son de suficiente tamaño para permitir su observación a través del microscopio fotónico, como es el caso del acero, sin embargo, en aleaciones como las del titanio, la observación de estas plaquitas es muy difícil, incluso, la preparación de las probetas debe ser muy cuidadosa para no alterar la

cantidad de martensita presente originalmente al inducir una transformación por esfuerzo cortante en el momento de lijar.

El progreso de la transformación martensítica se puede sentir midiendo el cambio en las propiedades de la muestra, debido a que la martensita y la austenita exhiben comportamientos mecánicos, eléctricos, térmicos y magnéticos totalmente distintos. Otro aspecto interesante es la histéresis en las temperaturas de inicio y fin de la transformación; de austenita a martensita y el proceso inverso. Lo anterior se puede apreciar mejor por medio de la figura 2.5. Como podemos apreciar, existen cuatro temperaturas de importancia durante la transformación y son:

- 1.- M_s Temperatura de inicio de transformación a martensita
- 2.- M_f Temperatura de final de transformación a martensita
- 3.- A_s Temperatura de inicio de transformación a austenita
- 4.- A_f Temperatura de final de transformación a austenita.

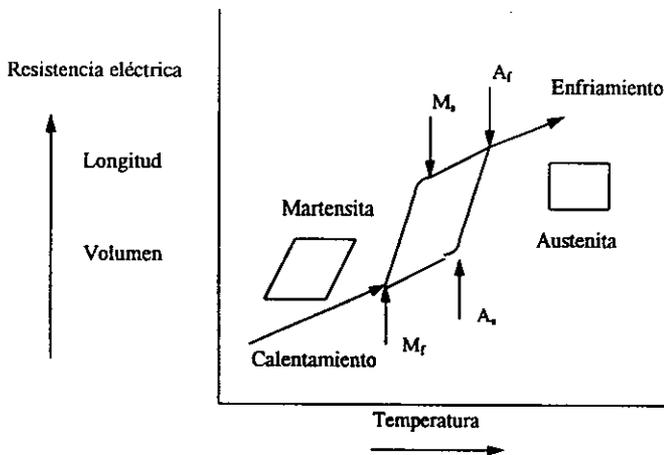


Figura 2.5 Esquema de transformación martensítica y temperaturas significativas.

Como puede observarse, la temperatura M_s y A_f no coinciden sino que están defasada en un cierto valor. A este defasamiento se le conoce con el nombre de histéresis. La magnitud del ciclo de histéresis depende en gran medida de la composición de la aleación. Para los materiales

con memoria de forma, la magnitud de histéresis tiene un valor típico de 40°C pero no es raro encontrar valores mayores como en el caso de la aleación de Cu-Al-Be en el que la histéresis llega a ser de 80°C. Microscópicamente, la histéresis puede explicarse por la fricción existente en las interfaces de dos variedades de martensita en un arreglo tipo macla. Debido a que este tipo de arreglos o acomodos no se encuentran presentes en la Austenita, la temperatura A_f resulta ser mayor que la M_s .

Otro aspecto interesante son los esfuerzos producidos en una y otra fase del material. Como ya se ha dicho, los esfuerzos generados en el material son absorbidos por el movimiento de la interfase entre dos variedades contiguas de martensita más eficientemente de lo que lo que la austenita sería capaz de hacerlo. Sin embargo, el movimiento de esta interfase solo puede absorber una cantidad limitada de deformación por lo que se producirá deformación plástica de la martensita una vez excedido este valor.

2.3 LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA Y EL EFECTO MEMORIA DE FORMA

Aunque no se haya dejado especificado en el desarrollo anterior, resulta claro que la martensita es una fase de menor energía que la austenita. La consecuencia directa de esto, es que existen muchas maneras en las que la austenita puede transformar a martensita pero solo una en la que se puede presentar el proceso inverso. En el caso bidimensional, el esfuerzo cortante puede ser aplicado en dos direcciones diferentes para producir dos orientaciones distintas de las celdas unitarias. Pero debido a que la austenita tiene solo una orientación, ambas variantes de martensita tendrán que regresar a la misma estructura austenita de la que provenían.

Este principio geométrico simple es la base del efecto memoria de forma. Tras el enfriamiento de la austenita, se forman variedades autoacomodantes de martensita. Las fronteras tipo macla migran durante la deformación resultando en una formación inclinada de estas variedades de martensita. Como ya se mencionó no importa cual sea la distribución de estas variantes de martensita, al calentarse la muestra por encima de A_s solo hay un camino por el cual pueden regresar a la fase austenítica.

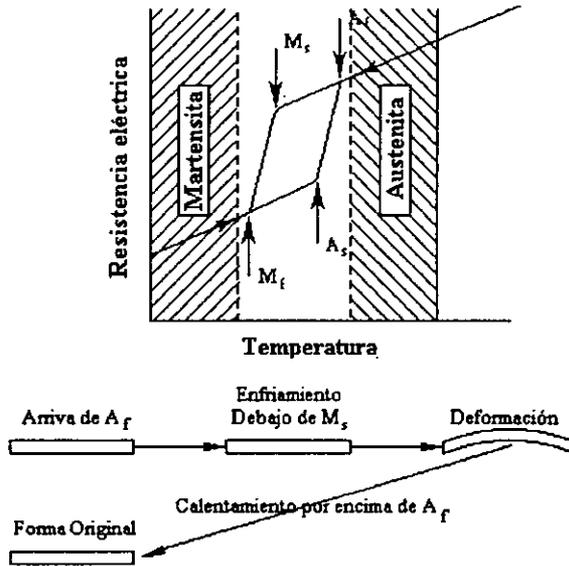


Figura 2.6 La transformación martensítica y se aleación con el efecto memoria de forma

La figura 2.6 muestra esquemáticamente el efecto memoria de forma. Como es posible observar, el espécimen no exhibe un cambio de forma si es enfriado a una temperatura que se encuentre entre A_f y M_f . Si la muestra es deformada plásticamente por debajo de M_f esta deformación se mantiene mientras no se caliente la muestra. Al calentar, la recuperación de la deformación empieza justo cuando se ha alcanzado A_s y se completa cuando se llega al valor de A_f . Una vez que la deformación se ha recuperado por completo, no es posible recuperar la forma que se dio a la muestra al deformar por mas que se decremente la temperatura. Para que eso fuese posible sería necesario que aplicar un fuerza para deformar al objeto. Por este el efecto memoria de forma ocurre solo en una dirección y por ello es frecuentemente llamado efecto memoria de forma simple. Las aleaciones con memoria de forma son capaces de recuperar una deformación plástica del orden del 7% sin embargo no son raras aquellas en las que una deformación del 10% es recuperada.

Adicionalmente, para que el efecto memoria de formase presente, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1.- La transformación martensita-austenita debe involucrar un muy pequeño cambio en el volumen,
- 2.- La martensita debe ser acomodada en estructuras tipo macla.

Como ya se ha mencionado. la recuperación de la deformación en una muestra se da de manera espontanea solo en un dirección. Sin embargo, es posible producir el efecto bidereccional de cambio de forma conocido con el nombre de doble efecto memoria de forma. Tomemos como ejemplo el resorte hecho con alguna aleación con memoria de la figura 2.6. En el efecto memoria de forma simple la forma original del resorte (contraído) es recuperada completamente tras un calentamiento de la muestra por encima de A_f . Sin embargo la forma inducida tras la aplicación de la fuerza en la etapa martensitica no se recupera aún después de enfriar por debajo de M_f . En el efecto memoria de forma doble, la muestra se contrae y elonga según su temperatura alcance M_f o A_f respectivamente.

Para que el efecto memoria de forma se presente es necesario un tratamiento termomecánico de la muestra. A pesar de que existen muchos de estos procesos llamados procesos de "educación", todos ellos inducen en el material una serie de microesfuerzos que tienen como objetivo favorecer la nucleación y crecimiento de solo una o dos variantes de todas las 24 posibles. La nucleación y crecimiento preferente de estas variantes se logra gracias a la formación de dislocaciones que evitan el desplazamiento de los planos de hábito de ciertas variantes de martensita y favorece el movimiento de otros.

El efecto superelástico a diferencia de los efectos memoria de forma y doble memoria de forma, es un fenómeno independiente de la temperatura. Cuando una muestra se encuentra por debajo de la temperatura M_d ³ y es sometida a tensión, se inicia la formación de martensita por el esfuerzo inducido en el material. este tipo de martensita conocida con el nombre de martensita

³ La temperatura M_d es la temperatura por encima de la cual no se produce la transformación martensitica porque no disminuiría la energía libre del sistema.

tipo SIM⁴. La martensita que se induce de esta manera permanece estable hasta que se retira la carga que la indujo. A diferencia de aquella formada térmicamente, la martensita inducida por esfuerzo, crece como una sola variante, cuyo plano de hábito está orientado de manera preferente en dirección de la carga aplicada. La formación de solo una de todas las posibles variantes y sobre todo la ya mencionada orientación del plano de hábito, provoca que el material experimente grandes elongaciones en dirección del eje de tensión. Al retirar la carga, la martensita inducida anteriormente se vuelve inestable y transforma espontáneamente a austenita sin ser necesario un aumento en la temperatura.

2.4 APLICACIONES DE LOS MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

Las numerosas ventajas de los materiales con memoria de forma hacen que tenga una gran cantidad de aplicaciones en una amplia variedad de industrias, tales como la médica, la industria de los robots, la industria automotriz, aeroespacial, y de electrónica.

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones que de los materiales con memoria de forma se pueden encontrar .

Electrónica

- Micro circuitos interruptores
- Relevadores para equipos de cómputo
- Controles de temperatura
- Circuitos eléctricos
- Pasadores mecánicos
- Accionamiento de puertas subminiatura
- Micromanipuladores
- Micro clutches

⁴ El nombre de SIM proviene de sus siglas en inglés (Stress Induced Martensite) y se respeta en este trabajo.

- Liberadores de carga para resortes
- Cortadores de seguridad
- Sensores de temperatura de las tarjetas en PC's
- Actuadores limpios
- Posicionadores de cabezas de lectura y escritura

Medicina

- Medicina intravenosa
- Controladores
- Cateters autoguiados o autoconducidos
- Miembros prostáticos
- Instrumental quirúrgico
- Asistencia exoesquelética

Automotriz

- Seguro para puertas
- Control de emisiones
- Control de los espejos
- Cajas automáticas
- Disparadores (en las bolsas de aire)
- Válvulas neumáticas
- Liberadores Remotos
- Dispositivos de alarma

Aparatos

- Controles remoto ultraligeros
- Cortadores de seguridad (interruptores)
- Reguladores mecánicos de corriente
- Seguros eléctricos
- Sensores en las secadoras de pelo

- Protectores de motores
- Controles contra sobrecalentamiento
- Posicionadores

Miscelaneas

- Scanners Mecánicos
- Manipuladores de cámaras
- Elementos de robots
- Materiales inteligentes
- Disparadores de cámaras fotográficas
- Circuitos mecánicos integrados

Las aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma apenas empiezan a explorarse, y no debe dudarse que en la próxima década éstas se multipliquen, abarcando áreas que ahora son inimaginables.

FALTAN PAGINAS

De la: **26**

A la: **27**

Capítulo 3

Modelos Matemáticos

3.1 INTRODUCCION

Los modelos matemáticos se hacen necesarios en el diseño toda vez que se quiera tener control de las variables de los fenómenos involucrados en aquello que se diseña. Por consecuencia, una de las ventajas que se tiene de utilizar modelos matemáticos en el diseño es la optimización a través de técnicas matemáticas que involucran la obtención de valores de interés tales como los máximos y los mínimos. Sobre todo, es la capacidad de predicción del comportamiento de lo diseñado, lo que justifica el tiempo que se utiliza en el análisis matemático.

Sin embargo hay que tener en mente que no siempre es posible alcanzar en la realidad los valores óptimos obtenidos en los modelos matemáticos, ya que siempre se involucrarán factores tales como externos generalmente de carácter tecnológico como la imposibilidad de generar una geometría o de alcanzar determinadas tolerancias, etc. Aún con esta desventaja e incluso cuando resultados de los modelos matemáticos no concuerden con exactitud con lo observado, su sola aproximación representa una ventaja indiscutible.

FALTA PAGINA

No. 29

Son tres los fenómenos que se ven involucrados en el diseño y operación: el cinemático el dinámico y la transferencia de calor. Los dos primeros tienen una fuerte influencia en el diseño del chasis del gripper, mientras que la tercera lo tiene en la operación. A continuación se describen con mayor detalle cada uno de estos modelos, y se menciona con oportunidad la precisión obtenida en cada uno de ellos.

3.2 MODELO CINEMÁTICO

En el modelo cinemático se relacionan variables geométricas de las partes del gripper, tales como la longitud de los dedos y el ángulo que guardan los mismo, mediante técnicas ampliamente conocidas. Los resultados obtenidos se utilizarán para la obtención de las medidas adecuadas de las partes del dispositivo, además de emplearse en el software de control para posicionar los elementos.

Un manipulador serial (como es el caso del que se estudia) consiste en una serie de eslabones conectados entre sí por medio de articulaciones móviles. Para el caso de un manipulador de n grados de libertad, se tienen $n+1$ eslabones y n articulaciones. El eslabón que sirve como base al manipulador es comúnmente llamado eslabón cero y por ello no se toma en cuenta para la determinación de los grados de libertad. El eslabón 1 es conectado a la base o eslabón cero a través de la articulación uno, así se continúa hasta el último de los eslabones. Por lógica, no existe articulación en el extremo libre del último de los eslabones.

Los parámetros de eslabonamiento son cuatro y establecen la relación que existe entre los eslabones y las articulaciones de que consta un manipulador. Por ende, cada eslabón puede ser caracterizado por dos variables (también llamadas dimensiones) que definen la condición de un eslabón en particular.

a_{i-1} Se define como la distancia más corta entre el eje $i-1$ y el eje i . En otras palabras, es la perpendicular a cada uno de los ejes. Como vector, su sentido es del eje $i-1$ al eje i .

α_{i-1} Es la magnitud angular alrededor de a_{i-1} de llevar el positivo del eje $i-1$ hasta el positivo de la proyección del eje i , en el punto donde a_{i-1} corta al eje $i-1$.

Los otros dos parámetros establecen las condiciones de eslabonamiento entre dos eslabones sucesivos, en otras palabras, caracterizan la articulación común a dos eslabones.

d_i : Es la distancia que hay sobre el eje i desde donde a_{i-1} corta al eje i hasta donde a_i corta al eje i .

θ_i : Es el ángulo empleado de llevar la prolongación de a_{i-1} hasta la proyección de a_i en el punto donde a_{i-1} corta al eje i , alrededor del eje i .

Existen dos reglas especiales que son útiles cuando se trata de obtener los parámetros de eslabonamiento de un manipulador:

1.- Para el primer y último eslabón, se colocarán ejes imaginarios donde más convenga al diseñador.

2.- Normalmente se colocará un eje imaginario 0 paralelo al eje 1 y lo mismo sucede con un eje imaginario $n+1$ con el eje n .

3.- Normalmente se colocará un sistema de referencia en el punto donde el órgano terminal toma la pieza de trabajo.

Esta tercera regla no se aplica para el caso que se trata en particular, debido a que se trata de un órgano terminal.

La función principal de los parámetros de eslabonamiento, es la de permitirnos asignar las bases de los sistemas de referencia que servirán en la obtención de las ecuaciones matriciales que definen la condición de un órgano terminal en el espacio.

Estas ecuaciones matriciales expresan las coordenadas cartesianas del órgano terminal así como su orientación en el espacio en términos de las variables de articulación. Estas ecuaciones pueden ser obtenidas para cualquier manipulador o en general para cualquier mecanismo de eslabones seriales, sin importar el número de eslabones de éste ni su grado de libertad.

Una vez obtenidos los parámetros de eslabonamiento, las bases de los sistemas de referencia se fijan como sigue:

- 1.- El origen del sistema de referencia $i-1$ se coloca en el punto donde el vector a_{i-1} corta al eje $i-1$.
- 2.- El vector z de la base referencial se colocará sobre el eje $i-1$ apuntando en el sentido positivo de ese eje $i-1$.
- 3.- El eje x_{i-1} se coloca sobre a_{i-1} con sentido de este último.
- 4.- El eje y_{i-1} se obtiene del producto vectorial de x_{i-1} y z_{i-1} , con el fin de tener un sistema de referencia derecho.

La situación de los parámetros de eslabonamiento para una configuración general de eslabones se ilustra en la siguiente figura 1:

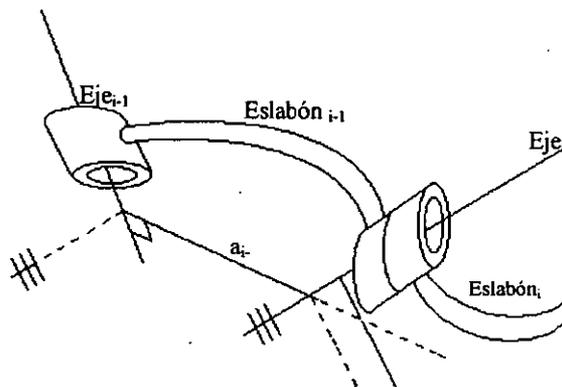


Figura 3.1 Condición general de dos eslabones sucesivos.

Para este caso en particular los parámetros de eslabonamiento son similares para cada uno de los “dedos” del órgano terminal. Vale la pena mencionar que a pesar de que el dispositivo que se está diseñando es en si un órgano terminal, lo anteriormente expuesto con respecto a los parámetros de eslabonamiento es aplicable también en este caso.

El eslabón fijo está representado por el elemento de soporte 1, pero el lugar donde sobre éste se tome el sistema de referencia fijo dependerá de cada dedo. Así el sistema de referencia fijo de cada dedo se haya localizado en la articulación que forman el elemento 1 con el dedo correspondiente.

Sin embargo vale la pena mencionar que existe un sistema único de referencia fijo, que no se considera para la obtención de los parámetros de eslabonamiento, pero que será el punto representativo del todo el órgano terminal. Para aclarar más lo anterior se debe mencionar que el manipulador requiere de un punto perteneciente al órgano terminal, para tomar este como base del sistema de referencia último; dicho punto será llevado a la posición deseada en el espacio.

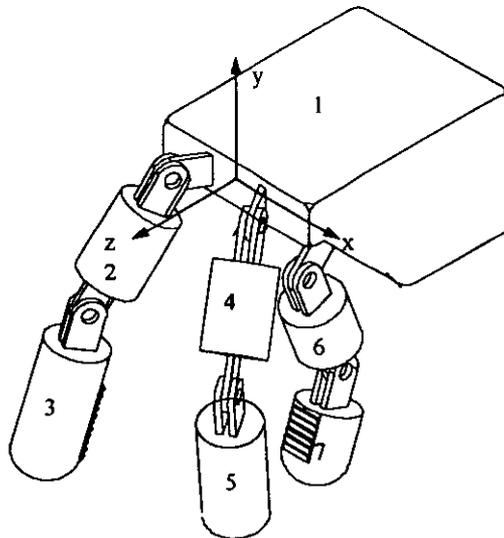


Figura 3.2 Esquema del órgano terminal y localización del sistema

de referencia principal.

Así se establece un sistema de referencia derecho colocado ahí de manera arbitraria para evitar complicaciones en la matriz de transformación de un sistema a otro.

A partir de aquí se utilizarán las definiciones de cada uno de los parámetros de eslabonamiento para obtener los de este caso en particular, solo se obtendrán para uno de los dedos, ya que el procedimiento para los restantes es el mismo. De acuerdo con la figura 3.3:

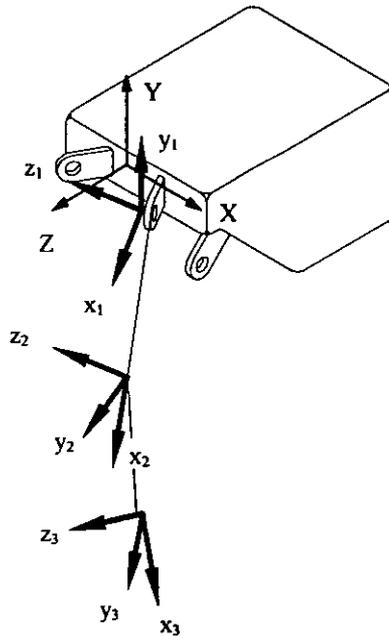


Figura 3.3 Localización de las bases referenciales en los dedos.

De acuerdo a las definiciones antes mencionadas, el valor de los parámetros de eslabonamiento son:

l	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	l_1	0	0	θ_2
3	l_2	0	0	0

Como se mencionó anteriormente, uno de las funciones de los parámetros de eslabonamiento es la de determinar la posición y orientación de los sistemas de referencia en los eslabones. Por lo que, se para describir un punto localizado en el extremo de un dedo, se deben utilizar 3 matrices, una que representa una rotación pura alrededor del eje z, otra, que incluye además de la rotación, una traslación, y una tercera que produce una traslación pura en dirección del eje z.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, existe un sistema de referencia representativo del todo el órgano terminal, además, la tercer matriz se puede incluir sin ningún problema dentro de la segunda, por lo que para simplificar las operaciones y reducir tiempo de procesador, se utilizarán solo tres matrices de transformación.

3.3 ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico que se trata en este capítulo está orientado a predecir las fuerzas que deberán soportar los dedos del manipulador durante su operación, dichas fuerzas dependerán de varios aspectos entre ellos la masa del objeto, la geometría, los puntos de contacto, la trayectoria de desplazamiento, y la rapidez con la que se realicen los movimientos. Por ende en este capítulo, se calcularán las aceleraciones que se producen durante el transporte de los objetos, así aplicando la ecuación de Newton de manera conjunta con la ecuación de Euler es posible determinar las magnitudes de las fuerzas.

En el capítulo anterior se trató el procedimiento general para obtener la descripción del órgano terminal de una manipulador en su posición, en este capítulo se determinarán la velocidad y aceleración del mismo utilizando el método de matrices de transformación.

3.3.1 CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR ER-VII DE ESHED ROBOTEC

La velocidad y aceleración del órgano terminal está relacionada directamente con la arquitectura del manipulador al que se desea acoplar. Para este caso en particular se eligió el robot ER-VII con el que se cuenta en el laboratorio de sistemas de manufactura flexible.

Las características de este manipulador, son las siguientes :

Artículo	Especificación
Estructura (brazo)	Robot articulado verticalmente cinco grados de libertad Transmisión armónica en cada eje
	Rango de operación
Eje 1 (Base)	250° estándar, 310° solo a través de programa
Eje 2 (Hombro)	$\pm 130^\circ - 35^\circ$
Eje 3 (Codo)	$\pm 130^\circ$
Eje 4 (Muñeca)	$\pm 130^\circ$
Eje 5 (Muñeca)	\pm Ilimitado (mecánicamente) ± 180 eléctricamente
Radio de operación	851 mm con gripper 691 mm sin gripper
Home general	Posición de referencia fijas en todos los ejes
Retroalimentación	Encoders ópticos en todos los ejes.
Actuadores	Servomotores eléctricos de DC
Transmisión	Motores armónicos
Carga máxima de trabajo q	2000 g (con gripper incluido)
Repetitibilidad	0.2 mm
Velocidad máxima	1000 mm/s
Peso	Aproximadamente 35 kilogramos

Tabla 3.1 muestra la dimensiones importantes del manipulador al que se piensa acoplar el gripper diseñado.

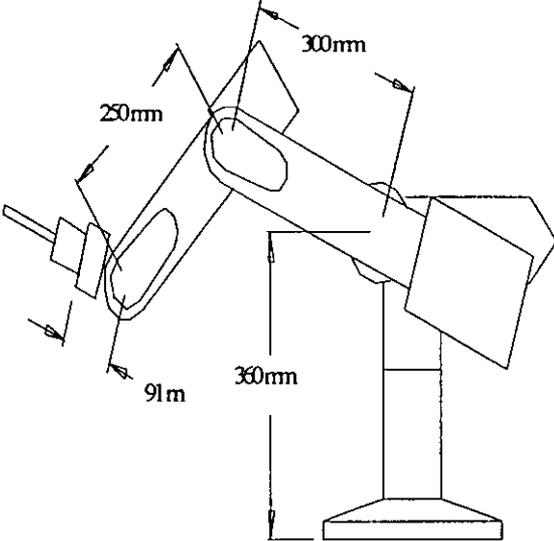


Figura 3.4 Dimensiones principales del robot ER-VII

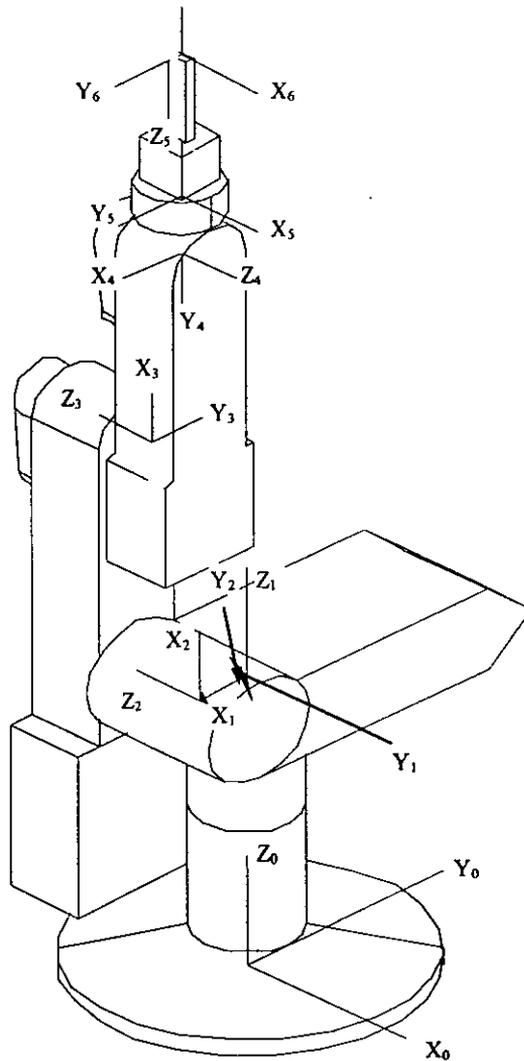


Figura 3.5 Disposición de los bases referenciales
Para el robot ER-VII .

