



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“DISEÑO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE ESCULTURA  
MÓVIL PARA OFICINA”**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECATRÓNICO  
PRESENTA:**

**IS-BOSET KEVIN BRENDAN MARTÍNEZ LÓPEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**ING. SERAFIN CASTAÑEDA CEDEÑO**

**MÉXICO, D.F.**

**NOVIEMBRE DEL 2009**

*A mis padres...*

Blanca López  
Vicente Martínez

*A las personas que más admiro en el mundo, por quienes gracias a su amor y ejemplo me han brindado mucho más que la oportunidad de tener una carrera profesional, me han obsequiado la gracia de ser una persona plena y feliz. Nunca me cansaré de agradecerles todo lo que me han enseñado, los respeto y los amo.*

*A mí hermana...*

Circe Ivette Martínez López

*Queridísima compañera de mil aventuras, pocas cosas me hacen tan feliz como pasar tiempo riendo contigo, de ti he aprendido un sin fin de cosas y espero seguir haciéndolo.  
¡Juntos toda la vida!*

*A todos los López...*

Familia de singular alegría y sabor, les estoy muy agradecido por todo el apoyo que me han dado desde que tengo memoria..

Gracias, Ita....

Gracias; Lily, Lulú, Beto, Laura, Claudia...

Gracias; Pipe, Gus, Sharon Mich, Luchis, Mariana, Diana, Ivonne, Erick, César...

Gracias a todos los López por adopción; Felipe, Ivonne, Fernando, Julio...

Gracias especiales a todos los nuevos López, esperando ver crecer a la familia.

*Y a todos los Martínez también...*

*Para todos aquellos con quienes compartí el inicio de esta aventura llamada Ingeniería...*

Muy estimados colegas, compañeros, pero sobre todo amigos y personas de basto valor humano...

Antonio Guzmán, Christian Venegas, Eduardo Navarrete, Enrique Sandoval, Jesús Romero, Jesús Vázquez, Juan Vargas, Laura E. López, Ricardo Molina, Sandra Muñiz, Uriel Rojas, Ximena Rodríguez, etc, etc, etc...

*Para toda la heroica tercera generación de Ingeniería Mecatrónica...*

*Agradecimiento especial a Arianna Sánchez...*

Compañera y amiga quien fuera un apoyo muy importante en la última etapa de este proceso, ¡muchas gracias!

---

**ÍNDICE**

<b><i>Introducción</i></b>	<b>1</b>
Definición del problema	1
Objetivo general	1
Justificación	1
<b><i>Capítulo I: Antecedentes</i></b>	<b>2</b>
1.1. Estado del arte	2
1.2. Robótica	8
1.3. Estructuras desplegadas	11
<b><i>Capítulo II: Planteamiento del problema</i></b>	<b>13</b>
2.1 Objetivos particulares	16
2.2 Alcance del proyecto	16
2.3 Perfil de diseño del producto	17
2.4 Requerimientos	18
2.5 Análisis	21
2.6 Especificaciones	40
2.6 División de los subsistemas	41
<b><i>Capítulo III: Diseño Conceptual</i></b>	<b>43</b>
3.1 Alternativas estructurales	44
3.2 Alternativas sistema Mecánico	52
3.1 Alternativas sistema de Control	56
<b><i>Capítulo IV: Diseño de Configuración</i></b>	<b>59</b>
3.1 Alternativas estructurales	59
3.2 Alternativas sistema Mecánico	61
3.1 Alternativas controlador	63

---

<b>Capítulo V: Diseño de Detalle</b>	<b>66</b>
5.1 Diseño sistema mecánico	66
5.2 Diseño de estructura	76
5.3 Diseño del controlador	91
<b>Capítulo VI: Pruebas Funcionales</b>	<b>112</b>
6.1 Relación de perfiles de velocidad entre articulaciones para las transformaciones cubo - media torre, ventana - torre y torre - cubo	113
6.2 Relación de perfil de velocidad entre articulaciones para la transformación media torre - ventana	114
<b>Conclusiones</b>	<b>116</b>
<b>Bibliografía y Referencias</b>	<b>119</b>
<b>Anexos</b>	<b>121</b>
Anexo A: Código fuente del programa del controlador	122
Anexo B: Planos	127
Anexo C: Hojas de datos	146

## Introducción

El escultor Sebastián ha creado una serie de esculturas con articulaciones capaces de adoptar diferentes formas., En este trabajo se toma una de ellas con la cual se desprenderá un diseño de automatización, que comprende un sistema adecuado a una versión a pequeña escala de la escultura *Brancusi* para cambiar la forma de la escultura en algunas de las figuras que puede desplegar sin la operación directa de alguna persona.