Con base en la figura 3.5 se obtienen los parámetros de eslabonamiento del manipulador, los cuales se muestran en la tabla 3.2

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	d_1	θ_1
2	l_1	90	0	θ_2
3	l_2	0	0	θ_3
4	l_3	180	d_3	θ_4
5	0	90	d_5	θ_5

Tabla 3.2 Parámetros de eslabonamiento para el manipulador
ER-VII de Eshed Robotec

Como se explicó con anterioridad, los parámetros de eslabonamiento describen la situación que guardan dos eslabones sucesivos y constituyen el punto de partida para la determinación de las matrices de transformación entre los correspondientes sistemas de referencia. Dichas matrices de transformación se muestran a continuación.

$$1.- {}^4T_5^1 = [R(\bar{Z}, \theta_5^*), P_{orig}(5,4, \bar{Z})]$$

$$2.- {}^4T_5^2 = [R(\bar{X}, 90^\circ), P_{orig}(5,4, \bar{X})]$$

$$3.- {}^3T_4^1 = [R(\bar{Z}, \theta_4^*), P_{orig}(4,3, \bar{Z})]$$

$$4.- {}^3T_4^2 = [R(\bar{X}, 180^\circ), P_{orig}(4,3, \bar{X})]$$

$$5.- {}^2T_3^1 = [R(\bar{Z}, \theta_3^*), P_{orig}(3,2, \bar{Z})]$$

$$6.- {}^2T_3^2 = [R(\bar{X}, 0^\circ), P_{orig}(3,2, \bar{X})]$$

$$7.- {}^1T_2^1 = [R(\bar{Z}, \theta_2^*), P_{orig}(3,1, \bar{Z})]$$

$$8.- {}^1T_2^2 = [R(\bar{X}, 90^\circ), P_{orig}(2,1, \bar{X})]$$

$$9.- {}^0T_1^1 = [R(\bar{Z}, \theta_1^*), P_{orig}(1,0, \bar{Z})]$$

Las matrices que se enumeraron se muestran a continuación de manera más específica.

$${}^4T_5^1 = \left[R(\bar{Z}, \theta_5), {}^4P_{O_{Ox}}(5) \right] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & -\text{sen}(\theta_5) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_5) & \cos(\theta_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -0.1275 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5^2 = \left[R(\bar{X}, 90^\circ), {}^4P_{O_{Ox}}(5) \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ) & -\text{sen}(90^\circ) & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ) & \text{sen}(90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4^1 = \left[R(\bar{Z}, \theta_4), 0 \right] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\text{sen}(\theta_4) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4^2 = \left[R(\bar{X}, 180^\circ), {}^3P_{O_{Ox}}(4) \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.25 \\ 0 & \cos(180^\circ) & -\text{sen}(180^\circ) & 0 \\ 0 & \cos(180^\circ) & \text{sen}(180^\circ) & 0.275 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3^1 = \left[R(\bar{Z}, \theta_3), 0 \right] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\text{sen}(\theta_3) & 0 & 0.3 \\ \text{sen}(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3^2 = \left[R(\bar{Z}, \theta_2), 0 \right] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2^1 = \left[R(\bar{X}, 90^\circ), {}^2P_{O_{Ox}}(3) \right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.06 \\ 0 & \cos(90^\circ) & -\text{sen}(90^\circ) & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ) & \text{sen}(90^\circ) & 0.075 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2^2 = [P(\bar{Z}, \theta), {}^1P_{Ox}(2)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.36 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de transformación total se obtiene al multiplicar las matrices mencionadas en el orden que se muestra a continuación.

$$T_{\text{Tot}} = {}^0T_1^2 \cdot {}^1T_1^1 \cdot T_2^1 \cdot T_2^2 \cdot T_3^2 \cdot T_3^3 \cdot T_4^3 \cdot T_4^4 \cdot T_5^4 \cdot T_5^1 \quad (3.2.1)$$

Debido a los resultados que de esta matriz de transformación total se pueden extraer, su obtención se efectuó a través del programa que forma parte de este trabajo de tesis, con el fin de hacer más poderosa esta herramienta, todas las operaciones para obtener esta matriz se realizaron de manera analítica para evitar los posibles errores introducidos por el inherente proceso de derivación numérica al que se verán sometidos los elementos de dicha matriz..

Si se desea conocer el resultado mencionado pueden editarse los archivos mulma.dat que el programa genera durante su ejecución. Estos archivos se puede encontrar en el subdirectorio de Vb (Visual Basic). Soñ para dar una pequeña idea, se muestra a continuación el elemento 1,4 de la matriz total.

$$\begin{aligned} & \text{COS}(\theta 2) * \text{COS}(\theta 3) * \text{COS}(\theta 4) * -\text{SEN}(\theta 5) * \text{SEN}(\Pi / 2) * -0.1275 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * \text{COS}(\theta 3) * \text{COS}(\theta 4) * 0.25 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * \text{COS}(\theta 3) * -\text{SEN}(\theta 4) * \text{COS}(\Pi) * \text{COS}(\theta 5) * \text{SEN}(\Pi / 2) * -0.1275 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * \text{COS}(\theta 3) * -\text{SEN}(\theta 4) * -\text{SEN}(\Pi) * \text{COS}(\Pi / 2) * -0.1275 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * \text{COS}(\theta 3) * 0.30 + \text{COS}(\theta 2) * -\text{SEN}(\theta 3) * \text{SEN}(\theta 4) * -\text{SEN}(\theta 5) * \text{SEN}(\Pi / 2) * -0.1275 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * -\text{SEN}(\theta 3) * \text{SEN}(\theta 4) * 0.25 + \text{COS}(\theta 2) * - \\ & \text{SEN}(\theta 3) * \text{COS}(\theta 4) * \text{COS}(\Pi) * \text{COS}(\theta 5) * \text{SEN}(\Pi / 2) * -0.1275 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * -\text{SEN}(\theta 3) * \text{COS}(\theta 4) * -\text{SEN}(\Pi) * \text{COS}(\Pi / 2) * -0.1275 + \\ & \text{COS}(\theta 2) * 6 + \\ & -\text{SEN}(\theta 2) * \text{COS}(\Pi / 2) * \text{SEN}(\theta 3) * \text{COS}(\theta 4) * -\text{SEN}(\theta 5) * \text{SEN}(\Pi / 2) * -0.1275 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{SEN}(\theta_3) \cdot \text{COS}(\theta_4) \cdot 0.25 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{SEN}(\theta_3) \cdot -\text{SEN}(\theta_4) \cdot \text{COS}(\Pi) \cdot \text{COS}(\theta_5) \cdot \text{SEN}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{SEN}(\theta_3) \cdot -\text{SEN}(\theta_4) \cdot -\text{SEN}(\Pi) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{SEN}(\theta_3) \cdot 0.30 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{COS}(\theta_3) \cdot \text{SEN}(\theta_4) \cdot -\text{SEN}(\theta_5) \cdot \text{SEN}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{COS}(\theta_3) \cdot \text{SEN}(\theta_4) \cdot 0.25 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{COS}(\theta_3) \cdot \text{COS}(\theta_4) \cdot \text{COS}(\Pi) \cdot \text{COS}(\theta_5) \cdot \text{SEN}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot \text{COS}(\theta_3) \cdot \text{COS}(\theta_4) \cdot -\text{SEN}(\Pi) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot -\text{SEN}(\Pi/2) \cdot \text{SEN}(\Pi) \cdot \text{COS}(\theta_5) \cdot \text{SEN}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot -\text{SEN}(\Pi/2) \cdot \text{COS}(\Pi) \cdot \text{COS}(\Pi/2) \cdot -0.1275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot -\text{SEN}(\Pi/2) \cdot -0.0275 + \\
& -\text{SEN}(\theta_2) \cdot -0.075
\end{aligned}$$

Como se puede observar, esto requiere una gran cantidad de cálculo tomando en consideración que cada uno de los términos de la ecuación requiere ser derivado dos veces con respecto al tiempo el número de operaciones crece rápidamente. El problema puede ser resuelto de manera alternativa a través de la derivación numérica, sin embargo, la derivación numérica no es recomendada por la naturaleza misma de la derivada. Los métodos numéricos de derivación presentan fallas considerables cuando el punto de interés se aproxima a una máximo o a un mínimo.¹

Para facilitar el análisis dinámico es necesario recordar un teorema básico del álgebra lineal

Sea T una transformación lineal entre dos espacios vectoriales V y W y sean $A = \{\alpha_i\}_{i=1}^n$ y

$B = \{\beta_j\}_{j=1}^m$ bases de V y W respectivamente. $T: V \rightarrow W$ puede ser representada como una matriz de $m \times n$ manteniendo fijas las bases A y B .

¹ Consultar BURDEN RICHARD L., DOUGLAS FAIRES J. "Análisis Numérico" Ed. Grupo Editorial Iberoamericana.

Reflexionando un poco en este teorema se concluye que la matriz total representa también una transformación del sistema de referencia 5 al sistema de referencia 0.

3.3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN TOTAL.

La matriz de transformación total tiene la forma general :

$${}^0T_5 = \begin{bmatrix} R(\vec{k}, \theta) & P_{\text{orig}}^0(5) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

La matriz $R(\vec{k}, \theta)$ representa una rotación equivalente alrededor de un eje general k , un ángulo de θ° siguiendo la regla de la mano de derecha. Esta matriz es ortonormal es decir que la norma de los vectores columna y los vectores renglón es uno. Por otra parte es demostrable que dada una matriz no singular de 3×3 es posible obtener un vector director del eje general de giro y un desplazamiento angular alrededor de dicho eje. Es decir dada una matriz de 3×3

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

(3.2.3)

el desplazamiento angular alrededor del eje general de giro y las coordenadas del vector director están dados por la ecuación 3.2.4 y 3.2.5 respectivamente.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{r_{11} + r_{22} + r_{33} - 1}{2} \right) \quad (3.2.4)$$

$$\vec{k} = \frac{1}{2 \sin \theta} \begin{bmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{bmatrix} \quad (3.2.5)$$

La ecuación para θ siempre arroja un valor de entre 0 y 180° si se considera el rango de 181 a 360° se obtiene otra solución para la misma posición y orientación. Para nuestro caso siempre se utilizará el valor que esté comprendido entre los 0 y los 180° . Entre la información que se puede obtener a partir de las ecuaciones 3.2.4 y 3.2.5 están las velocidades y aceleraciones angulares asociadas con el último sistema de referencia, por supuesto la utilidad radica en el hecho de que el cuerpo transportado siempre se mantiene fijo con respecto al último sistema de referencia.

El producto escalar $\vec{k}\dot{\theta}$ representa la velocidad angular Ω alrededor del eje de giro equivalente

$$\Omega = \begin{bmatrix} k_x \dot{\theta} \\ k_y \dot{\theta} \\ k_z \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

(3.2.6)

Si se deriva la ecuación 3.2.6 con respecto al tiempo se obtiene la aceleración angular que interviene en la ecuación de Euler que será tratada más adelante.

Por lo que respecta $P_{O_2}^0(5)$ representa el vector de posición del origen del sistema de referencia 5 con respecto al sistema 0. La derivada de este vector, proporciona la velocidad del origen del sistema de referencia del gripper visto desde la base. Si fijamos dicho origen en el centro de gravedad del cuerpo transportado y obtenemos la segunda derivada de la ecuación 3.2.6 con respecto al tiempo, tendremos la posibilidad de calcular las fuerzas que será necesario aplicar en los dedos, al obtener la aceleración del centro de gravedad del cuerpo.

3.3.3 CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR SCORBOT ER-VII

Una vez obtenida la matriz de transformación total, el valor del ángulo de giro y el correspondiente del vector de giro equivalente es posible obtener toda la descripción dinámica del manipulador y por ende del objeto transportado.

Las ecuaciones dinámicas que describen el movimiento general de un cuerpo en el espacio son las siguientes :

Ecuación de Newton

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

3.2.7

Donde m y a se refieren a la masa y a la aceleración del centro de masa del cuerpo rígido.

Ecuación de Euler

$$M_o = {}^C I \dot{\omega} + \omega \times {}^C I \omega$$

3.2.8

Donde ${}^C I$ es la matriz de inercia referida a una base $\{C\}$ cuyo origen está localizado en el centro de masa del cuerpo.

El factor aceleración de la ecuación 3.2.7 se obtiene de derivar dos veces con respecto al tiempo los tres primeros elementos de la cuarta columna de la matriz de transformación total, estos elementos representan la posición del sistema de referencia de la última base con respecto a la base 0.

Los factores ω y $\dot{\omega}$ se obtienen de la ecuación 3.2.6 y de su derivada respectivamente. Por lo que respecta al factor ${}^C I$, el programa adjunto permite elegir una serie de objetos sencillos con el fin de comparar los resultados cuando al mantener constantes todos los parámetros se altera la geometría del objeto a sujetar.

En el programa adjunto de esta tesis se tiene una representación tridimensional del manipulador ER-VII. El programa simula el movimiento entre dos puntos cualesquiera del volumen de trabajo de manipulador², estos puntos son introducidos por el usuario a través del

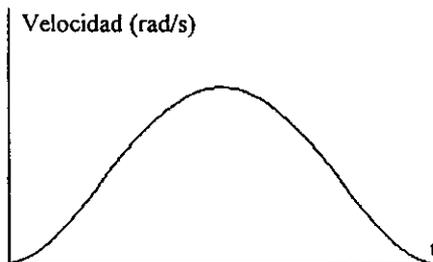
² El volumen de trabajo del programa no coincide con el volumen de trabajo real debido a que el primero no presenta las limitaciones físicas del segundo.

teclado de manera interactiva, ya que es posible observar en cada momento la posición en tres dimensiones del manipulador.

Al fijarse estas dos posiciones el programa ejecuta el movimiento entre los dos puntos bajo las siguientes reglas :

- 1.- Se mide el desplazamiento experimentado por cada una de las articulaciones para ir de la posición inicial a la final³
- 2.- Realiza el desplazamiento calculado de todas las articulaciones en el tiempo elegido.
- 3.- El perfil de desplazamiento angular se puede representar a través de un polinomio de 5° grado.
- 4.- El perfil de velocidad y aceleración angulares se obtiene de derivar este polinomio.

Estos perfiles se muestran a continuación.



³ Este desplazamiento no tiene límites geométricos ni físicos por lo que puede ser mayor de 360°

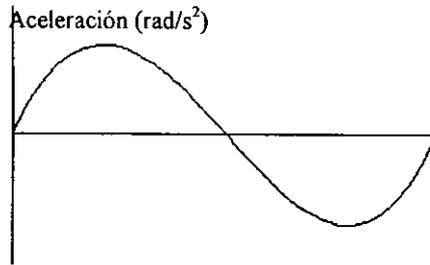


Figura 3.6 Polinomios de posición, rapidez y acelerante angular respectivamente.

De manera general, las reglas mencionadas no se utilizan en la práctica, ya que es el caso en que se desea un perfil de rapidez determinado en el punto operacional y no en las articulaciones,

Sin embargo este tipo de comportamiento se observa en el manipulador cuando se mueve entre dos puntos cualesquiera sin restricción en la trayectoria. Además esta ley de movimiento permite obtener las mayores aceleraciones de entre un gran número de trayectorias posibles.

Una vez que se ha fijado el comportamiento de las posiciones, las velocidades y las aceleraciones angulares es posible sustituir estos valores para cualquier tiempo en las ecuaciones 3.24, 3.25 y 3.26. Una vez realizado lo anterior el programa calcula de manera inmediata el valor de las posiciones, velocidades y aceleraciones producidas durante el transporte del objeto. Ya que tanto r , como Ω son cantidades vectoriales el programa separa estas cantidades en sus componentes vectoriales, vistas desde el sistema de referencia. A continuación se muestran los resultados de velocidad tanto lineal como angular así como los correspondientes de aceleración para la trayectoria que se muestra en la figura .

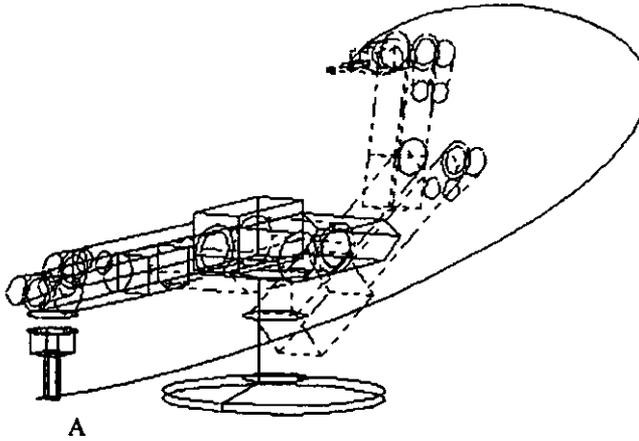


Figura 3.7 Trayectoria seguida por el manipulador entre los puntos A y B de acuerdo a la ley explicada de velocidad angular.

Punto	Vel. Lineal en X (m/s)	Vel. Lineal en Y (m/s)	Vel. Lineal en Z (m/s)	Rapidez lineal (m/s)
1	0	0	0	0
2	4.093234E-03	2.089967E-02	7.989816E-03	2.274616E-02
3	1.455114E-02	.078117	2.975213E-02	8.484804E-02
4	2.664873E-02	.1643426	6.202392E-02	.1776671
5	3.250238E-02	.2732279	.101558	.2932983
6	2.143655E-02	.3983016	.1450927	.4244474
7	-1.867965E-02	.5311786	.1893408	.5642248
8	-9.913691E-02	.6596472	.2310061	.7059223
9	-.2271217	.7665606	.266854	.8428585
10	-.4018652	.8305998	.2938627	.9683734
11	-.6112987	.8296833	.3094586	1.076023
12	-.830936	.7468992	.3118125	1.159974
13	-1.02666	.5774292	.3001392	1.21554
14	-1.161909	.3336802	.2749194	1.23974
15	-1.207667	4.566728E-02	.2379685	1.231736

16	-1.151699	-.244766	.1923006	1.193022
17	-1.003043	-.4945085	.1417871	1.12727
18	-.7895232	-.6706122	9.066171E-02	1.03985
19	-.5492362	-.7580559	4.296896E-02	.9370995
20	-.3196624	-.7611036	2.066098E-03	.8255101
21	-.1287379	-.6986006	-2.973026E-02	.7109854
22	9.336137E-03	-.5960477	-5.130332E-02	.5983244
23	9.332842E-02	-.4779546	-6.270304E-02	.4910015
24	.1310254	-.3628795	-.0649661	.3912413
25	.1344642	-.2617825	-5.985323E-02	.3003217
26	.1161256	-.1789442	-4.956653E-02	.2190046
27	8.679227E-02	-.1141852	-3.649126E-02	.1479958
28	5.490065E-02	-6.531104E-02	-2.298304E-02	8.836195E-02
29	2.678802E-02	-3.015842E-02	-1.120604E-02	.0418653
30	7.239455E-03	-7.974893E-03	-3.028437E-03	1.118839E-02
31	2.732195E-07	3.106921E-07	-5.309862E-08	4.171306E-07

Tabla 3.3 Valores de velocidad lineal a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6 (Tiempo de recorrido 3 seg.)

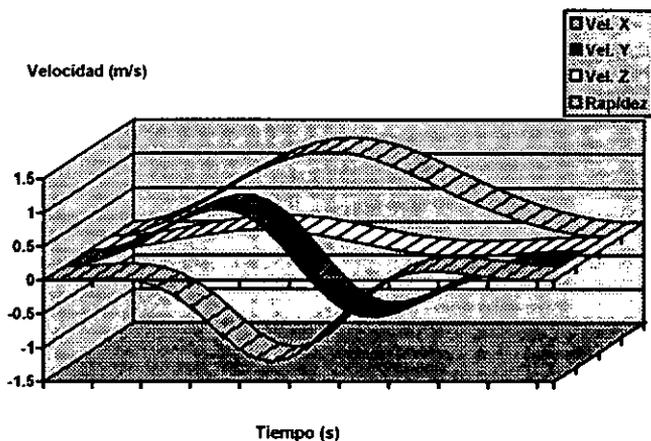


Figura 3.8 Componentes de las velocidades lineales a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6. (Tiempo 3 seg.)

Punto	Vel. Angular X (rad/s)	Vel. Angular Y (rad/s)	Vel. Angular Z (rad/s)	Rapidez angular (rad/s)
1	0	0	0	0
2	-7.903441E-04	1.307436E-04	-1.230485E-05	8.011798E-04
3	-.0110066	1.709038E-03	-1.798993E-04	1.113995E-02
4	-4.834465E-02	6.26975E-03	-8.850789E-04	4.875755E-02
5	-.1319836	1.105879E-02	-2.885424E-03	.1324775
6	-.2761846	3.959947E-03	-7.549529E-03	.2763162
7	-.4841627	-3.928777E-02	-.0169891	.4860511
8	-.7413799	-.1527622	-3.390261E-02	.7577136
9	-1.00987	-.3710647	-6.105743E-02	1.077615
10	-1.227802	-.7135894	-.100475	1.423658
11	-1.319204	-1.166809	-.1525124	1.767768

12	-1.215658	-1.673064	-.2151238	2.079242
13	-.8848906	-2.135262	-.2835952	2.328691
14	-.353903	-2.441702	-.350956	2.492053
15	.287653	-2.504576	-.4090765	2.554015
16	.9106572	-2.295424	-.4502327	2.510175
17	1.388888	-1.859102	-.4687256	2.367483
18	1.641285	-1.297837	-.4620943	2.142832
19	1.654155	-.7331797	-.4315747	1.860118
20	1.474955	-.2650923	-.3816985	1.546435
21	1.184806	5.348255E-02	-.3192038	1.228216
22	.8659818	.2192943	-.251617	.9280762
23	.5788733	.2639573	-.1859085	.6628195
24	.3541424	.2330882	-.1275257	.4427299
25	.1972223	.1692745	-7.992308E-02	.2719157
26	9.837083E-02	.103092	-4.453245E-02	.1492914
27	4.230397E-02	.0513183	-2.101802E-02	.0697492
28	1.439316E-02	1.926057E-02	-7.652367E-03	2.523274E-02
29	3.139911E-03	4.441347E-03	-1.737671E-03	.00571
30	2.21606E-04	3.20498E-04	-1.246736E-04	4.091108E-04
31	6.137338E-16	5.592645E-19	-2.830448E-13	2.830455E-13

Tabla 3.4 Valores de velocidad angular a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6 (Tiempo de recorrido 3 seg.)

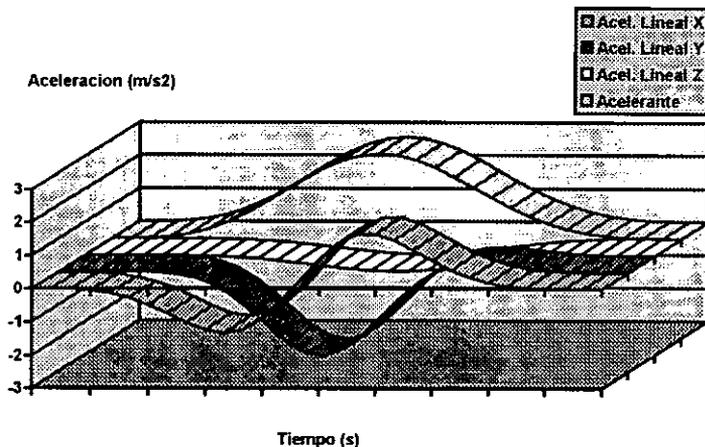


Figura 3.9 Componentes de la velocidades angulares a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6. (Tiempo 3 seg.)

Punto	Acel. Lineal X (rad/s)	Acel. Lineal Y (rad/s)	Acel. Lineal Z (rad/s)	Acelerante (rad/s)
1	0	0	0	0
2	-7.862821E-04	1.910139E-04	-3.397342E-05	8.098643E-04
3	-1.096123E-02	2.552402E-03	-4.778833E-04	1.126462E-02
4	-4.827152E-02	1.001752E-02	-2.152575E-03	4.934697E-02
5	-.132422	2.149206E-02	-6.14792E-03	.1342955
6	-.2792257	2.636736E-02	-1.377305E-02	.2808059
7	-.4949563	1.129769E-03	-2.651756E-02	.4956674
8	-.7696965	-8.935925E-02	-4.589314E-02	.7762242
9	-1.070811	-.2839546	-7.310606E-02	1.11023
10	-1.340346	-.6105602	-.1086041	1.476857
11	-1.501426	-1.067978	-.1516198	1.848741
12	-1.476671	-1.611623	-.1998709	2.194957
13	-1.215826	-2.15247	-.2495673	2.484682

14	-7224146	-2.575439	-.2958053	2.691146
15	-6.534974E-02	-2.774536	-.3333157	2.79525
16	.6343436	-2.691439	-.3574148	2.788186
17	1.239702	-2.339325	-.3649226	2.67254
18	1.641958	-1.799345	-.3548024	2.461616
19	1.792645	-1.191042	-.3283494	2.177147
20	1.710381	-.6313426	-.2888914	1.845929
21	1.462803	-.2009526	-.2411034	1.496097
22	1.13585	6.968897E-02	-.1901378	1.153761
23	.8055204	.1943179	-.1407933	.840503
24	.5218898	.2129091	-9.689311E-02	.5719157
25	.3068026	.1722514	-6.094715E-02	.3570895
26	.1606315	.1119902	-3.407796E-02	.1987601
27	7.189654E-02	.0581078	-1.613058E-02	9.383935E-02
28	2.518078E-02	2.236664E-02	-5.885104E-03	3.419024E-02
29	5.588347E-03	5.227411E-03	-1.337964E-03	7.768243E-03
30	3.972165E-04	3.791921E-04	-9.603469E-05	5.574857E-04
31	1.961024E-12	-1.209683E-13	-3.001392E-14	1.964981E-12

Tabla 3.5 Valores de aceleración lineal a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6 (Tiempo de recorrido 3 seg.)