## Definición del Problema

Proporcionar movimiento autónomo a una escultura articulada, considerando posiciones definidas en base a las restricciones de su geometría . La escultura llamada *Brancusi* fue creada por el artista *Sebastián* y cuenta con ocho partes móviles que generan siete figuras diferentes, de las cuales se desean mostrar cuatro en intervalos de tiempo fijo.

## Objetivo General

Diseñar un sistema que mueva a la escultura en diferentes posiciones con respecto aun punto fijo utilizando componentes comerciales de tal manera que no se modifique en forma ni tamaño la estructura original de la escultura del artista, proporcionando movimientos suaves para cada una de las transformaciones.

## Justificación

Se fortalecerá el vínculo entre el arte y la tecnología por medio de la integración de elementos de ambas partes, lo que dará por resultado un producto atractivo por su innovación en diseño y funcionalidad.

Se promoverá el desarrollo de esculturas móviles en México, impulsando la difusión de la cultura y la tecnología.

# Capítulo I : Antecedentes

## 1.1. *Estado del arte*

Con el propósito de tener un panorama general para la elaboración del diseño se incluye información relacionada a tres aspectos que se consideran importantes. En primer lugar se recopila información relevante al estado del arte, dicha información permitirá tener un contexto más amplio sobre el tipo de estructura sobre la que se va a trabajar, entendiendo la obra del escultor puede hacer más sencilla la toma de decisiones. La segunda parte se refiere al contexto técnico, en la cual se investigará sobre sistemas y teoría que me sirvan para hacer propiamente el diseño. En la tercera se incluyen sistemas similares que pueden servir como referencia para el diseño.

### 1.1.1 **Arte Cinético**

El arte cinético se refiere a aquellas realizaciones cuyo principio básico es el movimiento; esta dinámica, virtual o real, mecánica, óptica o ambiental, técnica, cibernética o tecnológica, puede ser prevista por el artista o bien provocada de manera incontrolada, y origina la forma plástica de las realizaciones cinéticas; aquí se introduce el valor espacio-temporal en el núcleo del arte [1b]. Por lo tanto, interesa más en la obra cinética, el movimiento mismo que representar ese movimiento.

### 1.1.2 **Esculturas Móviles**

Las esculturas móviles tienen sus orígenes en los años treinta con los trabajos del artista estadounidense Alexander Calder, quien utilizó sus conocimientos de ingeniería en la fabricación de esculturas con movimiento [1b]. Sus obras más importantes fueron los llamados “stables” y los “mobiles” los primeros son esculturas estáticas que por su forma parecen estar en movimiento, los segundos son composiciones de placas de metal y alambres que consiguen un movimiento natural por la acción del viento. Hoy en día este tipo de estructuras son frecuentemente utilizados como juguetes para bebés.