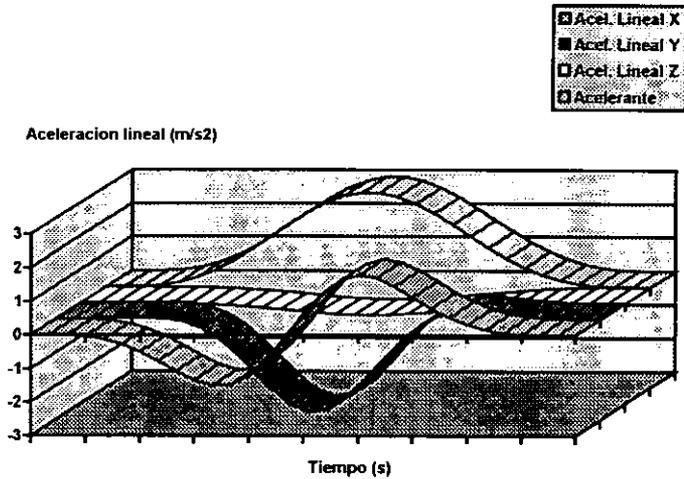


Figura 3.10 Componentes de las aceleraciones lineales a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6. (Tiempo 3 seg.)

Punto	Acel. Angular X (rad/s)	Acel. Angular Y (rad/s)	Acel. Angular Z (rad/s)	Acelerante angular (rad/s)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	-6.092127E-06	-1.762842E-07	1.00708E-07	6.095509E-06
6	-1.115303E-04	-5.802813E-06	3.31333E-06	1.117303E-04
7	-1.149783E-03	-9.549141E-05	5.445477E-05	1.155026E-03
8	-7.585849E-03	-9.267644E-04	5.271392E-04	7.660409E-03
9	-3.554348E-02	-6.052117E-03	3.426741E-03	3.621753E-02
10	-.1259789	-2.899139E-02	1.629359E-02	.1302945
11	-.3515752	-.1082943	6.017766E-02	.3727655

12	-.7921949	-.3286841	.1796727	.8762923
13	-1.4636	-.8278897	.4423183	1.738727
14	-2.235741	-1.73447	.8983692	2.968837
15	-2.830617	-2.991554	1.486971	4.378684
16	-2.958073	-4.185617	1.971428	5.491458
17	-2.515887	-4.681749	2.056545	5.698934
18	-1.682116	-4.124549	1.655973	4.752228
19	-.8031736	-2.80278	1.002132	3.083007
20	-.1710129	-1.404957	.4323022	1.479877
21	.1232177	-.4477038	.1131455	.4779364
22	.1675102	-9.710656E-03	1.884618E-03	.167802
23	.106688	9.887628E-02	-1.324312E-02	.1460624
24	4.172937E-02	7.841614E-02	-5.891693E-03	8.902328E-02
25	6.641585E-03	3.703716E-02	-7.735968E-04	3.763589E-02
26	-3.932319E-03	9.827623E-03	2.52349E-04	1.058815E-02
27	-3.808533E-03	-9.178718E-04	-5.702562E-05	3.917993E-03
28	-1.668127E-03	-2.253113E-03	-1.967008E-04	2.810312E-03
29	-3.895539E-04	-8.83538E-04	-8.98354E-05	9.697742E-04
30	-2.729401E-05	-8.250274E-05	-8.864479E-06	8.735127E-05
31	3.094916E-13	-2.18517E-12	-2.367059E-13	2.219636E-12

Tabla 3.6. Valores de aceleración angular a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6 (Tiempo de recorrido 3 seg.)

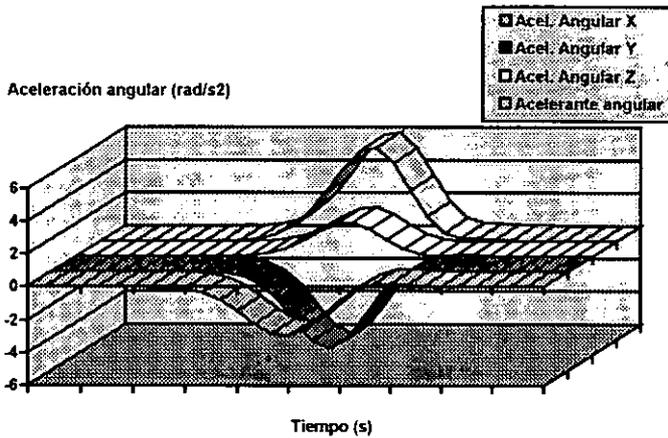


Figura 3.11 Componentes de las aceleraciones angulares a lo largo de 30 puntos de la trayectoria mostrada en la figura 3.6. (Tiempo 3 seg.)

Como puede observarse en las gráficas, los valores de velocidad tanto lineal como angular son muy pequeños, y las aceleraciones no exceden nunca los 3 m/s^2 y los 6 rad/s^2 respectivamente. Obviamente los valores de estos parámetros serán mayores cuanto menor sea el tiempo de recorrido entre los dos puntos extremos de la trayectoria. Hasta aquí parece no haber utilidad en el cálculo de estos parámetros sin embargo en la sección siguiente se obtendrán a partir de estos, los valores de las fuerzas de cierre necesarias en cada punto de la trayectoria. Esto permitirá evitar que el objeto transportado sea soltado al presentarse aceleraciones bruscas en el movimiento del robot.

3.3.4 DINÁMICA DEL CUERPO TRANSPORTADO.

Una vez que se han calculado las velocidades y las aceleraciones del manipulador se está en posibilidad de aplicar las ecuaciones 3.27 y 3.28 con las cuales pueden encontrarse las fuerzas que es necesario aplicar al objeto. La figura 3.12 muestra la condición general de las fuerzas aplicadas al objeto transportado en condiciones de movimiento.

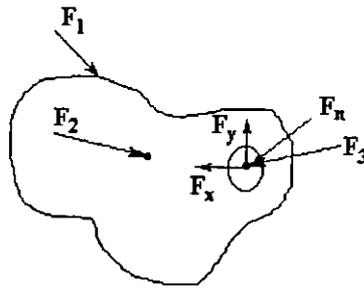


Figura 3.12. Condición general de aplicación de fuerzas durante la transportación.

En la figura, la fuerza 3 ha sido descompuesta en una componente normal a la superficie del objeto en el punto de contacto y dos más contenidas en el plano tangente. Esto trae consigo la descomposición de cada una de las fuerzas aplicadas al objeto en tres componentes por lo que se tiene nueve incógnitas a encontrar. Por otra parte, las ecuaciones vectoriales 3.27 y 3.28 que se mencionaron, proporcionan cada una de ellas 3 ecuaciones escalares. Así se tiene un sistema de seis ecuaciones con nueve incógnitas. Este sistema de ecuaciones considera a las componentes tangenciales independientes de la componente normal, sin embargo las componentes normal y tangenciales están relacionadas como sigue :

$$F_x + F_y = \mu F_n$$

3.29

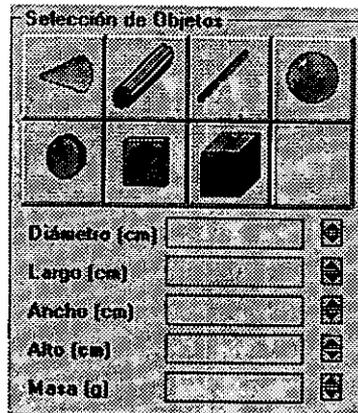
Al analizar las fuerzas de sujeción ejercidas por un dispositivo de múltiples dedos; se presentan tres diferentes esquemas que son :

Sujeción sin fricción. En este caso se considera que en el punto de aplicación solo existen fuerzas normales al objeto (sin fricción), este esquema simplifica de sobremanera el análisis y el sistema de ecuaciones resultante está sobredeterminado (se tiene más ecuaciones que incógnitas) sin embargo la realidad dista mucho de ser lo que este esquema plantea y por lo tanto se recurre con frecuencia al siguiente esquema.

Sujeción con fricción sin deformación. Este tipo de sujeción considera que tanto el objeto a sujetar como los dedos son perfectamente rígidos, esto ocasiona que las fuerzas de fricción entre los dedos y el objeto no tengan momento en el punto de aplicación ; de tenerlo, el número de incógnitas a encontrar para cada dedo es de seis. Este modelo es que se utiliza para este trabajo de tesis y da una buena aproximación de la situación real de sujeción.

Sujeción con fricción y deformación Este esquema es el más cercano a la realidad ya que considera deformaciones tanto del objeto como del cuerpo a sujetar y por lo tanto tiene presente los momento ocasionados por las fuerzas de fricción en el plano tangente al cuerpo. Sin embargo como ya se mencionó se tienen n momentos actuantes sobre el cuerpo, uno en cada punto de contacto, y ya que se trata el caso general de movimiento en el espacio, dichos momentos tendrán a su vez tres componentes cada uno.

Durante el proceso de cálculo de estas fuerzas, el programa adjunto permite seleccionar una serie de objetos, de esta manera, es posible conocer la dirección de las fuerzas desconocidas dejando solo como incógnita su magnitud. Las características geométricas de los cuerpos a seleccionar pueden ser variadas a través del programa al igual que su masa. Otros aspectos tales como los puntos de sujeción quedan fijos y varían de objeto a objeto. La figura 3.13 muestra las geometrías que son elegibles en el programa.



La tabla 3.7 muestra las condiciones de sujeción para cada uno de los objetos que son elegibles.

Objeto	Condiciones de sujeción.
Cono	Los tres puntos de apoyo están localizados en un plano paralelo a la base del cono, por encima de su centro de gravedad
Cilindro	Los puntos de apoyo están localizados en un plano paralelo a sus caras planas, por encima de su centro de gravedad.
Barra	Los puntos de apoyo están localizados en un plano paralelo a sus caras planas, por encima de su centro de gravedad.
Esfera	Ubicación de los puntos de apoyo indistinta, salvo en un plano que contenga al centro de gravedad.
Disco	Los puntos de apoyo están localizados en un plano paralelo y equidistante de sus caras planas.
Placa rectangular	Dos puntos de apoyo localizados en una de las caras, el punto restante localizado en la cara opuesta. Los tres puntos de apoyo están contenidos en un mismo plano.
Prima rectangular	Dos puntos de apoyo localizados en una de las caras, el punto restante localizado en la cara opuesta. Los tres puntos de apoyo están contenidos en un mismo plano.

Tabla 3.7 Condiciones de sujeción para distintos objetos.

Una vez elegida geometría se puede calcular los ángulos de las fuerzas que nos interesan y resolver el sistema de ecuaciones.

3.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

El análisis de transferencia de calor es necesario para conocer el comportamiento de dispositivo en condiciones de operación, esto será de utilidad para escoger los sensores de presión que deberán colocarse en la punta de los dedos del manipulador. El análisis de transferencia de

calor no es sencillo, ya que existen factores que van desde la geometría hasta el cambio no despreciable en las propiedades del material con memoria de forma que lo complican sobre manera. Adicionalmente, los métodos para calcular la transferencia de calor por convección no son ni exactos ni directos, por lo que cada iteración del método numérico para obtener la solución del sistema, consta a su vez de múltiples iteraciones para un solo valor de la variable independiente (tiempo).

Por este solo hecho, se hace primeramente un análisis simplista, dando como válidas un gran número de suposiciones. Este análisis permitirá conocer el orden de magnitud de cada uno de los fenómenos de transferencia de calor por separado, para poder contemplar con mayor claridad su influencia en el proceso total, y así atrevernos a “sustituir” alguno de ellos por factores de corrección que se obtengan fácilmente en función de una sola variable.

Para este primer análisis es muy importante simplificar el fenómeno considerando que el sistema se encuentra en estado permanente, con esto obtenemos un modelo matemático basado en una ecuación diferencial de 1^{er} orden (con T como variable independiente). Además se considera al elemento de actuación con temperatura volumétrica uniforme, esto evitará el tener que calcular el flujo de calor dentro del material debido a un gradiente de temperatura. El elemento de actuación se considerará como un cuerpo gris para efectos del cálculo de calor transferido por radiación. Por lo que se refiere al mecanismo de convección este tiene variantes, la primera se da cuando el manipulador está en reposo. Para el cálculo de transferencia de calor en estas condiciones se considera convección libre, cuando el manipulador empieza a evolucionar sus articulaciones existe una componente de velocidad distinta de cero que obliga a considerar convección forzada ; para ello se debe calcular la velocidad con la que se mueve el órgano terminal. Con el fin de dejar claras estas y otras suposiciones se enumerar a continuación.

3.4.1 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR (PRIMERA APROXIMACIÓN)

Para el análisis de transferencia de calor en su primera aproximación se tratan dos casos en este trabajo, el primero respeta la geometría del elemento de actuación, el segundo considera que el área de la sección transversal es circular con un perímetro equivalente al de la sección rectangular real, esto con el fin de que el área de transferencia de calor se conserve.

CASO 1 SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR**Suposiciones**

- * Sistema en respuesta permanente
- * Temperatura del elemento de actuación homogénea
- * Convección natural
- * Conducción en una dirección
- * Radiación de cuerpo gris
- * Se desprecian los efectos en los bordes de los elementos

Con todo lo anterior y tomando como un primer volumen de control aquel formado por las fronteras físicas del elemento de actuación se obtiene; de la ecuación de balance de energía para ese volumen de control lo siguiente:

$$E_{in} + E_g - E_{out} = 0 \quad (3.3.1)$$

Donde la energía que entra se toma en cuenta al considerar al elemento de actuación como cuerpo gris (su capacidad de recibir energía radiante es la misma que la que tiene de cederla) por lo tanto, el término mismo de energía entrante E_{in} es cero. Por otro lado la energía generada es aquella debida al efecto Joule de calentamiento por paso de corriente eléctrica y está dada por:

$$E_g = VI = I^2R \quad (3.3.2)$$

Con el fin de hacer más formal el análisis y debido a que la resistividad de la aleación de Ti-Ni varía fuertemente durante la transformación martensítica, se expresa la siguiente ecuación en función de la resistividad y de las características geométricas de la muestra.

$$E_g = I^2 \left(\rho \frac{L}{A} \right)$$

(3.3.3)

Y por último, la energía que se disipa se debe a tres mecanismos de transferencia de calor:

$$T_{sal} = E_{cond} + E_{conv} + E_{rad.}$$

(3.3.4)

La energía por *conducción* se pierde a través del aluminio que sujeta al elemento de actuación con los eslabones de Nylamid. La geometría de estos elementos de aluminio con respecto al la que tiene el material con memoria de forma hace que el análisis de la transferencia de calor real que ocurre entre ellos se complique. Por una parte el problema real es tridimensional pero se puede restringir a una sola dirección considerando las dimensiones tan pequeñas de los elementos involucrados

Por lo que respecta a la energía por convección, se utilizará el mismo procedimiento para todas y cada uno de las caras del elemento de actuación; sin embargo, vale la pena mencionar que por el limitado espacio en el que se localiza los elementos, las caras laterales tendrán una transferencia de calor con el aire de carácter casi conductivo. Se tomará en cuenta más adelante y se compararán ambos casos.

Por último, y ante la imposibilidad de conseguir por parte del fabricante los valores de absorptividad y de emisividad, se considera a la tira de Ti-Ni como un cuerpo gris por lo que dichos valores serán considerados como iguales entre si.

Proceso de Convección

Como se mencionó con anterioridad, el mecanismo de convección que más se aproxima en este caso es el de la convección natural, donde se considera que el aire que rodea al elemento de actuación está calmado⁴. La ecuación que rige la transferencia de calor por convección es :

⁴ Ambiente calmado involucra que la velocidad a distancias superiores a 10 veces la capa límite a partir del objeto es cero.

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

(3.3.5)

Donde

h Coeficiente de transferencia de calor por convección.

T_s Temperatura de la superficie del cuerpo sólido

T_∞ Temperatura del medio a distancias desde el cuerpo superiores a el espesor de la capa límite.

El problema consiste principalmente en encontrar la h misma. h posee una fuerte dependencia de la derivada de la temperatura adimensional con respecto a la ordenada adimensional:

$$h \approx \left. \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0}$$

(3.3.6)

La constante de proporcionalidad para este caso el cociente de dos números k_f y la longitud L de tal manera que queda:

$$h = \frac{k_f}{L} \frac{\partial T^*}{\partial y^*}$$

(3.3.7)

Acomodando la ecuación (3.3.13) se obtiene un parámetro muy conocido en transferencia de calor, el número de Nusselt que se define como:

$$Nu \equiv \frac{hL}{k_f} = \left. \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right|_{y^*=0}$$

(3.3.8)

Nuevamente fue necesario dividir el problema en varias partes por el tipo de geometrías que exige el método de solución. Estas partes son:

- 1.-Dos caras verticales
- 2- Una cara horizontal caliente superior
- 3.-Una cara horizontal caliente inferior.

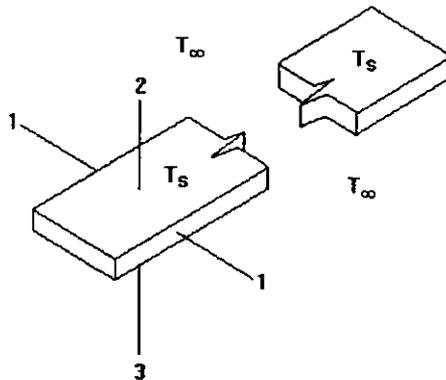


Figura 3.13 Representación de las superficie de transferencia en el elemento de actuación.

Ante todo se debe aclarar que el análisis de los procesos convectivos involucra una serie de técnicas muy conocidas en la transferencia de calor, tales como la normalización, la adimensionalización y la parametrización que no se explican en el presente trabajo. Existe desde luego una ecuación basada en la conservación del momento del fluido que describe los procesos

convectivos, pero por desgracia, dicha ecuación tiene solución solo en casos muy específicos y bajo muchas restricciones.

Es por ello que se recurre a ecuaciones obtenidas experimentalmente y que involucran a los parámetros adimensionales que se mencionaron arriba. Estas ecuaciones son aplicables solo en casos muy específicos.

La deducción de la ecuación general de estado que rige los procesos convectivos, no se muestra en el presente, ni tampoco se resuelve para este caso en particular, pero se muestra solo con fines de justificar lo que posteriormente se trata. El sistema de referencia en el cual se obtuvo esta ecuación se muestra en la figura 3.7.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

(3.3.9)

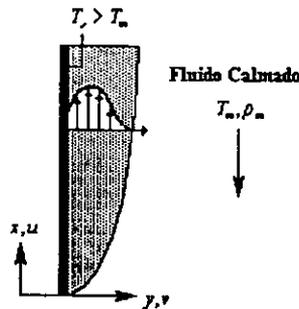


Figura 3.14 Localización del sistema de referencia 3.3.15 de donde se obtuvo la ecuación

Caso Paredes Verticales

Para el caso de las paredes verticales, se han desarrollado una serie de ecuaciones a partir de la experimentación, estas ecuaciones se muestran a continuación:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{4/27}} \right\}^2$$

(3.3.10)

Donde:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \text{ Numero de Rayleigh ,}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \text{ Se define como el coeficiente de expansión de una gas para este caso aire}^5$$

g Aceleración de la gravedad

L Longitud Característica

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ Viscosidad Cinemática}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \text{ Difusividad Térmica}$$

k Conductividad térmica.

 ρ Densidad. c_p Calor específico a presión constante

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \text{ Numero de Prantl}$$

⁵ Para fines de simplificación y por considerarse al aire como un gas ideal, β se redefine como: $\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{1}{T_\infty - T}$

Vale la pena aclarar, que la ecuación (3.3.16) se aplica en todo el dominio del número del Rayleigh, sin embargo, existe una ecuación que arroja resultados más exactos en una intervalo del número de Rayleigh perteneciente al régimen laminar de flujo ($Ra_L < 10^9$) esta ecuación es la siguiente:

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad (3.3.11)$$

Caso de pared horizontal inferior

El tipo de flujo que se presenta en el enfriamiento de una cara horizontal inferior exige ecuaciones distintas a las que se aplican para paredes verticales, de nuevo, obtenidas por experimentación las ecuaciones que rigen el fenómeno se muestran a continuación:

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}) \quad (3.3.12)$$

Esta ecuación es solo aplicable a caras inferiores en enfriamiento.

Caso de pared horizontal superior

Las ecuaciones que rigen la transferencia de calor para el caso de paredes horizontales superiores con enfriamiento son:

$$\overline{Nu}_L = 0.54 Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7) \quad (3.3.13)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.15Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11})$$

(3.3.14)

Que en esencia tienen la misma forma que (3.3.18)

Proceso de Conducción

Como es de esperarse existe un gradiente de temperatura en las tres direcciones principales y por ende habrá un flujo de calor en dirección de las mismas. Por ello, solo para fines de evaluación del orden de magnitud de este mecanismo, se supone flujo de calor unidireccional en dirección perpendicular a la cara mayor de la barra de Ti-Ni como se muestra en la figura 3.4.

El fenómeno se dividió para su estudio en tres partes que son:

- 1.- Transferencia de calor de la cara mayor superior por el aluminio hasta el Nylamid (temperatura supuesta de 25°C)
- 2.- Transferencia de calor de la cara mayor inferior por el aluminio hasta el aire (temperatura supuesta de 25°C)
- 3.- Transferencia de calor de las caras laterales por el aluminio hasta el aire (temperatura supuesta de 25°C)

Las dos primeras se hacen en coordenadas cartesianas por facilidad geométrica, mientras que la última se estudia en coordenadas cilíndricas.

Quedando como se muestra en la siguiente figura:

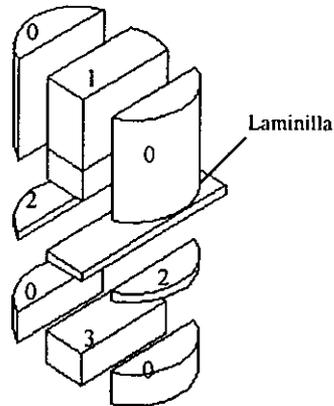


Figura 3.15 Esquema de las partes que constituirán los elementos resistentes para el cálculo de la transferencia de calor.

Para la transferencia de calor por las paredes laterales, se tienen dos casos:

- * Analizar la porción de sólido considerando un proceso de transferencia en dos dimensiones
- * Utilizar una geometría equivalente con transferencia de calor en dirección radial.

La segunda, simplifica grandemente el problema pero su justificación involucra obtener resultados de ambas configuraciones y compararlos, lo cual obviamente se tiene que hacer una sola vez.

La ecuación que rige la transferencia de calor para una sola dirección en coordenadas cartesianas es

$$q_x = k \frac{\Delta T}{L}$$

(3.3.15)

Y para la primer parte, que corresponde a la transferencia de calor de la cara mayor superior por el aluminio hasta el Nylamid (temperatura supuesta de 25°C) se presenta el caso de conducción de calor a través de dos medios distintos, el cual se puede atacar como si se tratase de un circuito eléctrico con tres resistencias en serie, tal como se muestra en la figura 3.16.

Donde T_s es la temperatura del elemento de actuación y T_∞ y la temperatura del aire circundante. Así pues se tiene que la transferencia de calor del elemento de actuación al medio ambiente es:

$$Q = \frac{T_s - T_\infty}{R_{tot}} \quad (3.3.16)$$

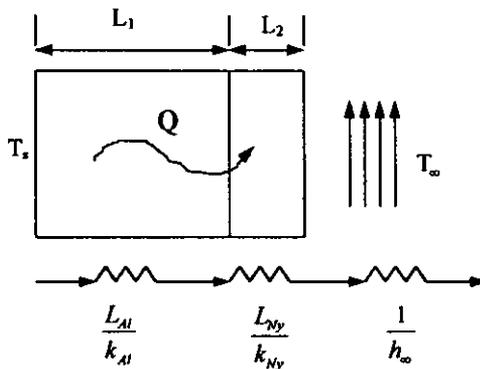


Figura 3.16 Analogía del proceso de conducción con un circuito eléctrico

Resistencias eléctricas equivalentes

Donde

$$R_{Tot} = \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{L_{Ny}}{K_{Ny}} + \frac{1}{h} \quad (3.3.17)$$

La h que aparece en el tercer término se obtiene posteriormente considerando un ambiente calmado que implica convección natural. Del mismo modo se procede para la transferencia de calor de la cara mayor inferior por el aluminio hasta el aire (temperatura supuesta de 25°C), siendo este caso más sencillo quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$Q = \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot}} \quad \text{donde} \quad (3.3.18)$$

$$R_{Tot} = \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{1}{h} \quad (3.3.19)$$

El tercer caso, es quizá el más complicado, ya que la involucra la transferencia de calor en dos dimensiones con una que para un caso práctico requiere de métodos iterativos para su solución. Por ello se propone utilizar un modelo alternativo de geometría semejante pero en el que la transferencia de calor se dé en una sola dirección. La geometría original así como su equivalente se muestra a continuación.



Figura 3.17 Idealización de la transferencia de calor a través de los elementos laterales

De primera vista, parecieran ser muchas las condiciones que se deben cumplir para poder hacer válido el cambio de geometría, sin embargo solo hoy una: que la transferencia de calor de la cara interior a la exterior sea la misma en ambas configuraciones. Esto es muy importante y se debe tomar en cuenta posteriormente cuando se aplique un cambio de geometría todavía más drástico.

Así con la nueva configuración se muestra la ecuación que rige la conducción a través de un sólido en coordenadas cilíndricas.

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s1} - T_{s2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

(3.3.20)

Donde $r_2 > r_1$ y T_{s1} y T_{s2} son las temperaturas de las superficies correspondientes.

Radiación

Generalmente, la radiación es un mecanismo de transferencia de calor despreciable a bajas temperaturas, sin embargo cuando se trata de procesos de convección natural, la radiación puede ser significativa aún a temperaturas bajas, incluso, con un aporte a la transferencia de calor total,

mayor que el que tiene la conducción. Por ello es muy importante evaluar el calor perdido por el elemento de actuación a través de radiación.

La ecuación que rige el fenómeno de transferencia de calor por radiación es la siguiente:

$$q'' = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3.3.21)$$

ϵ Emisividad Térmica

σ Constante de Boltzman ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Que se presenta solo en la parte "libre" del elemento de actuación.

Una vez planteado lo anterior, se puede saber el orden de magnitud de cada uno de los fenómenos involucrados en el análisis, evaluando para condiciones dadas y supuestas.

Evaluación.