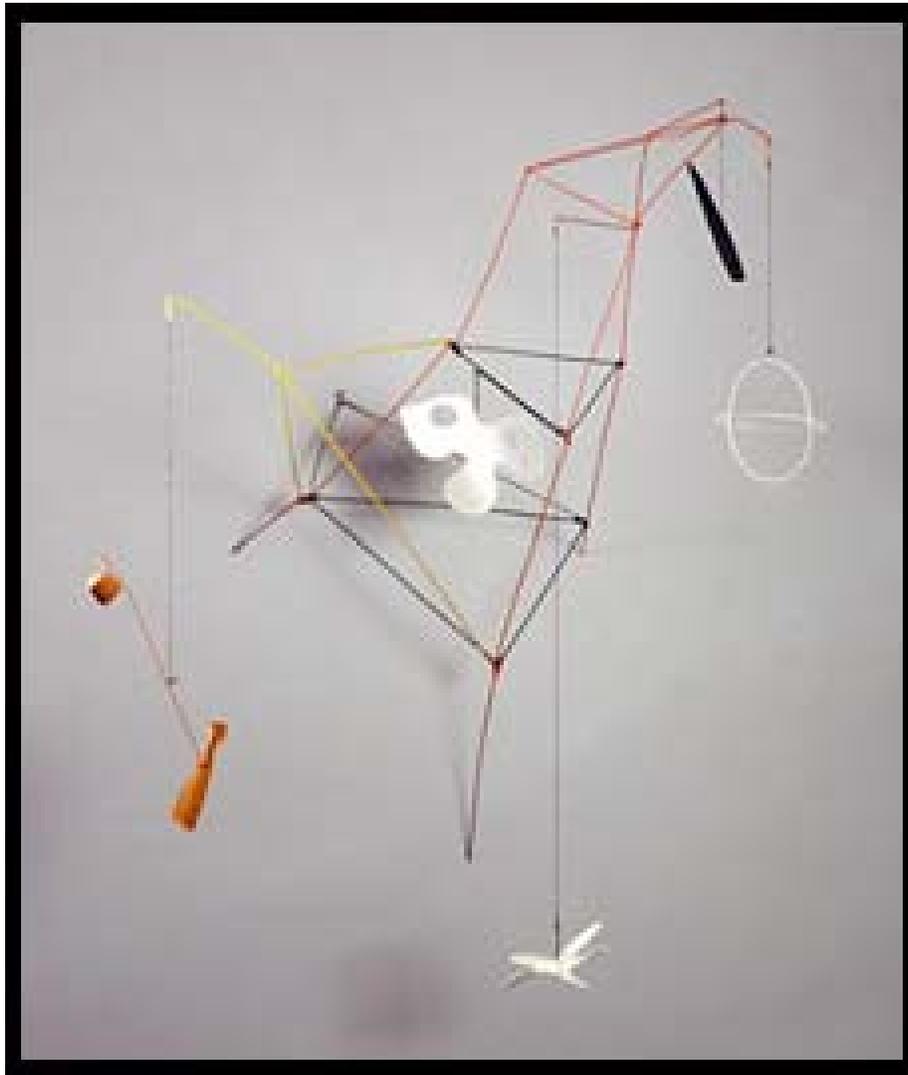


Figura 1.1 Escultura "Tower with Pinweehl" que representa el concepto de "mobile" está elaborada con placas de metal, cable pintado, madera y cuerda. Hecha por Alexander Calder.

### 1.1.3 Escultor Sebastián

Enrique Carvajal "Sebastián" nació en Chihuahua en 1947, desde su infancia mostraba gran interés en las formas geométricas, las que serían después la base de su obra [2]. Para Sebastián la obra de arte se inicia por abstraer, por resumir mentalmente lo esencial. Y lo esencial es, por la forma, geométrico.

En su adolescencia llega a la Ciudad de México para estudiar pintura en *La Academia de San Carlos*, para solventar sus gastos realizó múltiples oficios e incluso tocaba el güiro en el transporte público. El seudónimo de Sebastián lo adquiere por su gran parecido con la pintura de Botticelli del mismo nombre.

Es uno de los más reconocidos escultores mexicanos a nivel internacional, por su forma y trascendencia ha logrado un lugar para que sus obras se instalen a lo largo del globo. Su obra más conocida es quizá la *Cabeza de Caballo* en el primer cuadro de la Ciudad de México.

El mismo artista ha definido sus influencias, destacando a Henry Moore, Constantin Brancusi, Buckminster Fuller y Marcel Duchamp [2]. De esta forma surge el inconfundible estilo de Sebastián que a partir de figuras simples crea volúmenes y estos al desplazarse crean su obra.

Es innumerable la cantidad de exposiciones que ha realizado el escultor a lo largo de su vida, ha ganado premios y reconocimientos. Sus obras monumentales pueden ser vistas en muchos lugares del mundo, principalmente en Japón y los Estados Unidos.