Para el primer proceso, conducción tenemos:

$$q = A \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot}}$$

$$R_{Tot} = \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{L_{Ny}}{k_{Ny}} + \frac{1}{h_1} \quad (3.3.22)$$

Para el calculo de la resistencia total es necesario obtener previamente el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección (h) de la siguiente manera:

$$h_1 = \frac{Nu_1 K_f}{L}$$

(3.3.23)

De donde el número de Nusselt está dado por la ecuación (3.3.14)

De tablas de propiedades térmicas de los gases se obtienen los valores de α y ν que son función de la temperatura, para este caso en particular, la temperatura ambiente que fue supuesta de 21°C (294.15 K). Para la configuración específica que se tiene, es necesario sustituir la longitud L en la fórmula del número de Rayleigh por una longitud equivalente $L^* = \frac{A_s}{P}$ donde A_s es el área de la superficie de transferencia de calor y P su perímetro. Para este caso $L = 8.969 \times 10^{-3}$

$$Ra_{1,\nu} = \frac{9.81 \frac{1}{294.15} (60 - 20) (8.969 \times 10^{-3})^3}{(15.36467 \times 10^{-6}) (21.7278 \times 10^{-6})} = 20.138$$

Que aunque se encuentra por debajo del intervalo que exige la fórmula, podemos aplicarla para obtener el número de Nusselt, como sigue:

$$Nu_{1,L} = 0.54 Ra_L^{1/4} = 0.699 \approx 0.7$$

Con lo que finalmente el coeficiente de transferencia de calor por convección queda:

$$h_1 = \frac{Nu_L k_f}{L} = \frac{0.699 \times 25.832 \times 10^{-3}}{8.969 \times 10^{-3}} = 20.138 \frac{W}{m^2 k}$$

Una vez que se ha determinado el valor de h , se procede a calcular el valor de la resistencia total con la fórmula (3.3.22) quedando está como sigue:

$$R_{\text{total}} = \frac{L_{Ny}}{K_{Ny}} + \frac{L_{Al}}{K_{Al}} + \frac{1}{h} = \frac{2.5 \times 10^{-3}}{176.041} + \frac{4.0 \times 10^{-3}}{0.4834} + \frac{1}{20.138} = 5.03 \times 10^{-2} \frac{K}{W}$$

Quedando finalmente el calor total transferido por convección para el caso 1 de la siguiente manera:

$$q_1 = A \frac{T_x - T_\infty}{R_{\text{total}}} = 2.5 \times 10^{-3} \times 6.35 \times 10^{-3} \frac{60 - 21}{5.03 \times 10^{-2}} = 1.231 \times 10^{-2} W$$

Por lo que se refiere al caso dos, el procedimiento es idéntico, así es que solo se mostrará el resultado directo de los cálculos.

$$q_2 = 1.2464 \times 10^{-2} W$$

Falta calcular la transferencia de calor por las paredes laterales por medio del concepto de resistencia térmica total y con ayuda que para este caso en particular es:

$$R_{\text{total3}} = \frac{\ln(3.175/1.677)}{2\pi \times 0.5 \times 10^{-3} \times 176.041} + \frac{1}{2\pi \times 3.175 \times 10^{-3} \times 57.321 \times 0.5 \times 10^{-3}} = 1750 \frac{K}{W}$$

Por lo tanto, la transferencia de calor en esta sección será:

$$q_3 = \frac{39}{1750} = 2.2286 \times 10^{-4}$$

Donde se ve involucrado el coeficiente de transferencia de calor por convección que es diferente al coeficiente anteriormente obtenido. Por ello se debe calcular primero dicho valor para

sustituirlo en la fórmula. Para ello se procederá con el análisis de convección y una vez obtenido el valor que se necesita se evaluará en la formula correspondiente.

Finalmente, se evalúa la transferencia de calor por convección libre en la porción desnuda del elemento de actuación, donde el único mecanismo de transferencia presente es la convección libre debida a un ambiente calmado. Uno de los tres coeficientes de transferencia de calor involucrados ha sido ya calculado con anterioridad, el cálculo de los restantes se muestra a continuación.

Transferencia de Calor de las Caras Verticales Hacia el Aire

Como se expuso anteriormente la ecuación que rige el proceso de transferencia de calor de una pared vertical al medio está dado por la fórmula (3.3.17). En ella se involucra al Número de Rayleigh que ya ha sido calculado con anterioridad y que conserva su valor para los cálculos posteriores. En la fórmula intervienen parámetros que ya han sido obtenidos previamente, con excepción del numero de Prantl cuyo valor depende únicamente de la temperatura y por lo tanto se puede obtener con facilidad de tablas.

Así tenemos:

$$\overline{Nu}_{zL} = 0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}}$$

$$\overline{Nu}_{zL} = 0.68 + \frac{0.67 \times 0.487^{1/4}}{\left[1 + (0.492 / 0.708521)^{9/16}\right]^{4/9}} = 1.1095$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección libre dado por la ecuación 3.3.23.

$$h_2 = \frac{Nu_2 K_f}{L} = \frac{1.1095 \times 25832 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-3}} = 57.321 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Finalmente la transferencia de calor a través de las paredes verticales resulta ser:

$$q_4 = A_4 \frac{T_s - T_\infty}{R_{\text{Total}}} = 2.5 \times 10^{-3} \times 30.0 \times 10^{-3} \frac{60 - 21}{\frac{1}{57.321}} = 0.1677 \text{ W}$$

Por lo que corresponde a las caras horizontales se recuerda que se presentan dos casos para los cuales se muestran los resultados solamente, debido a que por depender solo del número de Rayleigh y ya haber sido calculado no es necesario cálculo alguno.

$$\overline{Nu}_L = 0.15 Ra_L^{1/3}$$

3.3.24

Para la cara superior caliente

$$\overline{Nu}_L = 0.27 Ra_L^{1/4}$$

3.3.25

$$\overline{Nu}_L = 0.27 \times 2.811^{1/4} = 0.3496$$

Así, aplicando la fórmula (3.3.13) los coeficientes de transferencia de calor quedan:

$$h_3 = 1.007 \frac{\text{W}}{\text{Km}^2}$$

La transferencia de calor respectiva es entonces:

$$q_5 = 0.5 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^{-3} \frac{39}{\frac{1}{57.321}} = 3.3533 \times 10^{-3} \text{ W}$$

$$q_6 = 2.5 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^{-3} \frac{39}{\frac{1}{1.007}} = 2.94548 \times 10^{-3} \text{ W}$$

Por último, tenemos el mecanismo de radiación que, cuando está presente la convección natural, tiene un peso bastante importante aún cuando se trate de bajas temperaturas. Es muy importante conocer el orden de magnitud de el mecanismo de radiación que es el que ocasiona que la ecuación diferencial para la respuesta en estado transitorio sea fuertemente no lineal, al aparecer la variable dependiente en un término de cuarto grado. El calor perdido por radiación tomando en cuenta las siguientes consideraciones

* Cuerpo gris

* Se consideran alrededores homogéneo, con emisividad constante

$$q = A \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4)$$

$$q_7 = (2 \times 0.5 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^{-3} + 2 \times 2.5 \times 10^{-3} \times 30 \times 10^{-3}) \times 0.5 \times 5.67 \times 10^{-8} (333.15^4 - 294.15^4) = 2.4658 \times 10^{-2}$$

En este punto estamos ya en posición de evaluar la transferencia de calor total del elemento de actuación tomando la suma algebraica de todos los valores mostrados tomando en cuenta las veces que se repiten los elementos geométricos a lo largo de la pieza. Así tenemos:

$$Q_{Tot} = 2q_1 + 2q_2 + 4q_3 + 2q_4 + q_5 + q_6 + q_7$$

$$Q_{Tot} = 0.41679 \text{ W}$$

Solo con fines de comparación se puede obtener la energía necesaria que se necesita para aumentar la temperatura de 21 a 60° que es la temperatura de inicio de transformación a martensita y de nuevo a hasta 90° que es la temperatura de transformación a martensita. El procedimiento es como sigue: conociendo la capacidad térmica específica de la muestra, se calcula la energía necesaria para incrementar su temperatura considerando un proceso adiabático, lo que se justifica por la rapidez del proceso. La energía absorbida es:

$$E = mc\Delta T$$

3.3.25

Donde

m Masa del elemento

c Capacidad térmica específica

ΔT Incremento de temperatura.

Por otra parte :

$$m = \rho V$$

3.3.26

ρ Densidad

V Volumen

Aun cuando la capacidad térmica específica varia con la temperatura, en la mayoría de los materiales se considera como constante. Sin embargo, en las aleaciones con memoria de forma esta capacidad térmica presenta cambios no despreciables, ya que la martensita y la austenita exhiben valores muy distintos de dicha capacidad térmica, por ello será necesario deducir una expresión que permita integrar en los cálculos esta variación. Para la primera parte del cálculo, no se presenta este problema ya que el material se encuentra totalmente en su fase austenítica. El problema aparece en el intervalo de temperaturas entre M_s y M_f (60° y 90° respectivamente).

Por otra parte debido a las dimensiones del elemento de actuación y a que el proceso de calentamiento es por medio del paso de una corriente continua⁶ la temperatura del elemento de actuación se considera constante tanto a lo largo como en toda la sección transversal.

⁶ El paso de una corriente continua implica que los electrones circula por toda la sección transversal y no solamente por una capa externa.

La masa del elemento de actuación es:

$$m = \rho V = 6450 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times (47.2 \times 10^{-3} \times 2.5 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 10^{-3}) \text{m}^3 = 380.55 \times 10^{-6} \text{ Kg} = 0.38 \text{g}$$

Así la energía necesaria para aumentar la temperatura de 21°C a 60°C es:

$$E = mc\Delta T = 3.8 \times 10^{-4} \text{ kg} \times 0.8374 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \times (60 - 21) = 12.41 \text{ J}$$

Considerando que este incremento se lleva a cabo en 1 segundo (según se verá más adelante) tenemos:

$$\dot{E} = 12.41 \text{ W}$$

Por lo que respecta al intervalo entre 60°C y 90°C es necesario introducir un parámetro conocido como el calor latente de transformación que es equivalente al calor latente de cambio de fase que se utiliza en termodinámica. Para el caso específico del Nitinol, el valor del calor latente es:

$$c_{\text{Activa}} = 24.2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Así la energía necesaria para incrementar la temperatura hasta M_f es:

$$E = mc_{\text{Activa}} = 3.8 \times 10^{-4} \text{ kg} \times 24.2 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 9.196 \text{ J}$$

Conociendo la potencia térmica necesaria para incrementar la temperatura, considerando un proceso adiabático, y conociendo la resistencia del elemento de actuación, se pueden calcular tanto el voltaje como la corriente de alimentación. El procedimiento es bastante simple, solo es necesario igualar la potencia térmica y eléctrica se tiene entonces.

$$Q = RI^2$$

3.3.27

Por otra parte :

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

3.3.28

Para el caso particular del material empleado tenemos:

$$\rho = 100 \mu\Omega \cdot cm = 1.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$$

La resistencia eléctrica será:

$$R = 1.0 \times 10^{-6} \Omega \cdot m \times \frac{47.2 \times 10^{-3} m^2}{(2.5 \times 10^{-3} \times 0.5 \times 10^{-3}) m^2} = 37.76 \times 10^{-3} \Omega$$

La corriente eléctrica será pues:

$$I = \sqrt{\frac{Q}{R}} = \sqrt{\frac{12.41}{37.76 \times 10^{-3}}} = 18.129 A$$

Conociendo el valor de la corriente eléctrica estamos en posibilidad de calcular el voltaje de alimentación del dispositivo con ayuda de la fórmula 3.3.29 donde la potencia eléctrica W es la misma potencia necesaria para producir el incremento de temperatura deseado.

$$W = VI$$

3.3.29

así:

$$V = \frac{W}{I} = \frac{12.41 W}{18.128 A} = 0.684 \times 10^{-3} V$$

Lo cual es un valor bajo, perfectamente alcanzable por cualquier dispositivo.

Es necesario reflexionar sobre el valor obtenido de corriente eléctrica, el cual resulta ser bastante alto. A manera de comparación es pertinente mencionar que la máxima corriente que

proporcionan las fuentes con las que se cuenta en el laboratorio es de 3 A. Para poder alcanzar los valores requeridos de corriente es necesario utilizar un transformador de 20 A el cual tiene un costo muy elevado. Existen dos alternativas de solución del problema. La primera consiste en utilizar vapor como medio para calentar el elemento de actuación, es posible utilizando el sistema de enfriamiento que se ha incorporado tanto en los dedos como en el cuerpo de la mano. La segunda opción consiste en utilizar algún otro material, de preferencia en forma de alambre muy delgado, de elevada resistividad eléctrica, por el que se haga circular una corriente de menor intensidad.

La gráfica 3.7 muestra órdenes de magnitud de cada uno de los mecanismos de transferencia de calor.

Proceso	Descripción	Potencia (W)	Porcentaje %
A	Conducción en coordenadas cartesianas a través del aluminio y el Nylamid hacia la parte superior	0.02462	24
B	Conducción coordenadas cartesianas a través del aluminio en la parte inferior	0.025328	27
C	Conducción lateral a través del aluminio	0.0008914	3
D	Convección natural a través de las paredes laterales desnudas	0.3354	4
E	Convección natural a través de la cara horizontal inferior	0.0033533	6
F	Convección natural a través de la cara horizontal superior	0.0029455	5
G	Radiación	0.024658	31

Tabla 3.8 Aportación a la transferencia de calor total de cada uno de los fenómenos involucrados.

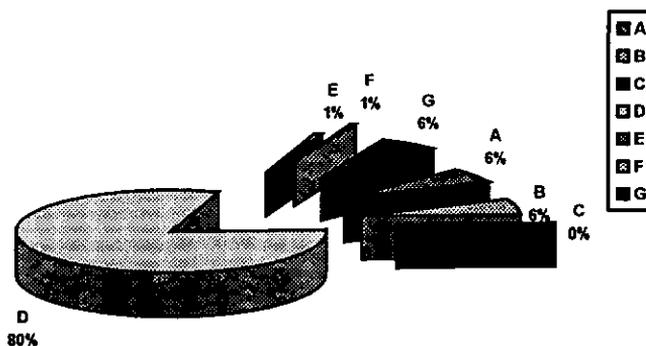


Figura 3.18 Distribución de los porcentajes de transferencia de calor en el elemento de actuación.

CASO 2 SECCIÓN TRANSVERSAL CIRCULAR EQUIVALENTE.

El caso que se considera circular la sección transversal del elemento de actuación, el proceso se simplifica enormemente. Sin embargo vale la pena resaltar las siguientes limitaciones :

1. Los esquemas investigados para el cálculo de la transferencia de calor forzada contemplan solo flujo en dirección radial, si se tienen otras condiciones de flujo solo es posible esperar resultados aproximados,
2. En la mayoría de los casos se consideran los elementos de longitud infinita. Sin embargo en este caso específico esto no se cumple,
3. En todos los esquemas se consideran los alrededores de los elementos tan lejos que su influencia en la velocidad del medio sea despreciable, en este caso no se da así,

Para esta geometría el número de Nusselt está dado por :

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4}$$

3.3.30

Para intervalos del número de Prantl entre 0.7 y 500 y entre 1 y 10^6 del número Reynolds.

Para la ecuación 3.3.30 el número de Reynolds está dado por :

$$Re_D = \frac{VD}{\nu}$$

3.3.31

Los valores de C y m se presentan en la tabla 3.9

Re_D	C	m
0.4-4	0.989	0.33
4-40	0.911	0.385
40-4000	0.683	0.466
4000-40,000	0.193	0.618
40,000-400,000	0.027	0.805

Tabla 3.9 Valores de las constante C y m utilizadas en la ecuación 3.3.30

Adicionalmente

Si $Pr \leq 10$ entonces $n = 0.37$

Si $Pr > 10$ entonces $n = 0.36$

Este esquema interactuó con la cinemática del robot es decir es necesario definir los puntos extremos de la trayectoria y el tiempo que tardará en completar el recorrido, con ello se obtiene los valores de la velocidad relativa de los elementos de actuación con respecto al medio y por ende los coeficientes de transferencia de calor necesario. La tabla 3.10 muestra los valores obtenidos para la transferencia de calor que se sucede al mover el manipulador del punto A al B tal como se muestra en la figura 3.6 para una temperatura ambiente constante y una temperatura del actuador de 20° C a 137° C

T. Ambiente (°C)	T. Actuador (°C)	Convección (W)	Radiación (W)	Total (W)
2.400e+1	2.000e+1	0.000e+0	0.000e+0	0.000e+0
2.400e+1	3.300e+1	2.880e+0	1.135e-1	2.993e+0
2.400e+1	4.600e+1	7.040e+0	2.960e-1	7.336e+0
2.400e+1	5.900e+1	1.120e+1	5.023e-1	1.170e+1
2.400e+1	7.200e+1	1.536e+1	7.343e-1	1.609e+1
2.400e+1	8.500e+1	1.961e+1	9.940e-1	2.060e+1
2.400e+1	9.800e+1	2.378e+1	1.284e+0	2.507e+1
2.400e+1	1.110e+2	2.796e+1	1.605e+0	2.957e+1
2.400e+1	1.240e+2	3.214e+1	1.961e+0	3.410e+1
2.400e+1	1.370e+2	3.640e+1	2.354e+0	3.875e+1

Figura 3.10. Valores del calor transferido por el elemento de actuación al medio.

Para distintas temperaturas del elemento y temperatura del medio constante

3.4.2 MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR (SEGUNDA APROXIMACIÓN)

El sistema cuyo comportamiento se pretende describir, dista mucho de ser lo que se planteo en la sección anterior (primera aproximación). En este primer intento por describir el comportamiento se hicieron consideraciones que van desde las triviales, hasta las de gran trascendencia. A continuación se explica a detalle cada una de estas suposiciones y las consecuencias que el considerarlas trajo consigo.

En primer lugar, el sistema no se encuentra en estado permanente, por el contrario, las condiciones de este varían fuertemente con el tiempo. En consecuencia se tendrá una ecuación diferencial cuya variable dependiente será la temperatura superficial del objeto con el tiempo como variable independiente.

En segundo término, las consideraciones geométricas de los elementos que toman parte en los procesos de conducción de calor, distan mucho de la realidad, sin embargo, por tratarse de volúmenes muy pequeños los gradientes de temperatura no son muy grandes permitiendo que las simplificaciones geométricas arrojen resultados aceptables. Por lo tanto, no se considera necesario hacer ajustes en este aspecto.

En tercer lugar, las propiedades de la aleación con memoria de forma, varían sustancialmente con la temperatura, por desgracia este cambio no es el que habitualmente presentan los materiales ordinarios, sino que es una consecuencia de la transformación de fase que se está llevando a cabo. Además existe una absorción de la energía para producir el cambio de fase, generada por efecto Joule. Esta energía no se manifiesta en el aumento de la temperatura pero ya que es factible de medir, se utilizarán datos obtenidos en la literatura para incluir este fenómeno como un término algebraico independiente en el modelo matemático.

Otro fenómeno interesante lo encontramos al tratar de encontrar la potencia eléctrica suministrada al elemento. La resistividad de la aleación con memoria de forma varía grandemente conforme se desarrolla la transformación de fase. Cada fase tiene una determinada resistividad por lo que la resistividad total será una combinación de esta propiedad para cada uno de las fases. Lo mismo ocurre con la capacidad térmica específica.

Por último, las ecuaciones que se utilizaron para obtener los coeficientes de transferencia de calor por convección son aplicables solo en ciertos casos. Un ejemplo muy claro, lo tenemos en la ecuación aplicable al caso de una cara superior en enfriamiento. Si la inclinación de la cara varía, la ecuación utilizada pierde validez. Por lo que respecta a la cara inferior en enfriamiento, solo basta multiplicar la ecuación por el coseno del ángulo que forma dicha cara con la horizontal, sin embargo aquí también se presentan restricciones debido a que es limitado el intervalo de inclinación al que se puede encontrar la placa.

La ecuación que describe el comportamiento del sistema en estado no permanente es muy semejante a la ecuación 3.3.1 con la diferencia de que el término del cambio en la energía interna

del material debe ser agregado. Es entonces cuando la ecuación 3.3.1 pasa de ser una ecuación algebraica de relativamente fácil solución a ser una ecuación diferencial no lineal de solución muy complicada. Así pues la ecuación que resulta es la que se muestra enseguida.

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{st}}{dt} \quad 3.3.32$$

Donde E_{st} es la energía interna del material que es función de la temperatura a la que se encuentra el mismo. No es común calcular la energía interna para un instante determinado, mas bien se obtienen diferencias de energía interna que se expresan como función de una diferencia de temperaturas. La expresión que permite calcular la variación de energía interna está dada por la ecuación 3.3.33

$$\frac{dE_{st}}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho V c T) \quad 3.3.32$$

Donde:

- ρ Densidad
- V Volumen
- c Calor específico o capacidad térmica específica
- T Temperatura

E_{in} tiene un valor nulo, ya que la única energía que entra al sistema es a través de radiación de los alrededores al elemento de actuación, pero ésta se incluye en la energía de salida al considerar a la aleación como un cuerpo gris.

E_g Es aquella debida al efecto Joule que está dada por la fórmula 3.3.27

E_{sal} Es la energía que pierde el elemento de actuación a través de los mecanismos de transferencia de calor antes mencionados.

El término de la energía generada es muy sencillo además de haber sido ya explicado con anterioridad. La atención debe fijarse en el término de la energía disipada, que como se vio, involucra tres mecanismos y seis términos en total. La ecuación 3.3.32 expresa la energía disipada en función de los procesos involucrados.

$$E_{sal} = A_1 \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot1}} + A_2 \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot2}} + \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot3}} + A_4 \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot4}} + A_5 \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot5}} + A_6 \frac{T_s - T_\infty}{R_{Tot6}}$$

3.3.33

Donde a su vez

$$R_{Tot1} = \frac{L_{Ny}}{k_{Ny}} + \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{1}{h_1}$$

$$R_{Tot2} = \frac{L_{Al}}{k_{Al}} + \frac{1}{h_1}$$

$$R_{Tot3} = \frac{L \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2\pi L k_f}$$

$$R_{Tot4} = \frac{1}{h_2}$$

$$R_{Tot5} = \frac{1}{h_1}$$

$$R_{Tot6} = \frac{1}{h_3}$$

T_s Temperatura de la superficie del elemento de actuación

T_∞ Temperatura del aire circundante

Al final de una manipulación algebraica podemos escribir la ecuación 3.3.33 de la siguiente manera:

$$\frac{dT_s}{dt} = \alpha T_s^4 + \beta T_s + \gamma$$

Donde:

$$\alpha = A_7 \varepsilon \sigma$$

$$\beta = \frac{A_1}{R_{Tot1}} + \frac{A_2}{R_{Tot2}} + \frac{1}{R_{Tot3}} + \frac{A_4}{R_{Tot4}} + \frac{A_5}{R_{Tot5}} + \frac{A_6}{R_{Tot6}}$$

$$\gamma = -T_{\infty} \left(\frac{A_1}{R_{Tot1}} + \frac{A_2}{R_{Tot2}} + \frac{1}{R_{Tot3}} + \frac{A_4}{R_{Tot4}} + \frac{A_5}{R_{Tot5}} + \frac{A_6}{R_{Tot6}} \right)$$

Solo con el fin de facilitar los cálculos se muestra a continuación una tabla con los valores de las R_{tot} y las áreas respectivas.

n	R_{tot} (unidades variables)	Área $\times 10^6$ (m^2)
1	5.05×10^{-2}	15.875
2	4.9671×10^{-2}	15.875
3	1750	
4	1.74×10^{-2}	75
5	4.966×10^{-2}	15
6	0.993	75
7		180

Así tenemos que los valores de α , β y γ son:

$$\alpha = 28.35 \times 10^{-9}$$

$$\beta = 5.881 \times 10^{-3}$$

$$\gamma = 5.8810 \times 10^{-9}$$

La ecuación 3.3.33 es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden **no lineal**, la cual es posible de resolver debido a que la no linealidad de la ecuación se presenta en la parte inhomogénea de la ecuación⁷. Las condiciones iniciales para esta ecuación son $T_s(0) = 293.15$ (20°C). La solución de la ecuación diferencial se puede obtener por medio de separación de variables por cumplir con las condiciones necesarias para aplicar el método⁸

La ecuación 3.3.33 se puede arreglar de la forma:

$$\frac{T_s^4}{\alpha T_s^4 + \beta T_s + \gamma} = 1$$

3.3.35

La ecuación 3.3.35 tienen la forma necesaria que permite la separación de variables quedando así:

$$\frac{dT_s}{(\alpha T_s^4 + \beta T_s + \gamma)} = dt$$

La integración del término de la izquierda es difícil, debido a que se presenta un polinomio de grado 4 en el denominador. Para este caso en especial no es posible utilizar la técnica de fracciones parciales, y la transformada de Laplace aunque exige conocer los valores de derivadas de orden superior para el instante $t=0$. Por lo tanto los métodos numéricos constituyen una buena respuesta al problema de encontrar la solución de esta ecuación diferencial. En especial se eligió el método de Runge Kutta por su exactitud y sencillez.

Como nota de este capítulo vale la pena recalcar que los modelos aquí mostrados no son los únicos que se pueden desarrollar, pero sí los más importantes y básicos para la realización del proyecto. Así mismo, la utilidad tanto de estos como del programa que los resuelve hace que la labor de diseño sea más formal y acelerada, al permitirse la variación en el software adjunto de una gran cantidad de parámetros.

⁷ En ecuaciones diferenciales, la parte inhomogénea es aquella que no incluye al operador diferencial

⁸ Ver: Voice-Diprima "Introducción a las Ecuaciones Diferenciales" ed. Limusa Capítulo 2

FALTA PAGINA

No. 97

Capítulo 4

Construcción del Chasis del Gripper

4.1 PRELIMINARES

Una vez que se han desarrollado los modelos matemáticos pertinentes, el siguiente paso es aterrizar los resultados obtenidos al diseño del dispositivo a diseñar. Desde un principio surgieron dos opciones: una de seis y otra de ocho grados de libertad, de tres y cuatro dedos respectivamente. A pesar de que ambas opciones parecían en un principio igualmente fiables desde un punto de vista puramente funcional, la de seis grados de libertad involucra una menor complejidad en el diseño y el control.

Sin embargo la alternativa de ocho grados de libertad era demasiado tentadora para despreciarla por simple intuición, por ello se decidió evaluar teóricamente el desempeño de los dispositivos por medio del análisis de las fuerzas necesarias para sujetar un objeto en condiciones críticas, es decir, cuando la mayoría de las fuerzas aplicadas tengan componente vertical hacia abajo, lo que ocasionaría que el objeto tendiera a caer.