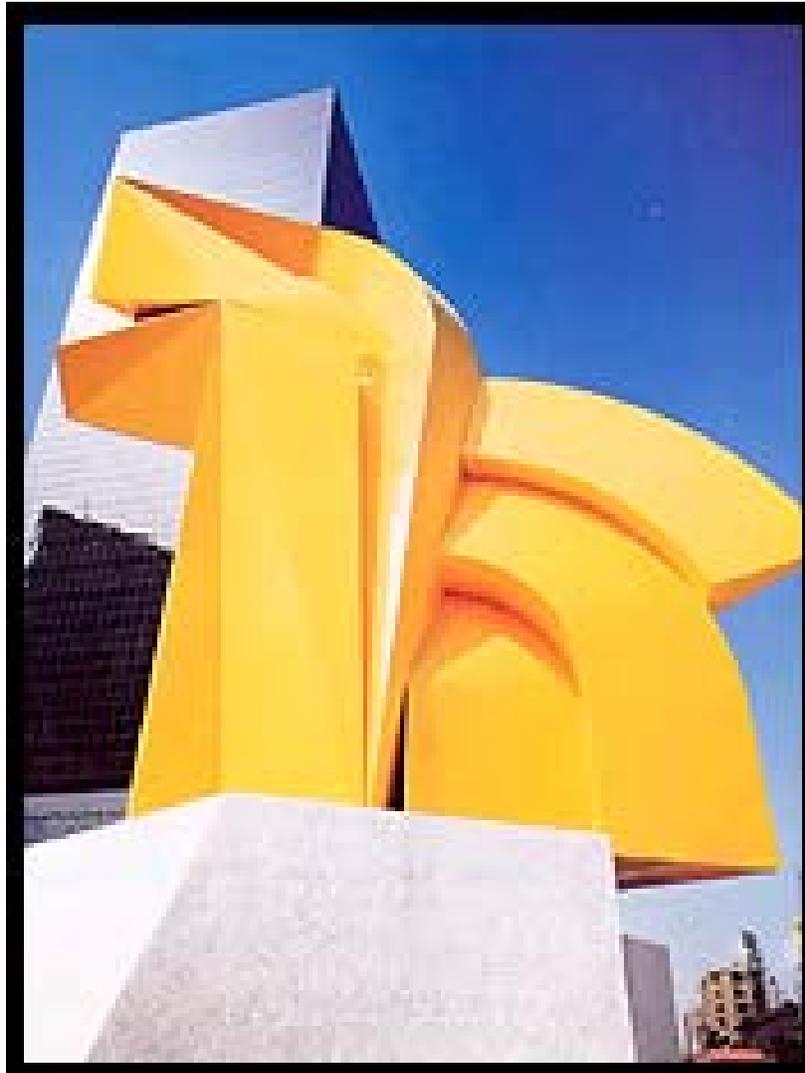


Figura 1.2 Escultura "Cabeza de Caballo", hecha por el escultor Sebastián, ubicada en la esquina de Paseo de la Reforma y Av. Juárez en la Ciudad de México.

### 1.1.4 Trabajos Anteriores

Aunque la mayoría de las esculturas móviles son impulsadas por viento, existen algunas otras que utilizan motores para conseguir el efecto de desplazamiento, en este caso realizan trayectorias sencillas como seguir el recorrido del sol. Es importante señalar que en su mayoría las esculturas móviles actuales son hechas a gran escala, es decir para exteriores. A continuación se muestran algunos ejemplos de esculturas móviles:



Figura 1.3 Escultura móvil de hierro y resina hecha por el escultor español Manuel Marín. Tiene una altura de 6 metros y es impulsada por el viento.