Como en todos los análisis, se deben dejar claras las suposiciones realizadas:

Suposiciones

- 1.- Los puntos de aplicación de las fuerzas sobre el objeto, se encuentran todos contenidos en el mismo plano horizontal.
- 2.- Las componentes de todas las fuerzas sobre este plano, convergen en un mismo punto.
- 3.- La línea de acción del peso del cuerpo a sujetar (concentrado en su centro de gravedad) pasan por el punto de convergencia mencionado.
- 4.- Las fuerzas de fricción ejercidas sobre el cuerpo, tienen componente sobre el plano horizontal, en la misma dirección que las fuerzas que las producen.

Es muy importante destacar que la función de este modelo matemático es proveer herramientas que permitan la selección adecuada entre las dos opciones de diseño (seis u ocho grados de libertad) y por ello su precisión para predecir la realidad no necesita ser grande. También es necesario hacer notar las discrepancias entre la realidad y las suposiciones hechas.

1.- Los puntos de aplicación de las fuerzas sobre el objeto, no necesariamente se encuentran contenidos en un mismo plano horizontal. Dependerá de los dispositivos que intervengan en el posicionamiento de los dedos, el que se cumpla o no esta suposición.

2.- Aún cuando el movimiento de los dedos converja hacia un mismo punto, no se garantiza que las fuerzas que éstos aplican sobre el objeto a sujetar también converjan. La razón para hacer esta suposición es la de simplificar las ecuaciones de momento de las fuerzas, ya que al tener todas las componentes horizontales convergiendo hacia un mismo punto, todas ellas tendrán momento igual a cero con respecto a dicho punto. La probabilidad de que esto ocurra, dependerá en gran medida de la forma del objeto, por ejemplo objetos que tengan secciones horizontales circulares cumplirán con esta suposición si son correctamente sujetos.

3.- No existe ninguna razón para que la línea de acción del peso pase por el punto de convergencia ya de por si ideal. La razón de esta suposición es eliminar el momento que el peso del cuerpo provocará al tomar suma de momento con respecto al punto de convergencia.

4.- Esta es la más real de todas, pero puede no cumplirse para objetos de forma muy caprichosa o en casos de mala sujeción.

4.1.1 CASO UNO SEIS GRADOS DE LIBERTAD.

La Figura 4.1 muestra las fuerzas actuantes (exceptuando las de fricción por simplicidad del dibujo) para el caso de 6 grados de libertad.

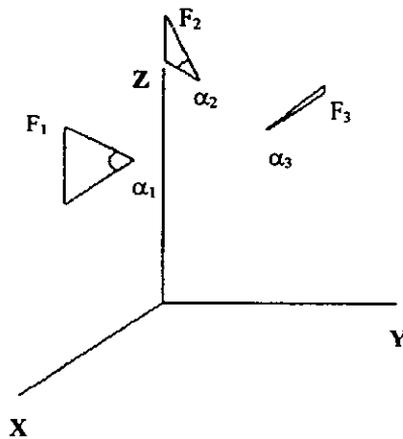


Figura 4.1 Fuerzas actuantes sobre un objeto en condiciones críticas en el espacio.

Solo se muestran las fuerzas activas

El ángulo α_i es aquel que forma la fuerza con el plano horizontal, y por ende será el que permita obtener su proyección sobre dicho plano. Una vez aclarado esto, se muestra un diagrama de cuerpo libre visto en el plano horizontal.

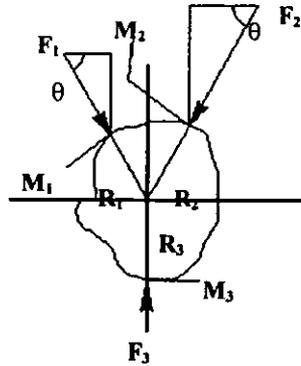


Figura 4. 2 Proyección en el plano X-Y de las fuerzas actuantes sobre un objeto durante la sujeción.
Solo se muestran las fuerzas activas

Considerando que el cuerpo está en condiciones de equilibrio estático se deben cumplir las siguientes ecuaciones vectoriales:

$$\sum \vec{F} = 0$$

$$\sum \vec{M}_0 = 0$$

Como se trata de un problema en el espacio, de cada una de las anteriores ecuaciones vectoriales se derivan tres ecuaciones escalares por lo que se tiene un sistema de un máximo de 6 ecuaciones con seis incógnitas. Aún cuando el número de variables es mucho mayor que seis, se pueden fijar algunas de ellas mientras se varían una o dos de las restantes y observar el comportamiento de sistema de fuerzas.

Para este caso en particular, las ecuaciones escalares correspondientes a la sumatoria de fuerzas quedan:

$$\sum F_x = F_1(\cos\theta(\sin\alpha_1 + \mu \sin\beta_1)) - F_2(\cos\theta(\sin\alpha_2 + \mu \sin\beta_2)) = 0$$

4.1.1

$$\sum F_y = -F_1(\text{sen}\theta(\text{sen}\alpha_1 + \mu \text{sen}\beta_1)) - F_2(\text{sen}\theta(\text{sen}\alpha_2 + \mu \text{sen}\beta_2)) + F_3 \text{sen}\theta(\text{sen}\alpha_3 + \mu \text{sen}\beta_3) = 0$$

4.1.2

$$\sum F_z = F_1(\mu \cos\beta_1 - \cos\alpha_1) + F_2(\mu \cos\beta_2 - \cos\alpha_2) + F_3(\mu \cos\beta_3 - \cos\alpha_3) = W$$

4.1.3

Por lo que respecta a la suma de momentos tenemos:

$$\sum M_o^x = F_1 \cos\beta_1 \mu r_1 (\cos\theta_1 + \text{sen}\theta_1) + F_2 \mu \cos\beta_2 r_2 (\text{sen}\theta_1 - \cos\theta_1) - F_3 \mu \cos\beta_3 r_3 = 0$$

4.1.4

$$\sum M_o^y = F_1 \cos\alpha_1 r_1 (-\cos\theta_1 - \text{sen}\theta_1) + F_2 \cos\alpha_2 r_2 (-\text{sen}\theta_1 + \cos\theta_1) + F_3 \cos\alpha_3 r_3 = 0$$

4.1.5

Debido a que se tendrán solo 3 incógnitas, aparentemente bastará con utilizar las tres primeras ecuaciones; sin embargo, en los dos últimas aparece un término que no se incluye en las primeras y por ende para considerar su influencia, deberán sumarse las dos últimas ecuaciones término a término con cualesquiera de las tres primeras.

Así se tiene un sistema lineal de tres ecuaciones con tres incógnitas, el cuál se puede expresar de manera matricial como se indica:

$$A\vec{X} = \vec{B}$$

Donde A es la matriz de coeficientes \vec{X} y \vec{B} son el vector de incógnitas y el vector de términos independientes respectivamente. Como es sabido, un sistema de esta naturaleza tiene como solución:

$$\vec{X} = \vec{B}A^{-1}$$

La solución de esta ecuación matricial, se realizó con ayuda de un programa de computadora. Las fuerzas F_i son las incógnitas del sistema y se varían en un intervalo que se muestra a continuación las demás variables.

$$0 < \alpha_i < 90^\circ$$

$$0 < \theta < 90^\circ$$

$$.0025 < r_i < 0.075 \text{ (m)}$$

Los resultados con más detalle se pueden observar en el programa, pero a continuación se hace una análisis de los mismos.

4.1.2 CASO DOS OCHO GRADOS DE LIBERTAD

Al igual que en el caso anterior, a continuación se muestra un diagrama en el que se hayan representadas las fuerzas que sobre un objeto actúan al ser éste sujeto.

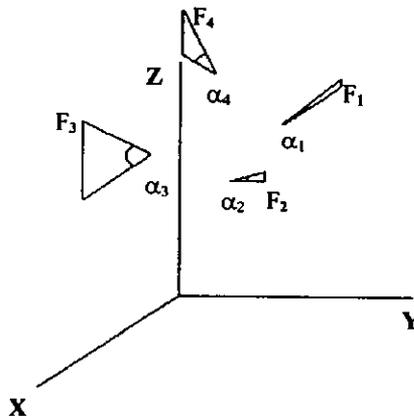


Figura 4. 3 Fuerzas actuantes sobre un objeto durante la sujeción en el espacio.

Solo se muestran las fuerzas activas.

Al igual que en el caso anterior, no se representan las fuerzas de fricción con el único de fin de simplificar el dibujo, así mismo las suposiciones son las mismas que para el caso de 6 grados de libertad.

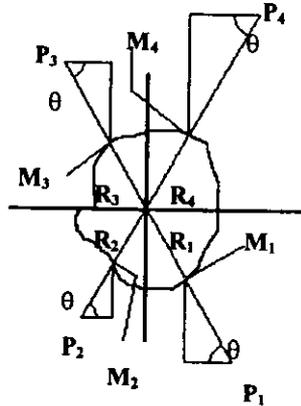


Figura 4. 4 Proyección en el plano X-Y de las fuerzas actuantes sobre un objeto durante la sujeción.
Solo se muestran las fuerzas activas

Con el fin de evitar redundancia se muestran directamente las ecuaciones escalares derivadas del análisis estático del objeto.

$$\sum F_x = F_1 c \theta_1 (s \alpha_1 + \mu s \beta_1) - F_2 c \theta_1 (s \alpha_2 + \mu s \beta_2) - F_3 c \theta_2 (s \alpha_3 + \mu s \beta_3) + F_4 c \theta_2 (s \alpha_4 + \mu s \beta_4) = 0 \tag{4.1.6}$$

$$\sum F_y = -F_1 s \theta_1 (s \alpha_1 + \mu s \beta_1) - F_2 s \theta_1 (s \alpha_2 + \mu s \beta_2) + F_3 s \theta_2 (s \alpha_3 + \mu s \beta_3) + F_4 s \theta_2 (s \alpha_4 + \mu s \beta_4) = 0 \tag{4.1.7}$$

$$\sum F_z = -F_1 s \theta_1 (s \alpha_1 + \mu s \beta_1) - F_2 s \theta_1 (s \alpha_2 + \mu s \beta_2) + F_3 s \theta_2 (s \alpha_3 + \mu s \beta_3) + F_4 s \theta_2 (s \alpha_4 + \mu s \beta_4) = 0 \tag{4.1.8}$$

Por lo que respecta a las ecuaciones de momento tenemos:

$$\sum M_o^x = -F_1 s \alpha_1 r_1 (s \theta_1 + c \theta_1) + F_2 s \alpha_2 r_2 (c \theta_1 - s \theta_1) + F_3 s \alpha_3 r_3 (s \theta_2 + c \theta_2) + F_4 s \alpha_4 r_4 (s \theta_2 - c \theta_2)$$

4.1.9

$$\sum M_o^x = -F_1 s \alpha_1 r_1 (s \theta_1 + c \theta_1) + F_2 s \alpha_2 r_2 (c \theta_1 - s \theta_1) + F_3 s \alpha_3 r_3 (s \theta_2 + c \theta_2) + F_4 s \alpha_4 r_4 (s \theta_2 - c \theta_2)$$

4.1.10

Esto da como resultado un sistema de cinco ecuaciones con cuatro incógnitas, por lo que será necesario hacer una suma miembro a miembro de cualesquiera dos ecuaciones.

El sistema resultante puede ser expresado de forma matricial como sigue:

$$A \vec{X} = \vec{B}$$

Donde A de 4x4 es la matriz de coeficientes, B es el vector de incógnitas y X es el vector de términos independientes. Como es sabido, la solución de este sistema es:

$$\vec{X} = \vec{B} A^{-1}$$

La solución de este sistema se programó en computadora, con el fin de obtener de una manera rápida los valores de las fuerzas, pudiendo variar parámetros de diseño como lo es θ o de operación como lo es a . Los resultados detallados se pueden obtener ejecutando el programa *programas-analisis_dinamico_F(x,y)*, el análisis de éstos datos se trata a continuación.

En base a los resultados obtenidos, se optó finalmente por la opción de 8 grados de libertad, pese a las complicaciones en su diseño. De los resultados obtenidos por el análisis se obtuvieron las características que se enumeran a continuación. Sin embargo vale la pena decir que éstas no pudieron ser aplicadas por cuestiones relacionadas con la manufactura. Es aquí donde se separa la teoría de la práctica, al no poder concretar los resultados arrojados por los modelos matemáticos.

4.2 DISEÑO

Todo proceso de diseño involucra el planteamiento de distintas alternativas en varias de las etapas del mismo. Las distintas alternativas surgen alrededor de los problemas más significativos, para este caso en particular, los problemas a resolver se enlistan a continuación.

- 1.- Enfriamiento del elemento de actuación (educado con el doble efecto memoria de forma) en el menor tiempo posible,
- 2.- Sujeción del elemento de actuación con los dedos del gripper,
- 3.- Fijación (de haberla) del sistema de enfriamiento,
- 4.- Sujeción de la primer falange de cada dedo con el cuerpo de la mano,
- 5.- Orientación del plano de desplazamiento de los dedos con respecto al cuerpo de la mano,
- 6.- Articulación entre los eslabones de cada dedo,
- 8.- Material óptimo para los dedos,
- 9.- Material óptimo para el cuerpo de la mano,
- 10.- Proceso de fabricación para cada uno de los componentes

4.2.1 LOS DEDOS

ARQUITECTURA

El primer problema a atacar fue el de la arquitectura del los dedos que permitieran un enfriamiento óptimo de los elementos de actuación. En casi todos ellos, el común denominador es el intento de integrar un sistema que conduzca aire a presión para el enfriamiento del elemento de actuación.

La figura (4.1.1) muestra una de las opciones de diseño. Posteriormente se mencionaran las ventajas y las desventajas de cada uno de los sistemas, así como la posibilidad de los mismos de ser maquinados.

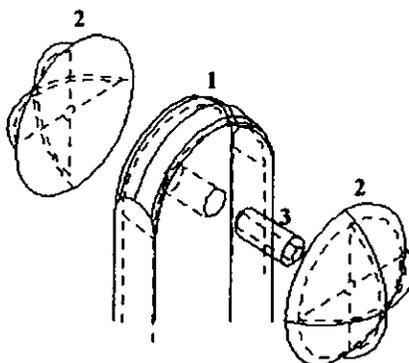


Figura 4.5 Arquitectura de la articulación.

Esta configuración permitiría la conducción de aire a través de elementos huecos.

La figura muestra una opción pensada para proveer circulación de aire al elemento de actuación: Específicamente se muestra la articulación compuesta principalmente de 3 elementos. Este diseño involucraba construir los elementos indicados numero 2 como una cavidad hueca por la que se conduciría el aire hasta el elemento 1 esto a través de un perno de unión también hueco (3)..

Las ventajas de este sistema pudiesen ser muchas, pero existe una dificultad: los elementos de la articulación deberían ser manufacturados por un proceso de fundición, ya que sería imposible hacerlo por medio de mecanizado.

Otra opción que se presento para la articulación es la que se muestra en la figura (4.2.2). El problema que presenta esta opción es que la paredes verticales planas de la articulación (1,2) que no distribuyen las cargas laterales y pueden ocasionar una ruptura en a lo largo de la línea de mecanizado¹

Muchas otras opciones se contemplaron; entre ellas, dispositivos de enfriamiento del elemento de actuación, sin embargo, fueron descartadas por su complejidad ya sea en su manufactura o en su ensamblado, o bien porque aportaban rigidez excesiva y elevado peso a la

¹ Las líneas de mecanizado son las fronteras de las superficies de mecanizado, a su vez, esta se define como la superficie que genera una herramienta de corte al remover material de una pieza.

articulación. La opción que pareció ajustarse mejor a las necesidades y posibilidades de manufactura fue la que se muestra en la figura (4.2.3)

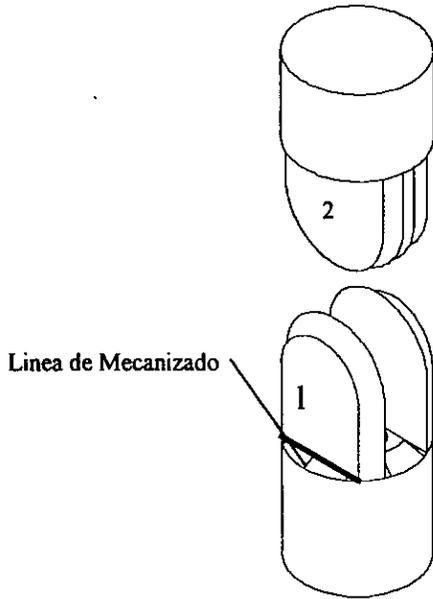


Figura 4.6 Arquitectura de la articulación. Segunda opción

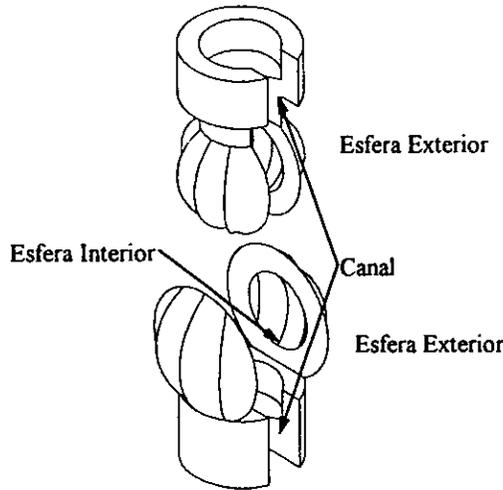


Figura. 4.7 Arquitectura de la articulación configuración definitiva.

Los planos de detalle, así como los de fabricación de cada uno de los dedos se muestran en el apéndice A

Manufactura

Para la manufactura de las piezas se presentaron dos alternativas en cuanto al equipo a utilizar se refiere: utilizar máquinas convencionales o máquinas de control numérico computarizado (CNC). La decisión no fue muy difícil de tomar, basta con reflexionar en las ventajas que ofrecen cada uno de los dos tipos de equipos, y que se enumeran a continuación:

Ventajas.

Máquinas Convencionales

- 1.- Costo de operación reducido,
- 2.- Facilidad de acceso (es fácil encontrar este tipo de equipos),
- 3.- Corrección rápida de errores,
- 4.- Facilidad para sujetar diámetros diversos de piezas en bruto.

Maquinas CNC

- 1.- Elevada precisión,
- 2.- Elevada repetitividad
- 3.- Permite el montaje múltiple de herramientas
- 4.- Permite generar trayectoria curvas de la herramienta sin necesidad de adaptar dispositivos especiales
- 5.- Cuenta con interface con sistemas CAD/CAM,
- 6.- Requiere poca supervisión por parte del operario,
- 7.- Tiempo reducido de mecanizado.

Desventajas

Maquinas Convencionales

- 1.- Requieren de herramental especial para la generación de trayectorias curvas de la herramienta,
- 2.- Baja precisión,
- 3.- Poca repetitividad,
- 4.- Mayor tiempo de mecanizado, (fuertemente dependiente del operario)
- 5.- Requiere de la atención permanente de un operario

Máquinas CNC

- 1.- Pueden requerir de la manufactura de boquillas para la sujeción tanto de herramientas como de piezas en bruto.
- 2.- Retarda la detección de errores de precisión hasta el retiro de la pieza,
- 3.- Elevado costo de operación

A las desventajas de las máquinas convencionales, hay que agregar aquellas que padecen las máquinas con las que se cuenta para este caso en particular, a saber el excesivo juego que presenta los diales en todos los carros, el huelgo en la sujeción de las herramientas, la falta de coincidencia del eje del husillo con el del punto embalado, el juego en la rotación del husillo, etc.

Esto no solo resta precisión en el mecanizado de las piezas, sino que aumenta el tiempo que las piezas permanecen en las máquinas.

Adicionalmente, la esfera interior sería muy difícil de maquinar, siendo necesaria la construcción del herramienta generador de esferas correspondiente. Esta dificultad se salva por completo si se utilizan los tornos de control numérico computarizado, ya que la trayectoria que genera las superficies esféricas se obtiene por medio del movimiento simultáneo de los carros transversal y longitudinal, permaneciendo los ejes principales de la herramienta con la misma orientación en el espacio.

Además la elevada precisión del torno y su repetitividad permite obtener piezas casi totalmente idénticas, en poco tiempo. Por si fuera poco, el acabado obtenido en este tipo de máquinas es superior al que se obtienen en máquinas convencionales debido principalmente a que las máquinas CNC son capaces de mantener constante la velocidad de corte durante cualquier operación². En este tipo de dispositivos, el acabado depende en gran parte de la correcta selección de los parámetros de corte (Velocidad de corte, profundidad de corte, avance, etc.).

Equipo Utilizado

Una vez que se ha tomado la decisión de usar máquinas de control numérico para el mecanizado de las piezas, es necesario analizar las dos opciones que se tienen para ello. Vale la pena mencionar en este punto, que la manufactura de cada pieza involucra una operación en el torno y tres operaciones en máquina fresadora. En el laboratorio se cuenta con dos modelos de torno; estos son el EMCO TURN 242 y el EMCO 120; así mismo son dos los modelos de máquina fresadora³ que se encuentran disponibles, el VMC 300 y el VMC 100. Existen además de los mencionados modelos de máquina herramienta, otros tres que no se tomaron en cuenta por su pequeñísimo volumen de trabajo, estos son el EMCO Compact 5 CNC y el EMCO PC Turn 50, ambos para torneado, y el EMCO F1 CNC para operaciones de fresado.

² La velocidad de corte V_c está dada por: $V_c = \pi ND/60$ donde N es el número de revoluciones por minuto y D el diámetro sobre el que se pretende tomar la velocidad. Si despejamos N de la fórmula anterior tenemos: $N = 60V_c/\pi D$ Si pretendemos disminuir el diámetro hasta cero la velocidad angular se dispara a infinito. Es por ello que se requiere de controlar dicha velocidad angular.

³ Las máquinas fresadoras de control numérico computarizado que tienen dispositivos para alojar una gran cantidad de herramientas, y que poseen una gran volumen de trabajo reciben el nombre de centros de maquinado.

Un paso obligado en la selección de una máquina para una operación específica es la potencia de los motores, que debe ser la suficiente para procurar el correcto arranque de la viruta, además de compensar la pérdidas por calor que durante el proceso de corte se producen. Esta potencia es función directa de las propiedades del material. Para este caso en particular, el material seleccionado fue el Nylamid LS⁴, sin embargo, por el precio de este material en específico se realizaron pruebas en aluminio para saber si se alcanzaban las tolerancias necesarias.

A continuación se muestra una tabla con las características de cada una de la máquinas mencionadas como posibles alternativas.

Máquina	Potencia en el eje del husillo (kW)	Potencia en los ejes de posicionamiento (HP)
EMCO Turn 120	0.7	0.7
EMCO Turn 242		
EMCO VMC 100	0.7	0.7
EMCO VMC 300		

Tabla 4.2.1 Datos técnicos de las máquinas CNC accesibles

Pieza en bruto.

Para nuestro caso la pieza de mayor longitud es la falange superior de los dedos frontales con una extensión total de 67.47 mm. Además de ser la pieza de mayor longitud, durante su mecanizado en el torno se presenta la condición más crítica de acercamiento del portaherramientas de la herramienta activa con el husillo. La figura 4.2.4 muestra la las medidas que se tomaron en cuenta para obtener las dimensiones de la pieza en bruto.

⁴ La justificación para la selección de este material se da más adelante en este capítulo.

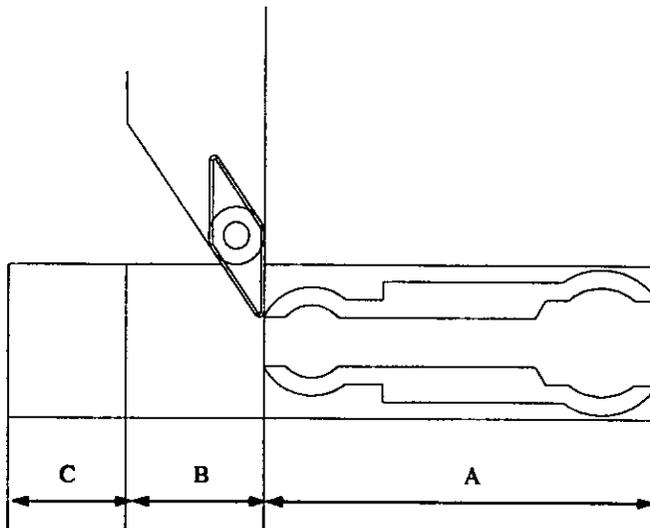


Figura 4.2.4 Dimensiones necesarias para la obtención de la longitud de la pieza en bruto

Donde:

A Es la longitud de la pieza terminada

B Es la distancia del filo del corte al extremo opuesto del portaherramientas correspondiente

C Es la distancia mínima necesaria para la sujeción de la pieza (en boquilla)

Para este caso en particular $A=67.47$ mm, $B=23.74$ mm y $C=20.0$ mm. con lo que se tiene un largo de pieza total de 111.21. Con esta longitud, se garantiza un maquinado correcto de la pieza, sin embargo por salud mental del operario, se recomienda dejar de 5 a 10 mm de excedente, debido a los acercamientos que tendrá la herramienta al husillo principal. El volumen de trabajo mínimo

es pues:

- 1.- Volteo 1 pulgada (25.4 mm)
- 2.- Distancia entre puntos (111.21 mm)
- 3.- Desplazamiento del carro longitudinal (111.21 mm)
- 4.- Desplazamiento del carro transversal 1/2 pulgada (12.7 mm)

A continuación se muestra

Tanto el equipo EMCO Turn 242 como el Emco 120 tienen un volumen de trabajo superior al obtenido, sin embargo, existe otro problema: el mecanizado de la esfera interior demanda un desplazamiento en la dirección transversal que hace que el cabezal portaherramientas del torno EMCO 120 choque con el carro del contrapunto. Esta dificultad no se pudo salvar, por lo que fue necesario utilizar el torno EMCO Turn 242 para el mecanizado de las piezas.

4.2.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

Un paso muy importante en el proceso de diseño es la selección de materiales. esta selección debe satisfacer una serie de requisitos tanto del diseño mismo como de la operación; tomando en consideración las fuerzas que estarán presentes en el dispositivo, ambiente circundante, proceso de conformado, condiciones de vibración, toxicidad de material, etc. Las propiedades de un material pueden clasificarse básicamente en dos grupos: propiedades físicas y propiedades químicas.

A estas propiedades se pueden agregar características que son útiles para la selección de materiales como el costo y la disponibilidad en el mercado. En general, casi cualquier propiedad de un material será útil en un momento determinado. Para nuestro caso en particular se buscó un material de poco peso que nos proporcionara una elevada resistencia eléctrica con el fin de complicar el diseño con los aislamientos. Los materiales plásticos presenta estas dos características pero; adicionalmente, el plástico seleccionado debería de poseer un elevado punto de fusión, además de no presentar deformaciones considerables debidas a la expansión térmica, en resumen,

que tenga una temperatura de trabajo superior a los 60° que es la temperatura de transformación de material.

Debido a que el proceso óptimo de conformado de las piezas resulto ser el mecanizado⁵ es también indispensable que el plástico que se seleccione posea una alta maquinabilidad, es decir, que facilite la remoción de material en forma de viruta y que permita obtener buenos acabados superficiales y tolerancias cerradas. No será útil ningún polímero que requiera de su conformado en fase líquida, ya que esto requeriría de uso de moldes.

Existen muchos plásticos actualmente en el mercado, todos ellos diseñados especialmente para un uso específico. Toda esta gama de plásticos se pueden clasificar en dos grandes grupos de acuerdo a la propiedad de material de mantener una estabilidad dimensional y de forma al incrementarse la temperatura.

Los plásticos termofijos constituyen una buena opción ya que al no cambiar de fase con la temperatura, el inevitable incremento de la temperatura durante el maquinado no alterara la tolerancia dimensional. Los termoplásticos fueron descartados por el hecho de que su conformado suele hacerse en fase líquida a través de moldes, lo cual complicaba mucho la tarea de manufactura.

Por todo lo anteriormente expuesto se decidió seleccionar al Nylamid LS para la construcción de los dedos, por sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas. En la siguiente sección se detalla el maquinado de todos los elementos que forman parte del sistema.

4.2.3 MAQUINADO DE LAS PIEZAS

Todas las piezas que conforman el órgano terminal y que requieren de un proceso de conformado, fueron fabricadas por medio de mecanizado. Estos elementos serán tratados en el orden en que fueron hechos. Para cada uno, se presentarán los esquemas, dibujos y planos que sean pertinentes además de la selección de herramientas, los dispositivos de sujeción empleados y por supuesto, los programas de control numérico con los que se maquinaron.

Los dedos constituyen la parte más importante del órgano terminal, por el número de elementos que en ellos se alojarán. Los elementos de actuación, el sistema de enfriamiento y los

⁵ La justificación de esto se verá más adelante.

sensores de contacto. Además de ellos dependerá aspectos como la precisión y la repetitibilidad del dispositivo, además de constituir la parte del sistema que posee movimiento relativo. Se describe el procedimiento para el maquinado en el torno y en la máquina fresadora por separado.

Torno.

El material empleado fue el Nylamid LS que se adquiere en presentación de 1"x24" nominal. Por políticas de la empresa que lo produce, la barra no tiene en realidad 1" de diámetro, estas se fabrican con un excedente que debe ser removido para su introducción en la boquilla del torno Emco Turn 242. Por ello es preciso primero rebajar las barras al diámetro de 25.4 mm ± 0.1 mm en tornos convencionales que por contar con chuck universal no presentan problemas para la sujeción de la barra.

Herramental

Herramental Utilizado Adquirido

La tabla (4.2.2) muestra las herramientas y portaherramientas utilizados en el mecanizado de los dedos. Cuando así lo amerita, se muestra el código de pedido del fabricante (para las pastillas y portapastillas).

Artículo	Tipo	Código del fabricante	Descripción
1	Pastilla (inserto)	T-MAX U VBMT-UM 235	Pastilla de 35° para acabado con recubrimiento de Nitruro de Titanio
2	Pastilla (inserto)	T-MAX Qcut 330.20-4-AA GC235	Pastilla para tronzar con recubrimiento de Nitruro de Titanio
3	Pastilla (inserto)	T-MAX P CNMG-QF 235	Pastilla de 80° para acabado con recubrimiento de Nitruro de Titanio
4	Porta-inserto	T-MAX P SKNR/L	Barra enteriza para maquinado interior

			izquierdo
5	Porta-inserto	T-MAX U SVJBR/L	Porta inserto de dirección izquierda
6	Porta-inserto	T-MAX U SVJBR/R	Porta inserto de dirección derecha
7	Porta-inserto	T-MAX Q-cut R1L151.21	Porta inserto para inserto de tronzado.
8	Broca helicoidal		Broca comercial para acero de 1/4"
9	Broca helicoidal		Broca comercial para acero de 1/2"

Tabla 4.2.2 Herramental de fabricación comercial utilizado para el mecanizado de los dedos.

Herramental Utilizado Fabricado

Todos los dedos contienen en uno de sus extremos una esfera interior que se muestra en la figura 4.10 cuyo mecanizado que requirió de una herramienta especial para interiores, que tuvo que ser fabricada previamente. La herramienta está muy restringida en cuanto a sus dimensiones debido a varios aspectos los cuales se mencionan a continuación:

- 1.- El espacio en el que debe ser introducido es muy pequeño, por lo que la distancia permisible entre el filo de corte de inserto y el extremo opuesto del porta-inserto es también muy reducida.
- 2.- La profundidad de corte es muy pequeña por ende el inserto no deberá sobresalir de su porta inserto, una distancia mayor a un milímetro por encima de dicha profundidad de corte.
- 3.- La longitud del porta inserto es tal que debe evitar flexión excesiva en el momento del maquinado pero permitir la penetración del filo de corte en la pieza hasta la distancia exigida en el eje X

El material utilizado para el inserto fue una barra Gorton de Acero rápido, o en su defecto, el zanco de una broca de centros del número 1 (3/16"). Por lo que respecta al portaherramientas se utilizó acero 1045 en presentación de barra circular de 3/8", sin preocuparse mucho por la selección del mismo, debido a las propiedades del material a maquinarse.

La figura 4.10 ilustra a la herramienta de corte y su situación con respecto a la pieza a trabajar.

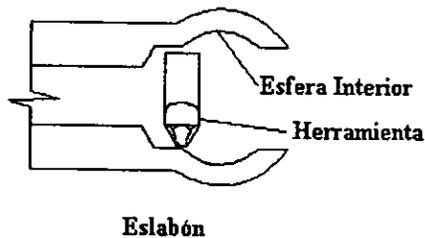


Figura 4.10 La herramienta de corte fabricada y su situación con respecto a la pieza a maquinarse.

El afilado de la herramienta se hizo de manera manual con piedras de esmeril de óxido de aluminio con las que se cuenta en el taller. El filo de corte propiamente dicho, se generó con ayuda de una piedra de asentar. El procedimiento fue el siguiente:

- 1.- Generación de un plano que pase por eje del cilindro (Plano A)
- 2.- Generación de dos planos de 60° con respecto de la normal al plano anterior (Planos B)
- 3.- Generación de un plano a 30° con respecto al primer plano generado (Plano C)
- 4.- Generación del filo de corte en la piedra de asentar hasta alcanzar un radio aproximado de 0.2 mm (Plano D)

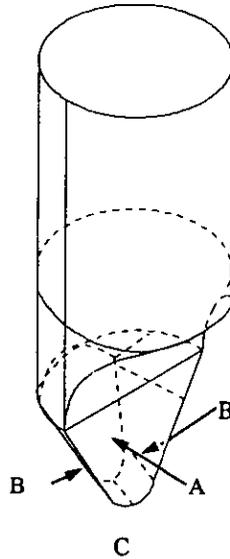


Figura 4.11 Acercamiento del filo de corte de la herramienta para esfera interior.

La barra portaherramientas se fabricó en acero 1045 en tornos convencionales a partir de una barra de 3/8" de diámetro. Debido a que la dureza del material a maquinar no lo amerita, no se dio tratamiento térmico alguno para procurarle endurecimiento superficial. Como dispositivo de sujeción del inserto en la barra, se utilizó un tornillo Allen de 3/16" de cuerda standard colocado en la parte frontal de portaherramienta perpendicular al inserto, tal y como se muestra en el plano correspondiente. En este plano se señalan a la vez las dimensiones tanto de inserto como del portaherramienta.

Situación de las herramientas en el revolver portaherramientas

Conocer la colocación de las herramientas en el revolver es útil para la interpretación del código de los programas de control numérico, por ello se muestra a continuación además de poder ser consultada en los anexos para una más rápida referencia.

Posición el en revolver	Herramienta	Compensación
1	T-MAX P RSKNR/L	01
2	T-MAX U SVJBR/L	02
3	T-MAX U SVJBR/R	03
4	T-MAX Q-cut	04
6	Broca de 1/4"	06
7	Broca de 1/2"	07
8	Herramienta para interiores de fabricación propia	08

Tabla 4.2.3 Situación de las herramientas en el cabezal portaherramientas.

PROCEDIMIENTO

Para el correcto maquinado de las piezas, es necesario realizar una operación previa llamada *compensación de herramientas*, la compensación de herramientas es un procedimiento a través del cual se le da a conocer a la máquina la posición exacta del filo de corte de una herramienta, con respecto a un punto de referencia preestablecido, localizado en el cabezal portaherramientas.

Maquinado

Una vez hecha la compensación se procede a montar la pieza. Independientemente de la pieza de que se trate, se deberá ejecutar el programa 4001.lat⁶ en primer término. Esto debido a que la operación de maquinado de la esfera interior requiere de no exceder entre el extremo libre de la pieza y el chuck una distancia de 30 mm (Se recomienda en particular que esta distancia sea

⁶ Ver el apéndice A para el código fuente del programa

de 20mm). Una vez que se ha montado la pieza se toma el valor del cero pieza⁷ se modifica la línea 50 del programa correspondiente (G92, asignación del cero pieza) en el campo Z con el valor obtenido y se ejecuta el programa.

Ya que se ha completado la ejecución del programa 4001.lat se procede a alejar el extremo libre de la pieza, a una distancia que debe ser mayor o igual que $A + B^8$ con el fin de evitar el choque de las herramientas con el husillo durante el mecanizado. Una vez hecho lo anterior, es indispensable volver a obtener el valor del cero pieza, y modificar este valor en el campo Z del registro correspondiente. Toda vez que se ha actualizado el registro correcto con el nuevo valor del cero pieza se puede ejecutar los programas 4002.lat y 4003.lat. El primero lleva a cabo el mecanizado de las falanges inferiores, mientras que el segundo lo hace con las superiores.

Con esto se concluyen las operaciones que se deben realizar en torno. Es posible ahora pasar a la máquina fresadora para el mecanizado de las ranuras donde se alojarán los elementos de actuación. También se generarán las caras planas que alojarán a los sensores de contacto.

Fresa

Las operaciones de fresado se llevaron a cabo en el equipo EMCO VMC100 del laboratorio. Para su mecanizado es preciso fijarlas a la mesa de coordenadas con las que cuenta este dispositivo. Para ello, fue necesario maquinar dos piezas que colocadas en las mordazas de la prensa permitieran la sujeción correcta de las partes maquinadas previamente en el torno. Estas piezas fueron hechas a partir de placa de aluminio de 3/4" (19 mm) en equipos convencionales (cepillo y fresadora). La figura (4.2.7) muestra el aspecto de estas piezas, pudiendo ser consultado el plano de detalle y fabricación en el anexo B.

⁷ El cero pieza es un sistema de referencia fijo en la pieza con respecto al cual se miden las distancias involucradas en el programa.

⁸ Ver definición en la sección 4.2

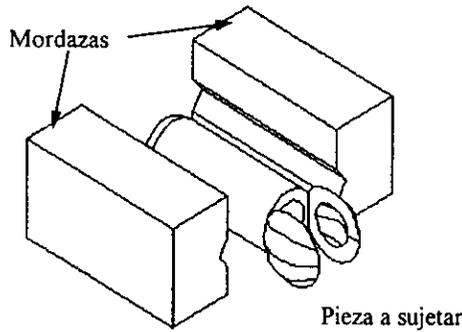


Fig. 4.12 Dispositivo definitivo de sujeción de la pieza para maquinado en máquina fresadora

La figura 4.12 muestra la opción definitiva para el mecanismo de sujeción de la pieza, sin embargo, en primera instancia se pensó en un opción un poco más compleja que se descartó por el hecho de que provocaría un colapso en la pieza en el momento del maquinado. Esta opción se muestra a continuación solo para fines comparativos.

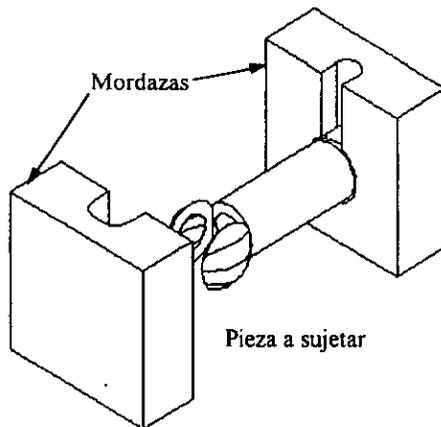


Figura. 4.13 Mecanismo de sujeción de la pieza en la máquina fresadora. Primera Opción. Esta opción se descartó por el riesgo de colapso de la pieza.

La utilización del dispositivo mostrado en la figura 4.13 permite el mecanizado de un lado de la pieza sin necesidad de hacer cambios de posición. Además garantiza el paralelismo de la pieza con el de la mesa de coordenadas con un error de menos de 1.5° .

El proceso a seguir es exactamente el mismo que el que se siguió para el torno, es decir, la compensación y la compensación fina y la toma del cero pieza. En este último punto, la obtención del cero pieza se hace en realidad en dos puntos distintos y no de manera directa. Esto debido a la dificultad de posicionar el filo de una herramienta en un punto preciso de la pieza.

Una vez que se ha colocado la pieza en posición correcta se procede a actualizar los campos x, y y z de las línea 50 del programa o4009.mil con los valores de la compensación obtenidos y se ejecuta el programa. Cada uno de los dedos debe de ser ranurado por dos lados, por lo cuál es necesario dar vuelta a cada uno de los eslabones repitiendo el proceso de obtención del cero pieza, y ejecutar nuevamente el programa o4009.mil. Cuando se halla completado la segunda ejecución del programa o4009.mil la pieza está terminada.

4.3 IMPRESIÓN DE LOS ENCODERS EN LOS DEDOS.

Un aspecto muy importante en este dispositivo será sensar la posición relativa que guardan entre si los eslabones que conforman los dedos. Por supuesto, los dispositivos más usados para sensar rotación, los llamados encoders son la mejor opción para este caso, sin embargo, por la imposibilidad de encontrar este tipo de dispositivos de una tamaño lo suficientemente pequeño se optó por grabarlos en la arquitectura misma de los dedos, con lo cual se ahorra tanto dinero como espacio. Además el diseño puede incluir algún "mecanismo" que sirva al dispositivo para encontrar su posición durante el proceso de Home. La idea concreta se muestra en la figura 4.14.

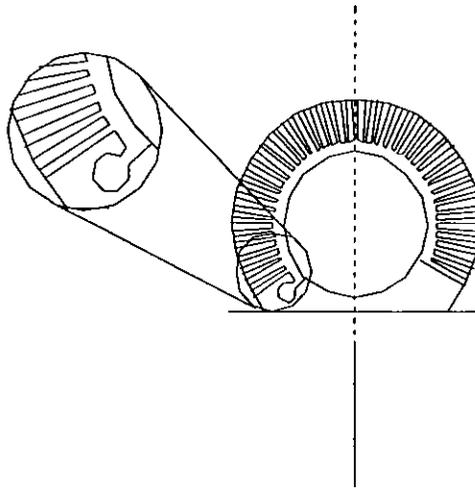


Figura 4.14 Aspecto del encoder y detalle.

Para poder imprimir el patrón mostrado en la figura 4.14 es necesario primero depositar en la superficie plana de la articulación superior de cada eslabón una película de cobre la cual se atacará con el proceso habitual de fotoimpresión. El principal problema que se presenta al querer recubrir una superficie con una película metálica es que dicha superficie no es conductora además de ser hidrofóbica. En la actualidad existen muchos procesos que salvan exitosamente este inconveniente⁹, en particular si escogió el proceso conocido como ELLECTROLESS que no involucra la aplicación de una corriente eléctrica durante el proceso. El proceso consta de las siguientes etapas :

- 1.- **Desengrase.** Consiste en eliminar grasa, aceite y suciedad de la superficie de la pieza y así evitar la pobre adherencia del depósito.
- 2.- **Enjuague.** Su finalidad es eliminar los residuos de la solución desengrasadora.
- 3.- **Ataque.** Consiste en atacar la superficie de plástico que originalmente tiene un comportamiento hidrofóbico, para conferirle un carácter hidrofílico ocasionando microrugosidades en la superficie.
- 4.- **Enjuague.** Elimina los residuos de la solución de ataque.

⁹ Ver Trejo Porras, Alfredo León "Metalizado de Plásticos" México 1989 (Tesis de licenciatura)

- 5.- **Neutralizador.** Consiste en neutralizar los residuos ácidos de la solución de ataque.
- 6.- **Enjuague.** Elimina los residuos de la solución neutralizadora alcalina.
- 7.- **Sensitización y Catalización.** Su finalidad es depositar el metal catalítico en la superficie plástica.
- 8.- **Enjuague.** Consiste en eliminar los residuos del compuesto metálico.
- 9.- **Aceleración.** Su función es remover los residuos metálicos depositados en el paso anterior con el fin de procurarle a la película metálica una mayor adherencia.
- 10.- **Depósito por ELECTROLESS.**
- 11.- **Enjuague.** Elimina los residuos de la solución de ELECTROLESS.
- 12.- **Depósito electrolítico de Níquel.**

Como se puede apreciar el proceso es laborioso pero sin embargo es confiable y salvo el cloruro de paladio que se utiliza en la Sensitización, todos los compuestos son de precio accesible. Una vez que la película de cobre ha sido depositada, se puede encargar a cualquier empresa especializada el trabajo de la fotoimpresión. Con esto se concluye el capítulo referente al diseño del chasis continuando con la exposición del software de simulación en el capítulo número cinco. Finalmente, la figura 4.15 muestra el aspecto final del prototipo.

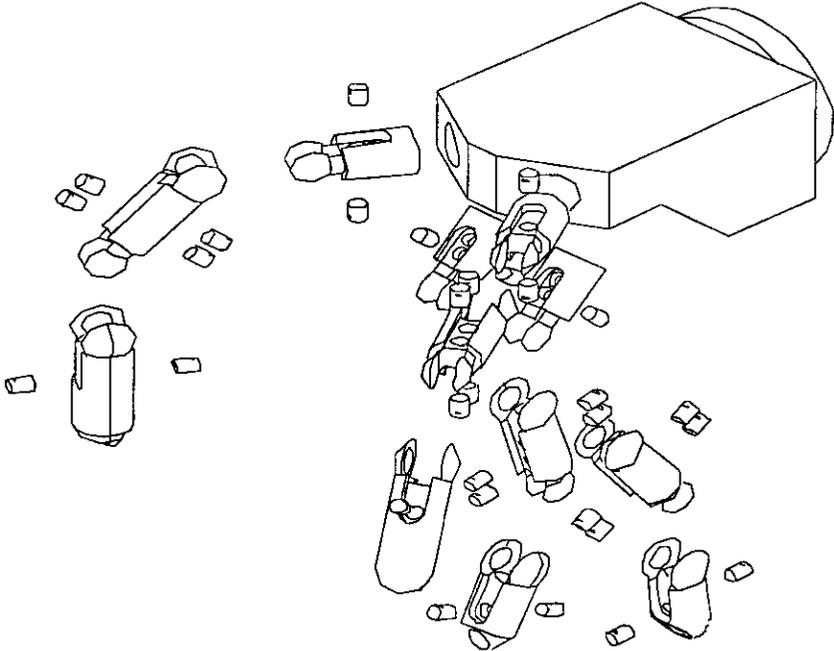


Figura 4.15 Dibujo en explosivo del armazón final..

Capítulo 5

Diseño del Software de Control

Con el fin de evitar complicaciones en la tarea de control, se decidió desde el principio de este proyecto utilizar una máquina PC compatible como sistema de control, en vez de diseñar una tarjeta controladora con microprocesador. Por esto es necesaria la elaboración de una serie de programas en un lenguaje de alto nivel; que, junto con otros que lleven a cabo tareas de simulación y solución, representan una solución total del sistema.

Son muchos los aspectos que están involucrados en el diseño de un software cualquiera que sea la tarea que éste desarrollará. El primer paso es elegir un lenguaje que sea adecuado a la plataforma física que se utilizará. En segundo término se deben definir de preferencia a priori la estructura y el contenido global del programa. Esto facilita la programación en el sentido que se tendrá un mejor control de las variables, sobre todo de aquellas que son de tipo global, y se evitarán conflictos entre ellas. Por último se debe hacer el software de tal manera que su operación resulte clara y sencilla para la persona que lo operará.

5.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Como se describió, la primer interrogante que surge cuando se pretende diseñar un software es : ¿Qué lenguaje se utilizará para programar las rutinas y procesos ?. Existen una gran variedad de lenguajes de alto nivel actualmente disponibles, todos ellos muy poderosos y capaces de realizar de manera eficiente los procesos que se requieren. Sin embargo se hace casi indispensable el proveer al operario de una interface gráfica de fácil comprensión y acceso, de preferencia basado en un ambiente gráfico como Windows. Con el fin de evitar la utilización de código excesivo para lograr dicha interface, es preferible hacer la programación en un lenguaje disponga de las rutinas que faciliten su elaboración. Con esta restricción el número de lenguajes de programación se reduce a unos cuantos y la decisión final se toma en base a la experiencia que sobre la programación en cualquiera de estos lenguajes se tenga.

En el caso particular, se tiene un amplio dominio del idioma Visual BASIC, que tiene esencialmente la misma estructura que su antecesor el QBASIC. Hasta la fecha de elaboración de este trabajo se habían lanzado al mercado cuatro versiones de Visual BASIC las dos últimas contando con dos ediciones, la edición Estándar y la Profesional, se optó por la edición profesional ya que cuenta con un mayor cantidad de librerías y facilita la comunicación con el puerto serie.

Es necesario mencionar que el programa de control debe ser capaz de tener una comunicación eficiente con el puerto paralelo¹ de la computadora. Visual BASIC contiene un control personalizado que permite de manera muy eficiente la comunicación con el puerto serial de la máquina, sin embargo, no se incluye ninguna herramienta que permita la comunicación con el puerto paralelo, salvo la instrucción `PRINTER.Print` que por invocar el BIOS requiere de varias confirmaciones, entre ellas que se encuentre un dispositivo conectado y que éste está en estado de espera. Fue necesario utilizar un control personalizado no provisto por el fabricante original para proveer al programa de comunicación paralela.

Las señales de entrada pueden captarse a través del puerto serial de la computadora sin aparentemente ningún problema. Estas señales son las provenientes de los sensores de contacto colocados en las yemas de los dedos y las de los encoders que sensorán la posición relativa de los eslabones.

¹ La justificación para la utilización de este puerto se vió en el capítulo 5

5.2 ESTRUCTURA

El software está organizado en pantallas o “formas” que como en la mayoría de los paquetes contienen elementos que facilitan el acceso a las rutinas específicas que nos interesan, permiten la entrada de los datos e instrucciones y por supuesto la presentación ordenada de los resultados. Estos elementos son principalmente :

- Botones de órdenes,
- Cajas de texto,
- Controles de figura,
- Cajas de herramientas,
- Barras de menú,
- Etiquetas,
- Cajas combo.

Existen muchos más elementos que forman parte de una forma, sin embargo solo se mencionaron aquellos que fueron utilizados en este trabajo, ya que existen tantos controles como necesidades de programación existen.

La primer pantalla que nos encontramos es la pantalla principal que contiene únicamente una barra de menú de cuatro elementos y una barra de herramientas que permite realizar las rutinas más comunes sin necesidad de acceder a ellas a través del menú.

Los menús que se pueden encontrar en esta página de inicio son :

- Archivo
- Simulación
- Control
- Ayuda

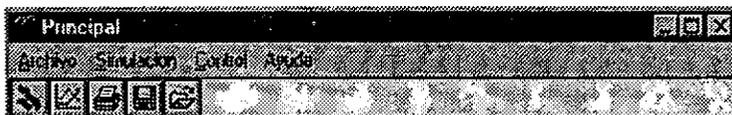


Figura 6.1 Apariencia de la barra de menú y la barra de herramientas.

5.2.1 ARCHIVO

El menú de Archivo contiene básicamente tres submenús que son *salvar coordenada*, *abrir archivo de coordenadas* y *salir*. La primer opción permite archivar los valores de tiempo, voltaje y corriente usados durante un proceso de sujeción determinado. Cuando se selecciona *abrir archivo de coordenadas*, se pueden recuperar archivos de posiciones que fueron guardados con anterioridad. Por último, la opción salir permite finalizar todos los programas. Al elegir la opción salir, siempre se pide confirmación a través de un cuadro de diálogo que permite salvar los valores de todos los puntos de interés alcanzados durante esa sesión de operación.

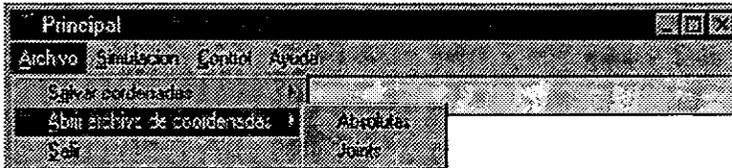


Figura 6.2 Opciones dentro del menú archivo.

5.2.2 SIMULACIÓN

El menú de simulación contiene todos aquellos programas cuya función es la de resolver los modelos matemáticos que se plantearon en los capítulos tres y cuatro. Básicamente son cinco los modelos matemáticos que se programaron .

- 1.- Análisis cinemático del órgano terminal,
- 2.- Análisis de fuerzas actuantes sobre el objeto en condiciones críticas,
- 3.- Análisis de las fuerza ejercida por los elementos de actuación en función de las distancias a las que se hayan localizados los puntos de fijación,
- 4.- Análisis de las fuerzas de inercia generadas durante el movimiento del manipulador.
- 5.- Análisis de transferencia de calor de elemento del actuación al medio ambiente,

En el menú de ayuda se incluye un resumen de las variables y su configuración así como una breve bosquejo de la situación general de donde los modelos fueron obtenidos.