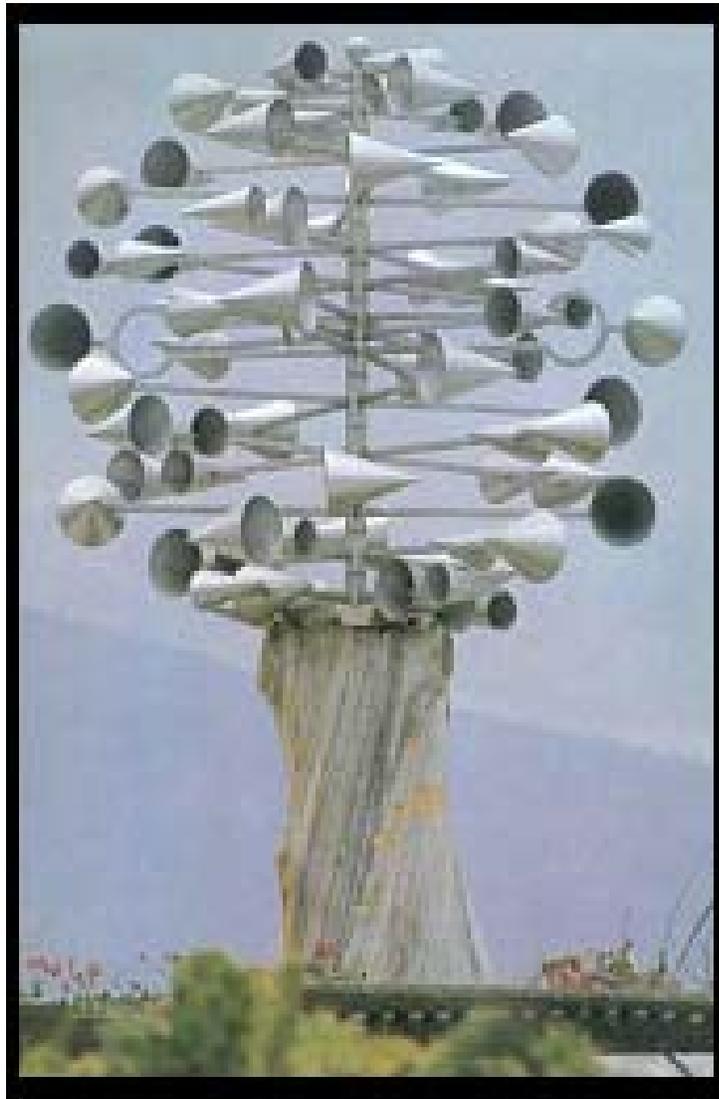


Figura 1.4 Escultura móvil de hierro y resina hecha por el escultor español Manuel Marín. Tiene una altura de 6 metro y es impulsada por el viento.



Figura 1.5 Escultura móvil automatizada, su misión es seguir una trayectoria para crear una sombra continua sobre la mesa de control.

## 1.2. Principios de Robótica

La industria moderna ha tenido un gran desarrollo gracias al uso de máquinas inteligentes, estas han permitido aumentar considerablemente los niveles de producción y reducir el riesgo en operaciones peligrosas [3]. En muchos casos se utilizan robots para el ensamble o para algún proceso particular como corte, soldadura o pintura.

No existe claramente una definición de robótica, depende del enfoque que se le dé, sin embargo son conocidos los orígenes que le dieron forma a esta importante rama de la industria [4]. El término “robot” aparece por primera vez en 1921, en la obra teatral *Rossums’s Universal Robots* del autor checo Karel Capek un cuya lengua natal la palabra “robota” significa fuerza de trabajo o servidumbre, en dicha obra discute sobre el dominio de los hombres por medio de las máquinas [5]. A partir de esa década se desarrollan numerosos dispositivos autómatas y el término se acepta rápidamente, de cualquier forma es importante señalar que el término surge asociado al concepto de producción.

### 1.2.1 Definición

Una de las definiciones más comúnmente usada es la que brinda el *Robot Institute of America* que dice: “Un robot industrial es un manipulador reprogramable con funciones múltiples, diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados variables para el desempeño de una gran diversidad de tareas” [6].



Figura 1.6. Ejemplo de robot manipulador industrial.

### 1.2.2 Robot Manipulador

Este tipo de robot es muy empleado en la industria ya que permite sustituir a máquinas que realizan una sola actividad, por sistemas capaces de realizar múltiples funciones, tal dinamismo se consigue por medio de su capacidad para reprogramarse [7]. En un sentido más formal podemos decir que un robot manipulador es: “una cadena cinemática abierta o cerrada compuesta por eslabones que interactúan entre sí mediante articulaciones, juntas o pares cinemáticos.”

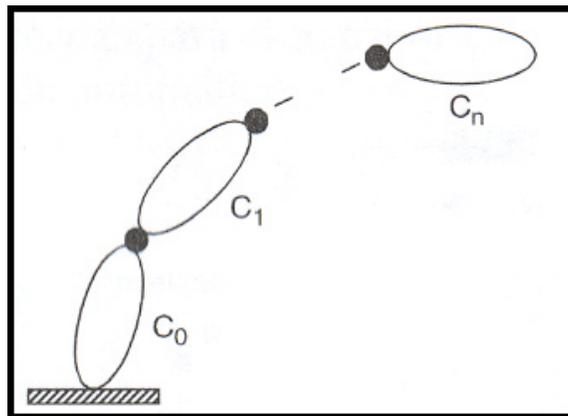


Figura 1.7 Esquema de cadena cinemática abierta

## 1.2.3 Componentes

Los robots cuentan con diferentes partes que interactúan entre sí de forma sinérgica para lograr sus objetivos. A continuación se describen sus principales componentes y como afectan el funcionamiento del mismo.