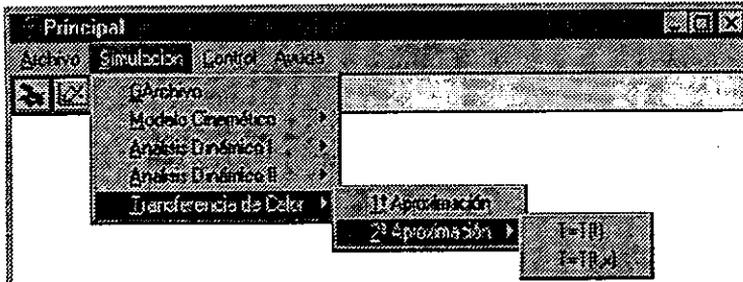


Figura 6.3 Opciones del archivo de simulación.

Cada una de las opciones del menú de simulación contiene a su vez más opciones dependiendo del tipo de análisis de que se trate y/o de la manera en que se desea que sean desplegados los datos.

5.2.3 CONTROL

El menú de control contiene los únicos programas que interactúan con el dispositivo físico. El primer programa del menú de control con el que se encuentra el de inicialización permite al dispositivo alcanzar la posición de referencia. Esta operación es necesaria en todos los dispositivos cuya posición sea controlada automáticamente, ya que, al iniciar el funcionamiento, no se tiene noción de la posición relativa de las diferentes partes móviles.

Los otros dos programas permiten el control ya sea automático o manual del dispositivo. El control manual se lleva a cabo a través del teclado usando la teclas Q, W, E y R para mover en dirección positiva la primer articulación de los dedos 1, 2, 3 y 4 respectivamente ; mientras que las teclas A, S, D y F los hacen en la dirección opuesta. Para poder mover la segunda articulación, es necesario que se mantenga oprimida la tecla CRL mientras se presionan las teclas Q, W, E o R para mover la articulación en dirección positiva mientras que las teclas A, S, D y F lo hacen en la dirección negativa.

El programa automático realiza los movimiento de las articulaciones para alcanzar posiciones predeterminadas en base al objeto que se sujetará.

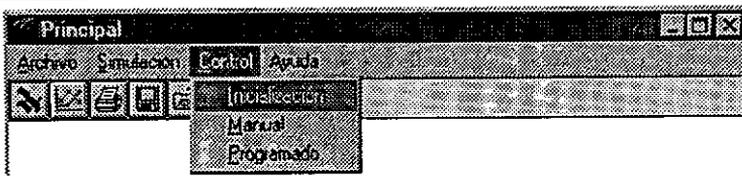


Figura 6.4 Opciones del menú de control.

5.2.4 AYUDA

El menú proporciona información acerca del uso general del paquete así como de las variables que toman parte en los análisis matemáticos.

Además de la barra de menú, el paquete cuenta con una barra de herramientas asociada a las funciones más comúnmente realizadas dentro del paquete, como pueden ser la impresión de los gráficos o tablas de valores.

5.3 PROGRAMACIÓN

5.3.1 VARIABLES

Resulta tedioso y hasta cierto punto inútil mostrar los diagramas de flujo y el pseudocódigo de todos los programas, sin embargo se tratarán aspectos tales como la optimización de los tiempos de proceso a través de la utilización de algoritmos de solución más rápidos y evitando cálculos innecesarios. También se dará una lista de las variables más utilizadas su tipos y su alcance. Esto es de vital importancia para la interpretación de un programa ya que por lo general ninguna persona que no sea el programador puede entender por completo la función de cada una de las variables. La mayor parte de los algoritmos utilizados están ya ampliamente explicados en la bibliografía y solo se pondrá atención en aquellos que hayan sido implementados de propia cuenta. Además, en el código fuente del programa se incluyen una serie de comentarios que son útiles para entender que se está llevando a cabo en cada paso, así como las entradas y las salidas de cada proceso. En este punto es necesario distinguir entre dos tipos de variables de acuerdo al "alcance" que dicha variable tenga dentro del programa en su conjunto. Estos tipos son :

- 1.- Locales cuando una variable puede ser accesada solo en el módulo donde fue declarada o definida.

2.- Globales cuando la variable puede ser accesada por módulos distintos a aquel en el cual fue definida.

Una regla de observancia general es que se debe evitar en la medida de lo posible el uso de variables globales ya que permanecen en la memoria hasta que el programa completo termina su ejecución. Si se abusa del uso de las variables globales, la memoria quedará prontamente saturada y la aplicación tiende a volverse lenta e ineficiente.

Siempre que sea posible, deberán utilizarse funciones en vez de subrutinas por el simple hecho de que las funciones reciben el valor de una variable como argumento y dicha variable no requiere estar a disposición de manera global. Las subrutinas que no reciben argumentos comparten valores solo de variables globales.

La lista de las variables, el modulo en el que fueron definidas y su condición se muestra en el apéndice C.

Las variables en Visual BASIC no requieren ser definidas con antelación a su uso, en lugar de ello se establece un tipo por defecto que es llamado "Variable" que adopta como tipo, el tipo de dato que se asigna a la variable por primera vez; este puede ser entero, real de simple precisión real de doble precisión y cadena. La asignación del tipo "Variable" ocupa 64 bits en previsión del tipo de variable que pueda tomar posteriormente. Por el contrario el tipo "single" que corresponde a un real de simple precisión ocupa 8 bits lo que representa un ahorro de 8 veces en el uso de variables no declaradas.

Cuando se considera pertinente como es el caso de la variables de captación de datos y los contadores, la declaración de las variables se hace de manera implícita es decir adicionando al nombre de la variable los símbolos.

Real de doble precisión

% Entero

\$ Carácter

! Real de simple precisión,

5.3.2 ALGORITMOS

MODELO CINEMÁTICO

Existen varios procedimientos notables en el programa, que se tratarán de acuerdo a su orden de aparición. En primer instancia tenemos el *MODELO CINEMÁTICO* cuya principal característica desde el punto de vista de programación es la graficación en 3D de los modelos de la mano. Las entidades que forman dichos modelos se hayan en un archivo grabado con anterioridad con un formato propio, que es el siguiente.

- Cada entidad ocupa un solo registro en la base de datos,
- Dependiendo del tipo de entidad de que se trate se almacenan :
 - Para una línea las coordenadas de los puntos extremos, y el sistema de referencia al que pertenecen.
 - Para un círculo, el radio, el centro, el plano que lo contiene (X Y, YZ, XZ) y el sistema de referencia.
- Los campos dentro de cada registro son separados con un signo “%” y el final de cada registro incluye un signo “!”.

La razón de separar los campos es que permita su mejor recuperación desde el programa así solo se tendrá que asignar a una variable el número contenido entre dos símbolos “%” sucesivos.

Una vez recuperados los campos se procede al dibujo de las entidades. De esto lo único que amerita ser mencionado es que durante el proceso, se lleva a cabo la multiplicación de las matrices que resultaron relacionadas a los parámetros de eslabonamiento estas matrices proveen la descripción de una base de referencia con respecto a otra.

Las matrices de transformación son matrices cuadradas de 4x4 y cada una de ella realiza de manera general dos transformaciones, una consiste en una rotación canónica es decir alrededor de un eje principal (X,Y o Z) del sistema de referencia que le precede. La segunda transformación consiste en una traslación relativa al sistema de referencia previo. La rotación pura es una matriz de 3x3 y la transformación de rotación se representa con un vector de 3x1. Así la matriz resultante tiene la forma :

$$[M_{\pi}] = \left[\begin{array}{c|c} [Rot(\theta, Z)] & [P_n^{n-1}] \\ \hline 0 & 1 \end{array} \right]$$

Donde

$Rot(\theta, Z)$ Es la matriz de rotación alrededor del eje Z teta grados.²

P_n^{n-1} Es el vector de posición del origen del sistema n con respecto al sistema n-1.

Las matrices se definen en el programa como un arreglo de 3 índices libres. El primer índice se usa para indicar la matriz de que se trata, el segundo se refiere a los renglones de dicha matriz y el tercero a la columnas. En algunos de los valores M_{Tij} intervienen seno y cosenos de los ángulos de rotación de las articulaciones, además se presentan los valores de las coordenadas de los sistemas de referencia. Los ángulos como las coordenadas mencionadas se ordenaron en arreglos de dos índices libre, el primer, corresponde al número de dedo y el segundo al número de articulación. Los vectores de posición se ordenaron en arreglos de tres índices libres, el primero corresponde al número de dedo, el segundo a la articulación y el tercero a la coordenada. La asignación de valores de los elementos de una matriz se muestra a continuación :

$$MT(1, 1, 1) = \text{Cos}(\text{TETAM}(\text{SIS1}\%, 1))$$

$$MT(1, 1, 2) = 0$$

$$MT(1, 1, 3) = \text{Sin}(\text{TETAM}(\text{SIS1}\%, 1))$$

$$MT(1, 1, 4) = \text{VP}(\text{SIS1}\%, 1, 1)$$

$$MT(1, 2, 1) = 0$$

$$MT(1, 2, 2) = 1$$

$$MT(1, 2, 3) = 0$$

$$MT(1, 2, 4) = \text{VP}(\text{SIS1}\%, 1, 2)$$

$$MT(1, 3, 1) = -\text{Sin}(\text{TETAM}(\text{SIS1}\%, 1))$$

$$MT(1, 3, 2) = 0$$

$$MT(1, 3, 3) = \text{Cos}(\text{TETAM}(\text{SIS1}\%, 1))$$

$$MT(1, 3, 4) = \text{VP}(\text{SIS1}\%, 1, 3)$$

$$MT(1, 4, 1) = 0$$

² Cualquier eje en general puede usarse como eje de giro en vez de Z, según sean las necesidades, para este caso en particular solo se usan los ejes principales.

$$MT(1, 4, 2) = 0$$

$$MT(1, 4, 3) = 0$$

$$MT(1, 4, 4) = 1$$

Para facilitar la comprensión, supóngase que se tiene una línea que pertenece al segundo eslabón de cualquiera de los dedos, para su correcta representación se necesita multiplicar una matriz de transformación total, por el vector de cada uno de los puntos extremos. Dicha matriz de transformación total se obtiene multiplicando las matrices de transformación sucesivas de la base n a la base 0 en ese orden, quedando de la manera siguiente :

$$[M_n^0] = [M_1^0][M_2^1] \dots [M_{n-2}^{n-3}][M_{n-1}^{n-2}][M_n^{n-1}] \quad (6.1)$$

La manera en que fueron grabadas las entidades en la base de datos es tal que todas aquellas que pertenecen a un mismo sistema de referencia están colocadas de manera sucesiva. Esto ahorra tiempo al ser necesaria la obtención de la matriz de proyección total, una sola vez por cada sistema de referencia.

La matriz de transformación total debe premultiplicarse a la matriz de proyección que depende de la condición del plano de proyección con el plano de la pantalla. Al multiplicar la matriz resultante por el vector correspondiente, se obtiene el vector final que será dibujado de manera trivial, eliminado el último renglón de este vector.

Por último el color de cada uno de los dedos está asociado al sistema de referencia correspondiente lo que permite dibujar cada una de las falanges de un color distinto.

ANÁLISIS ESTÁTICO I Y II

En el análisis estático se requiere resolver un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, lo cual se puede conseguir a través de métodos numéricos sin aparentemente ningún problema, sin embargo por cuestiones de exactitud se decidió programar el método analítico que consiste en encontrar la inversa de la matriz de coeficientes y premultiplicarla por el vector de términos independientes. Así la solución del sistema representado por la ecuación 6.2 es la ecuación 6.3

$$[A]\bar{x} = \bar{b} \quad (6.2)$$

$$\bar{x} = [A]^{-1}\bar{b} \quad (6.3)$$

El problema ahora consiste en encontrar dicha matriz inversa. El método analítico que resulta más fácil de programar es el método de la adjunta, que establece que la inversa de una matriz se obtiene dividiendo la matriz adjunta entre el determinante de la matriz original

Para ello fue necesario implementar un algoritmo que obtuviera el menor i, j de la matriz A y con una fórmula bien conocida, se obtiene el determinante de este menor. El algoritmo para la obtención de los menores (matrices de $n-1 \times n-1$) de una matriz de A de $n \times n$ consiste en almacenar en una arreglo $C_{n-1 \times n-1}$ los elementos de A tales que para un a_{ij} dado se tengan todos los elementos a_{ki} tales que $k \neq i$ y $l \neq j$. Una vez que se tiene el menor, el siguiente paso es encontrar el determinante de cada menor. Finalmente se obtiene el determinante de la matriz original que no representa ningún problema ya que se han obtenidos previamente todos los menores y para obtener el determinante solo basta con multiplicar los elementos de cualquier vector renglón o columna por sus menores respectivos. Es así como se construye la matriz inversa.

El número de operaciones involucradas en este método es muy grande y crece como potencias de n sin embargo, para el caso de una matriz de 4×4 el número de operaciones no es mucho mayor a las requeridas por los métodos numéricos convencionales con la ventaja de que el único error que se produce es el debido a la pérdidas por redondeo. Y no es necesario utilizar técnicas de pivoteo para acelerar la convergencia del método.

Una vez que se ha implementado el método de solución del sistema de ecuaciones se procede a la presentación de los datos que pueden ser en pantalla, impresora o en un archivo. De todos ellos es quizá la presentación en la pantalla el que más ilustre el proceso, ya que permite presentar los valores de las fuerzas involucradas como una función de dos variables independientes a manera de una función $F=f(x,y)$. La técnica para visualizar la gráfica en 3D es la misma que se utilizó para la representación tridimensional de la mano, con ayuda de una matriz de proyección. Los valores de todos los puntos se guardan en un archivo de la manera que se indicó en la sección anterior. En el encabezado del archivo se incluyen parámetros de normalización de las gráficas porque el

programa final que dibuja los puntos en la práctica, requiere de normalizar los datos para centrar la gráfica en la pantalla.

Los datos para la normalización que se incluyen en el encabezado del archivo son :

- Valores máximos de $f(x,y)$.
- Valore mínimos de las variables independientes
- Valores máximos de las variables independientes
- Factores de escala
- Coordenadas de desplazamiento del centro del dominio con respecto al centro del sistema de referencia.

TRANSFERENCIA DE CALOR

El módulo de transferencia de color involucra la solución de una ecuación diferencial lineal cuya solución no solamente es difícil por métodos analíticos como se explicó en el capítulo 3 sino que se debe realizar un gran número de veces, por ello se recurrió al método de Runge-Kutta ³ de cuarto orden : Dicho método de solución de ecuaciones diferenciales se aplica a aquellas ecuaciones que puedan ser expresadas de la forma

$$f(y)dy = f(x)dx$$

El método de Runge-Kutta es muy sencillo de programar y establece que una ecuación diferencial del tipo que se indicó tiene por solución $x=w_{i+1}$ Donde :

$$w_{i+1} = w_i + 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Donde a su vez :

$$k_4 = hf(t_{i+1}, w_i + k_3)$$

$$k_3 = hf(t_i + h/2, w_i + 1/2k_2)$$

$$k_4 = hf(t_i + h/2, w_i + 1/2k_1)$$

$$k_4 = hf(t_i, w_{i3})$$

$$w_0 = y_0$$

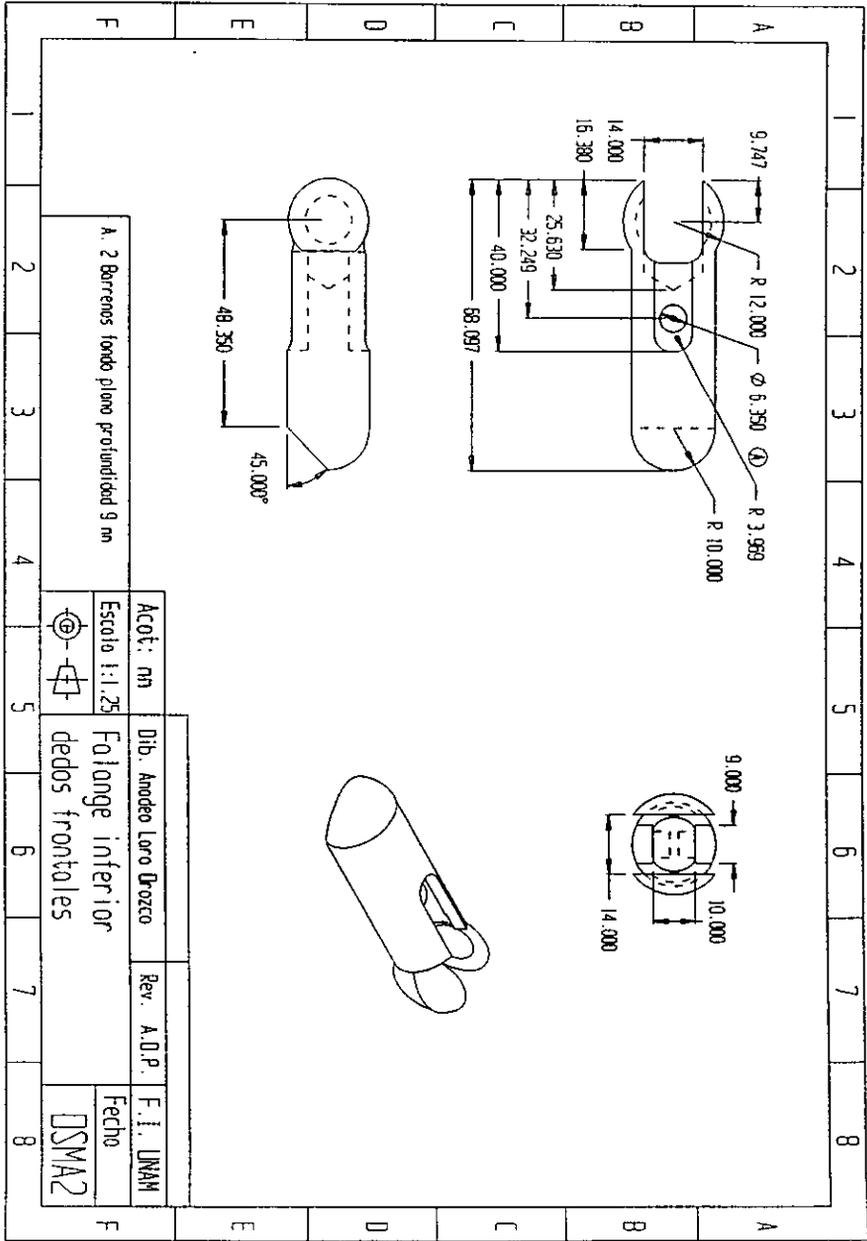
³ Ver Burden Richard y Faires J. Douglas Análisis numérico capítulo 5.

El punto interesante en el método de Runge Kutta es elegir un valor de h adecuado ya que el error absoluto está directamente relacionado con h como la cuarta potencia de h siempre y cuando la función $f(y)$ buscada tenga cuatro derivadas continuas.

De manera general los algoritmos utilizados en el software aquí descrito son sencillos pero muy útiles para los cálculos necesarios, la cantidad de código creció drásticamente al tratar de tornar al sistema más robusto, pero sin embargo siempre es preferible emplear cierto tiempo en el robustecimiento de los sistemas a perderlo por errores del operador.

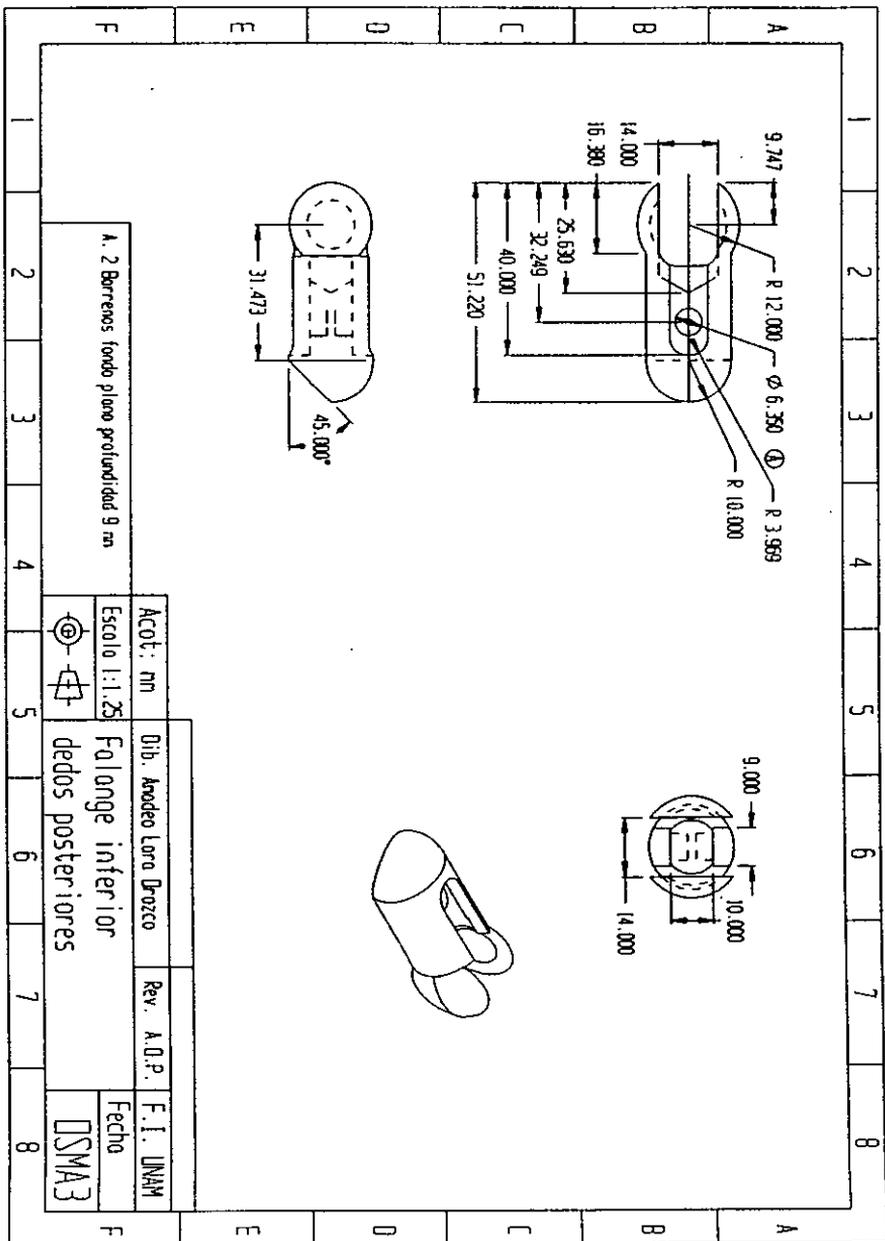
Apéndice A

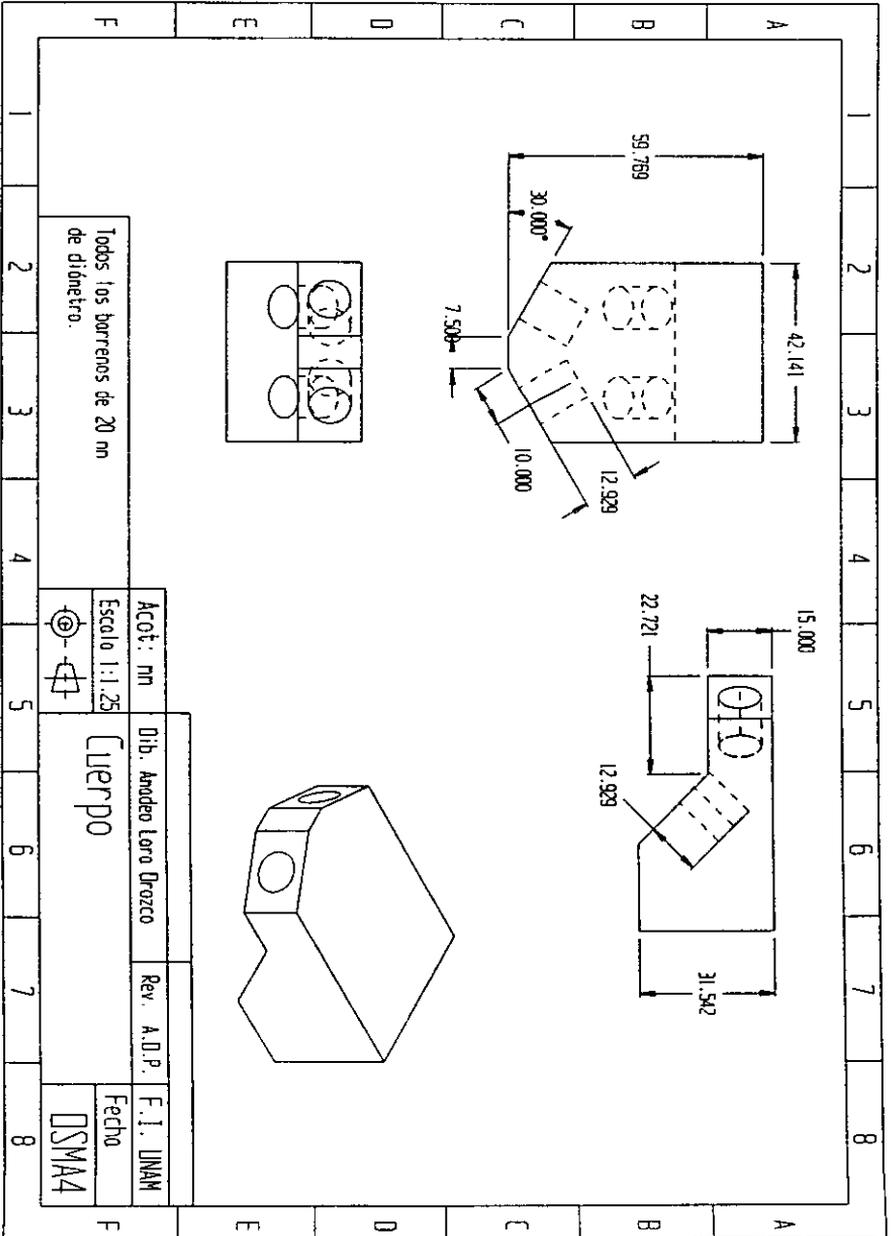
Planos.



A. 2 Barrenos fondo plano profundidad 9 mm

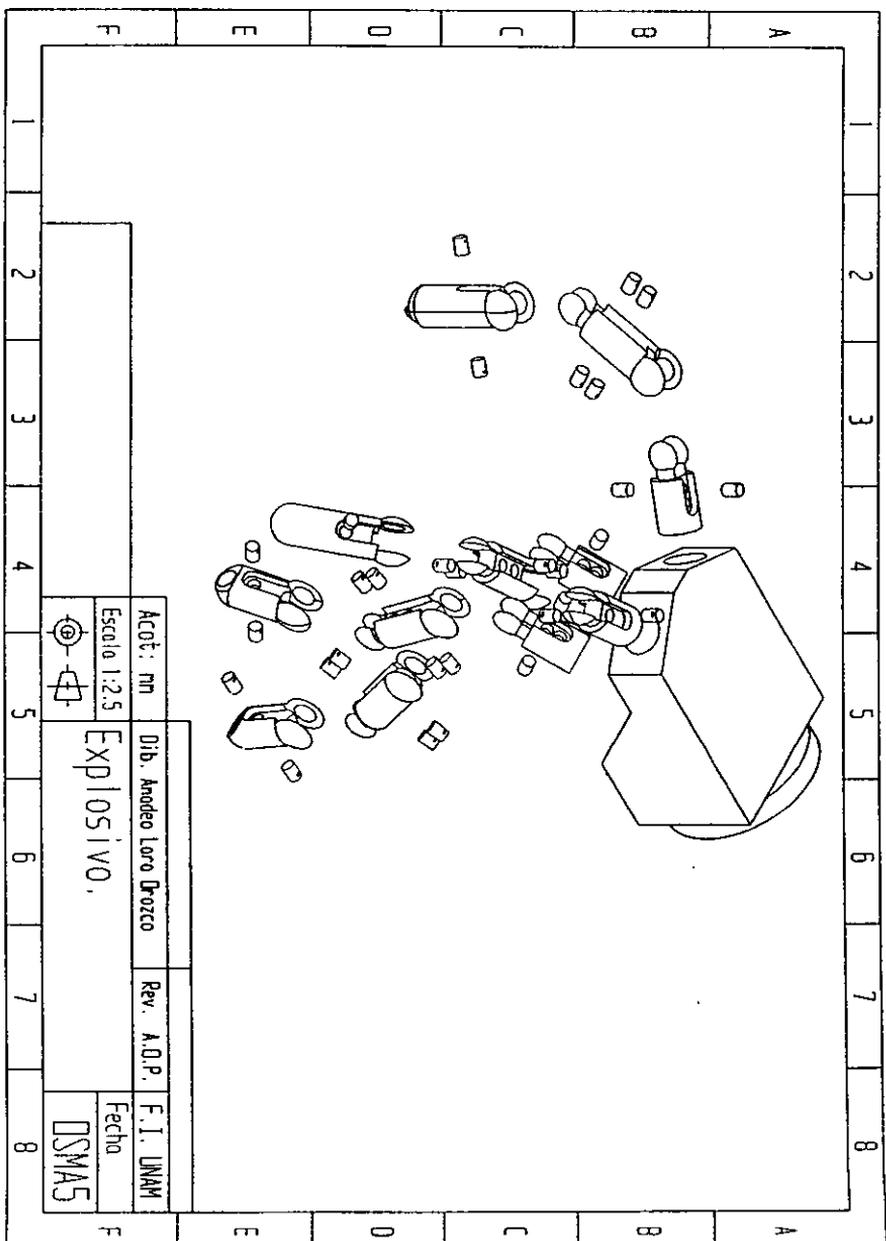
Acot: mh	Dib. Anodo Loro Orozco	Rev. A.D.P.	F.I. UNAH
Escala 1:1.25	Folange inferior		Fecha
	dedos frontales		DSMA2

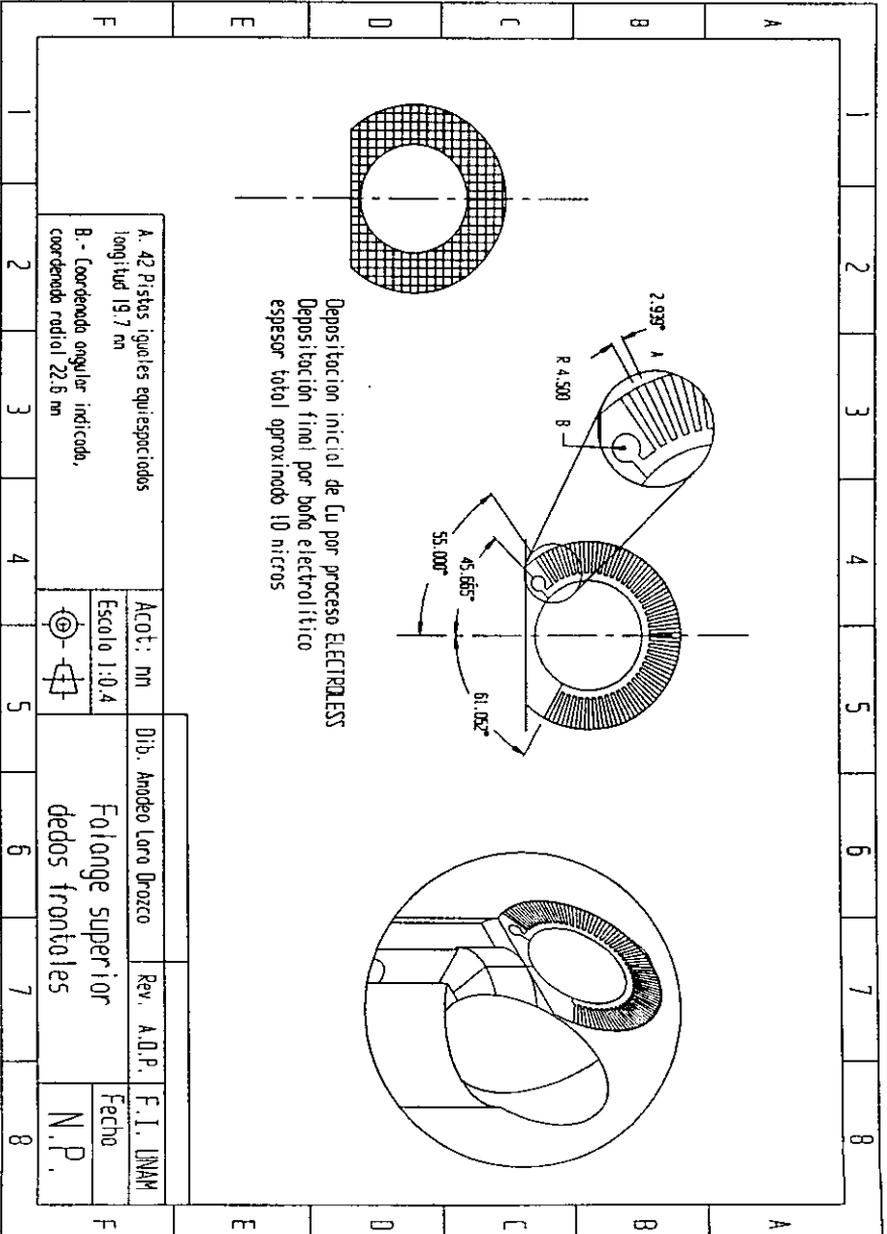




Todos los barrenos de 20 mm de diámetro.

Acot: mm	Dib: Andoño Lora Orozco	Rev: A.D.P.	F. J. LINAM
Escala 1:1.25	Cuerpo		Fecha
			DSMA4





Apéndice B

Programas de CNC.

PROGRAMAS PARA EL TORNO EMCO 242¹

Maquina la parte inferior de las falanges inferiores

%4001

N0000 G53 G56 T0300

N0010 G00 X235.000 Z415.000

N0020 G96 S300

N0030 G92 S2000

N0040 G92 X0.000 Z180.820

N0050 M04

N0060 G59 T0303

N0070 G00 X60.000 Z1.000

N0080 X27.000

N0090 G84 Z-1.000 X-1.000 D3=500 F100

N0100 G53 G56 T0300

N0110 G92 X0.000 Z179.820

N0120 G59 T0303

N0130 G00 X27.000 Z0.000

N0140 G01 X22.805 F100 G42

N0150 G03 X26.905 Z-16.380 I-11.402 K-9.747 F100

N0160 G00 X27.000 G40

¹ Todos los programas se presentan en el orden que se deben ejecutar.

N0170 Z0.000
N0180 G01 X20.100
N0190 G03 X24.660 Z-16.380 I-10.050 K-9.747 F100
N0200 G00 X27.000 G40
N0210 Z0.000
N0220 G01 X17.205 G42
N0230 G03 X22.360 Z-16.380 I-8.602 K-9.747 F100
N0240 G00 X27.000 G40
N0250 G00 Z0.000
N0260 G01 X14.000 G42
N0270 G03 X20.000 Z-16.380 I-7.000 K-9.747 F100
N0280 G00 X27.000 G40
N0290 G00 Z0.000
N0300 G01 X14.000 G42
N0310 G03 X20.000 Z-16.380 I-7.000 K-9.747 F100
N0320 G00 X60.000 G40
N0330 G53 G56 T0300
N0340 G00 X235.000 Z415.000
N0341 M05
N0342 G04 D4=40
N0350 G59 T0606
N0360 M03
N0361 G97 S800
N0370 G00 X60.000 Z5.000
N0380 X0.000
N0390 G87 Z-28.445 D3=6000 D4=40 D6=3000
N0400 G00 X60.000
N0410 G53 G56 T0600
N0420 G00 X235.000 Z415.000
N0430 G59 T0707
N0440 G00 X60.000 Z5.000
N0450 X0.000
N0460 G87 Z-28.445 D3=6000 D4=40 D6=3000
N0470 G00 X60.000
N0480 G53 G56 T0700
N0481 G96 S300
N0482 G92 S2000
N0490 G00 X235.000 Z415.000
N0491 M05
N0492 G04 D4=40
N0493 M04
N0500 G59 T0101
N0510 G00 X60.000 Z10.000
N0520 X12.700
N0530 Z3.000

N0540 G84 X14.000 Z-24.400 D3=250
N0550 G00 X60.000
N0560 G53 G56 T0100
N0570 G00 X235.000 Z415.000
N0571 M05
N0572 G04 D4=40
N0573 M03
N0580 G59 T0808
N0590 G00 X60.000 Z10.000
N0600 X-13.000
N0610 Z-12.440
N0620 G01 X-14.000 G41
N0630 G03 X-14.000 Z-7.055 17.000 K2.692 F100
N0640 G00 X-13.000 G40
N0650 Z-13.620
N0660 G01 X-14.000 G41
N0670 G03 X-14.000 Z-5.875 17.000 K3.872 F100
N0680 G00 X-13.000 G40
N0690 G00 Z-14.570
N0700 G01 X-14.000 G41
N0710 G03 X-14.000 Z-4.925 17.000 K4.822 F100
N0720 G00 X-13.000 G40
N0730 Z-15.405
N0740 G01 X-14.000 G41
N0750 G03 X-14.000 Z-4.090 17.000 K5.657 F100
N0760 G00 X-13.000 G40
N0770 Z-15.405
N0780 G01 X-14.000 G41
N0790 G03 X-14.000 Z-4.090 17.000 K5.657 F100
N0800 G00 X-13.000 G40
N0810 G00 X-13.000
N0820 Z-15.405
N0830 G01 X-14.000 G41
N0840 G03 X-14.000 Z-4.090 17.000 K5.657 F100
N0850 G00 X-13.000 G40
N0860 Z10.000
N0870 X60.000
N0880 G53 G56 T0800
N0890 G00 X235.000 Z415.000
N0891 T0300
N0900 M05
N0910 M30

Maquina la porción inferior de las falanges superiores
%4002

N0000 G53 G56 T0303
N0010 G97 S800 M04
N0020 G92 X0.000 Z50.000
N0030 G59 T0404
N0040 G00 X60.000 Z-68.000
N0050 X27.000
N0060 G86 X20.000 Z-73.000 D3=1000 D4=30 D5=4000 F80
N0070 G00 X60.000
N0080 G53 G56 T0400
N0090 G00 X235.000 Z415.000
N0100 M05
N0110 G96 S300
N0120 G92 S2000 M04
N0130 G59 T0202
N0140 G00 X60.000 Z-68.000
N0150 X27.000
N0160 G84 X20.000 Z-16.380 D3=500 F100
N0170 G00 X60.000
N0180 G53 G56 T0200
N0190 G00 X235.000 Z415.000
N0200 M05
N0210 G97 S800 M04
N0220 G59 T0404
N0230 G00 X60.000 Z-68.000
N0240 X27.000
N0250 G86 X11.000 Z-81.687 D3=1000 D4=30 D5=4000 F100
N0260 G00 X60.000
N0270 G53 G56 T0400
N0280 G00 X235.000 Z415.000
N0290 M05
N0300 G96 S300 M04
N0310 G92 S2000
N0320 G59 T0202
N0330 G00 X60.000 Z-68.000
N0340 X27.000
N0350 G01 X22.360
N0360 G02 X30.000 W10.000 I-11.180 K10.000 F50
N0370 G00 Z-68.000
N0380 G01 X19.595 G41
N0390 G02 X28.000 W10.000 I-9.797 K10.000 F50
N0400 G00 Z-68.000 G40
N0410 G01 X16.615 G41
N0420 G02 X26.000 W10.000 I-8.307 K10.000 F50
N0430 G00 Z-68.000 G40
N0440 G01 X13.265 G41

N0450 G02 X24.000 W10.000 I-6.632 K10.000 F50
N0460 G00 Z-67.900 G40
N0470 G01 X11.360 G41
N0480 G02 X23.000 W10.000 I-5.680 K10.000 F50
N0490 G00 Z-68.000 G40
N0500 G01 X9.165 G41
N0510 G02 X22.000 W10.000 I-4.582 K10.000 F50
N0520 G00 Z-68.000 G40
N0530 G01 W0.292
N0540 G01 X8.000 G41
N0550 G02 X21.000 W9.707 I-4.000 K9.707 F50
N0560 G00 Z-68.000 G40
N0570 G01 W0.835
N0580 G01 X8.000 G41
N0590 G02 X20.000 W9.165 I-4.000 K9.165 F50
N0600 G00 Z-68.000 G40
N0610 G01 W0.835
N0620 G01 X8.000 G41
N0630 G02 X20.000 W9.165 I-4.000 K9.165 F50
N0640 G00 X60.000 G40
N0650 G53 G56 T0200
N0660 G00 X235.000 Z415.000
N0670 M05
N0680 G97 S800 M04
N0690 G59 T0404
N0700 G00 X60.000 Z-68.000
N0710 X27.000
N0720 G86 X-1.000 Z-72.000 D3=1000 D4=30 D5=4000
N0730 G00 X60.000
N0740 G53 G56 T0400
N0750 G00 X235.000 Z415.000
N0760 M05 M30

Maquina la porción superior de las falanges superiores

¾4003

N0000 G53 G56 T0300
N0010 G97 S800 M04
N0020 G92 X0.000 Z258.500
N0030 G59 T0404
N0040 G00 X60.000 Z-48.662
N0050 X27.000
N0060 G86 X14.000 Z-54.752 D3=1500 D4=40 D5=4000 F80
N0070 G00 X60.000
N0080 G53 G56 T0400
N0090 G00 X235.000 Z415.000

N0100 G96 S300
N0110 G92 S2000
N0120 G59 T0202
N0130 G00 X60.000 Z-48.662
N0140 X25.000
N0150 G84 X20.000 Z-16.380 D3=500 F100
N0160 G00 X60.000
N0170 G53 G56 T0200
N0180 G00 X235.000 Z415.000
N0190 G59 T0404
N0200 G97 S800
N0210 G00 X60.000 Z-67.470
N0220 X27.000
N0230 G86 X11.000 Z-82.470 D3=1500 D4=40 D5=4000
N0240 G00 X60.000
N0250 G53 G56 T0400
N0260 G00 X235.000 Z415.000
N0270 G96 S300
N0280 G92 S2000
N0290 G59 T0202
N0300 G00 X60.000 Z-67.470
N0310 X27.000
N0320 G01 X22.890 G41
N0330 G02 X25.610 W13.720 I-11.445 K8.062 F50
N0340 G00 X27.000
N0350 Z-67.470
N0360 G01 X20.395 G41
N0370 G02 X23.410 W13.720 I-10.197 K8.062 F50
N0380 G00 X27.000 G40
N0390 Z-67.470
N0400 G01 X17.775 G41
N0410 G02 X21.165 W13.720 I-8.887 K8.062 F50
N0420 G00 X27.000 G40
N0430 Z-67.470
N0440 G01 X14.965 G41
N0450 G02 X18.870 W13.720 I-7.482 K8.062 F50
N0460 G00 X27.000 G40
N0470 Z-67.470
N0480 G01 X13.455 G41
N0490 G02 X17.690 W13.720 I-6.727 K8.062 F50
N0500 G00 X27.000 G40
N0510 Z-67.470
N0520 G01 X11.830 G41
N0530 G02 X16.490 W13.720 I-5.915 K8.062 F50
N0540 G00 X27.000 G40

N0550 Z-67.470
N0560 G01 X10.050 G41
N0570 G02 X15.265 W13.720 I-5.025 K8.062 F50
N0580 G00 X27.000 G40
N0590 Z-67.470
N0600 G01 X8.000 G41
N0610 G02 X14.000 W13.720 I-4.000 K8.062 F50
N0620 G00 X27.000 G40
N0630 Z-67.470
N0640 G01 X8.000 G41
N0650 G02 X14.000 W13.720 I-4.000 K8.062 F50
N0660 G00 X60.000 G40
N0670 G53 G56 T0200
N0680 G00 X235.000 Z415.000
N0690 G97 S800
N0700 G59 T0404
N0710 G00 X60.000 Z-67.470
N0720 X27.000
N0730 G86 X-1.000 Z-71.470 D3=1000 D4=30 D5=4000 F50
N0740 G00 X60.000
N0750 G53 G56 T0400
N0760 G00 X235.000 Z415.000
N0770 M05
N0780 M30

PROGRAMAS PARA EL CENTRO DE MAQUINADO EMCO VMC 100².

Maquina las falanges superiores.

%4009

N0000 G53 G56 T0100
N0010 G00 X285.000 Y102.000 Z148.000
N0020 G92 X214.130 Y69.592 Z55.902
N0030 M03 S1000
N0040 G59 T0101
N0050 G00 X0.000 Y-2.000 Z20.000
N0060 Z5.000
N0070 G98
N0080 G87 X0.000 Y0.000 Z-8.000 P3=2.000 P0=43.970 P1=9.000 D3=1000 D5=3 D7=1
F100
N0090 G00 Z20.000
N0100 G53 G56 T0100

² Estos programas deben ejecutarse dos veces por cada pieza.

N0110 G00 X185.000 Y102.000 Z148.000
N0120 G92 X223.955 Y69.592 Z55.902
N0130 G59 T0101
N0140 G00 X0.000 Y-12.000 Z20.000
N0150 Z5.000
N0160 G98
N0170 G87 X0.000 Y0.000 Z-26.000 P3=2.0 P0=24.317 P1=14.000 D3=1000 D5=3 D7=1
F100
N0180 G00 Z20.000
N0190 G53 G56 T0100
N0200 G00 X185.000 Y102.000 Z148.000
N0210 M05
N0220 M30

Maquina las falanges inferiores

%4010

G53 G56 T0100

G00 X285. Y102. Z148.

G92 X-33.736 Y0. Z0.

M03 S1000

G59 T0101

G00 X0. Y-6. Z20.

Z5.

G98

G87 X0. Y0. Z-8. P3=2. P0=75.408 P1=9. D3=1000 D5=3 D7=1 F100

G00 Z20.

G53 G56 T0100

G00 X185. Y102. Z148.

G92 X-8.19 Y0. Z0.

G59 T0101

G00 X0. Y-12. Z20.

Z5.

G98

G87 X0. Y0. Z-26. D3=1. P0=24.318 P1=14. D3=1000 D5=3 D7=1 F100

G00 Z20.

G53 G56 T0100

G00 X185. Y102. Z148.

G92 X-60.051 Y0. Z0.

G59 T0101

G00 X0. Y-6. Z20.

Z5.

G98

G87 X0. Y0. Z-22. P3=2. P0=22.778 P1=9. D3=1000 D5=3 D7=1 F100

G00 Z20.

G53 G56 T0100

G00 X285. Y102. Z148.

M05

M30

Apéndice C

Definición de Variables.

A continuación se muestran las variables globales del proyecto en su conjunto y de cada uno de los formularios que lo conforman.

Declaración de las variables de mayor grado de globalidad, definidas en el módulo MAXGLOBAL.BAS

*****GENERAL*****

Global Const PI = 3.1415926535

Global FORMA_ACTIVA As String 'Establece la forma activa para el despliegue de la forma variacion dinamica de variables

Global NUMERO_DE_VARIABLES As Integer

Global RESOLUCIONX, RESOLUCIONY As Integer

'((((((((((((((((((((((((((Matrices de rotación y proyección))))))))))))))))))))))))))))))))))

Global MPT(4, 4) As Single 'Matriz de proyección total

Global MPI(3, 3) As Single 'matriz de proyección intermedia

Global MPX(3, 3), MPY(3, 3), MPZ(3, 3) As Single 'Matrices de rotación canónicas

Global VIS1(3), V2S1(3), V3S1(3) As Single 'Vectores del sistema de referencia rotatorio

Global TETAM(4, 3) As Single ' Angulos de las matrices de rotación canónicas

' El primer indice indica el número de dedo.

Global TETAR(6) As Single 'Angulo de las matrices de rotación canónica para el

' el manipulador.

Global TETAX, TETAY, TETAZ As Single 'Angulos de las matrices de rotacion

Global PPUNTO(3) As Single

Global TIPO_DE_ROTACION_DE_GRAFICA As Integer ' Indica cuando se deben dibujar los
dedos

Global ANGULO1, ANGULO2, ANGULO3 As Single

Global GRAPH3D As String 'Indica cuál archivo será abierto para graficar.

'((((((((((((((((((((((((((Análisis estático))))))))))))))))))))))))))))))))))

Global ALFA(4), R(4) As Single

Global TETA, TETA1 As Single ' Angulo formado entre el eje X y la linea de acción de la fuerza

Global AN_ES_TIPO_GRAFICA_2D As String ' Indica la variable a cambiar entre iteraciones, el
modo de presentar la gráfica, etc

Global AN_ES_TIPO_GRAFICA_3D As String ' Indica las dos variables independientes, la
dependiente, el modo de graficación (uno o mas puertos)

Global AE3O4, AD1O2 As Integer ' Indica cuando se graficará el caso de 6 u 8 grados de libertad
' AD1O2 indica cuando que modelo se tomará en cuenta

Global AE2DO3D As Integer ' Indica cuando se graficará en tres dimensiones

Global TDC2DO3D As Integer 'Indica cuando se graficará en tres dimensiones

Global MC3O4 As Integer 'Indica cuando se graficará el caso de 6 u 8 grados de libertad

'((((((((((((((((((((((((((Transferencia de calor))))))))))))))))))))))))))

Global T_SUPERFICIE As Single ' Temperatura del elemento de actuación.

Global T_AIRE As Single 'Temperatura del aire

Global T_ENTORNO As Single 'Temperatura del los alrededores

Global CON_FORZADA_TRUE As Integer ' Indica si es posible hacer el cálculo de la convección forzada

'((((((((((((((((((((((((((Análisis Dinámico))))))))))))))))))))))

Global AD2DO3D As Single ' Establece el tipo de gráfica a presentar

Global TETA_ROBOT_INTER(2, 6) As Single

Global DIBUJAR_ROBOT_S_N As Integer

Global POSICION_UNO_DOS As Integer

Global T_MOV As Single

Global TETAJ(6) As Single 'Representa la posición angular de cada eje que se usará en el cálculo de la aceleración

Global TETATJ(6) As Single 'Representa la velocidad angular de cada eje que se usará en el cálculo de la aceleración

Global TETATTJ(6) As Single 'Representa la aceleración angular de cada eje que se usará en el cálculo de la aceleración

Declaración de las variables globales del formulario Análisis Dinámico, definidas en el módulo ANADIN.FRM

Dim BOTTON_STATE(5) As Integer 'Indica el estado de los botones
' de la caja de figuras

Dim NUMERO_DE_IMAGENES, IMAGEN_ACTUAL As Integer ' Indica el número
' Máximo de imagines a desplegar

Dim IMAGEN(4) As String

```
Dim COEF_DE_POL_INTERP(6, 3) As Single ' Almacena el valor de los coeficientes de los
'
'           polinomios de interpolación,
Dim NUM_DE_PO_INTER(3) As Integer ' Indica cual de los tres polinomios de interpolación
'
'           Posición, velocidad o aceleración se desplazarán.

' Dimensiones de los objetos a sujetar
Dim DIAMETRO_OB(8) As Single
Dim LARGO_OB(8) As Single
Dim ANCHO_OB(8) As Single
Dim ALTO_OB(8) As Single
Dim MASA As Single
Dim OBJETO_SELECCIONADO As String 'Indica el objeto que ha sido
'
'           seleccionado.
```

Declaración de las variables globales del formulario Análisis Estático I, definidas en el módulo ANAESTA1.FRM

```
Dim BOTTON_STATE(5) As Integer
Dim NUMERO_DE_IMAGENES, IMAGEN_ACTUAL As Integer
Dim IMAGEN(4) As String
Dim CAJA_ACTIVADA As Integer
```

Declaración de las variables globales del formulario Rotación de gráfica, definidas en el módulo ROTACIOG.FRM

```
Dim V1S2(3), V2S2(3), V3S2(3) As Single ' Vectores unitarios en el sistema rotado (2)
```

Declaración de las variables globales del formulario Transferencia de calor, definidas en el módulo TRANSF_C.FRM

Dim BOTTON_STATE(5) As Integer

Dim VECTOR_S_P(30, 30, 7) As Single

Dim NUMERO_DE_IMAGENES, IMAGEN_ACTUAL As Integer

Dim IMAGEN(4) As String

Dim T_AIRE As Single

Dim TIPO_CONV As String

Dim TIPO_GEOM As String

Dim T_ELEMENTO As Single

Dim DIAMETRO As Single

Declaración de las variables globales del formulario Cambiar_Variables, definidas en el módulo VAR_ESTV.FRM

Dim INCR(8) As Single