### 1.2.3.1 Sistema Mecánico

Esta compuesto por los eslabones, articulaciones y el efector final. Los eslabones están unidos por articulaciones o juntas formando una cadena cinemática y al final de está se encuentra generalmente un efector. Un manipulador es más versátil mientras tenga más eslabones, sin embargo esto complica su control. Los diferentes tipos de articulación se muestran en el siguiente cuadro:

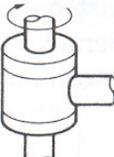
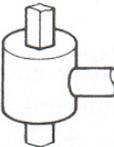
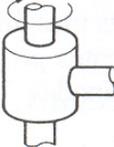
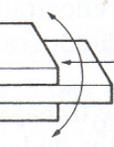
ESQUEMA	ARTICULACIÓN	GRADOS LIBERTAD
	ROTACIÓN	1
	PRISMÁTICA	1
	CILÍNDRICA	2
	PLANAR	2
	ESFÉRICA (RÓTULA)	3

Figura 1.8 Clasificación de las articulaciones de acuerdo a su geometría y restricciones que presentan.

### **1.2.3.2 Sistema de Control**

Los robots manipuladores deben seguir trayectorias, para tal fin, cada uno de sus eslabones debe realizar una secuencia determinada de movimientos. La precisión necesaria para realizar estos movimientos sincronizados es compleja y se puede obtener mediante el control *inteligente* de los actuadores.

Los movimientos de los eslabones están impulsados por actuadores quienes modifican la velocidad y posición de estos. La potencia con que un actuador realiza su labor dependerá de la señal emitida por el controlador, este a su vez se encuentra regido por la información que le brindan los sensores, una vez procesada está información, el controlador puede mandar una señal a los actuadores para corregir la posición y velocidad, de esta forma los sensores envían nuevamente información al controlando generando una retroalimentación, este proceso se repite hasta que se obtienen los valores deseados.

## **1.3. Estructuras desplegadas**

Las estructuras son empleadas normalmente para soportar su mismo peso o el de algún otro cuerpo, para estos fines, existen muchos casos en los que el espacio es una de las restricciones más importantes. Con base a articulaciones las estructuras pueden ocupar un espacio más reducido en su transportación o almacenamiento y desplegarse en su lugar de operación para cubrir mayor área o extenderse longitudinalmente.

En las siguientes imágenes se muestran algunos ejemplos de estructuras desplegadas.



Figura 1.9 La estación espacial cuenta con módulos que se despliegan cuando están fuera de la tierra.



Figura 1.10 Las sillas plegables son algunas de las estructuras desplegables más comunes.

## Capítulo II: Planteamiento del problema

En el presente capítulo se explica el funcionamiento de la estructura y de los movimientos que se pretenden realizar. Se describen los factores que son tomados en cuenta como base del diseño.

La escultura consta de ocho prismas que están conectadas entre sí mediante uniones, las cuales permiten movimiento rotacional con un solo grado de libertad entre cada pareja. Al mover estos prismas se forman 7 diferentes figuras. En la escultura original los prismas tienen una longitud de un metro en su lado más largo, para este trabajo se considera una longitud máxima de 25 cm. Los movimientos de los prismas deberán realizarse de forma autónoma. Sebastián nombró la escultura Brancusi, en honor al artista rumano Constantin Brancusi, cuya obra ha inspirado al escultor durante toda su carrera.



Figura 2.1 El escultor *Sebastián* junto a la escultura *Brancusi*.

Las ocho partes que conforman la escultura *Brançusi*, serán idealizadas como prismas triangulares, que a partir de este momento se nombrarán gajos. De esta forma se podrá definir a cada uno para ser tomado como referencia en el diseño. En la siguiente figura se muestra el nombramiento de cada gajo.

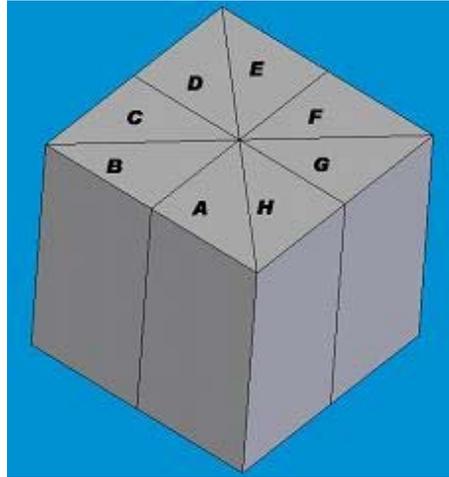


Figura 2.2 Definición de los gajos.

Las uniones de la escultura se definen en la siguiente figura:

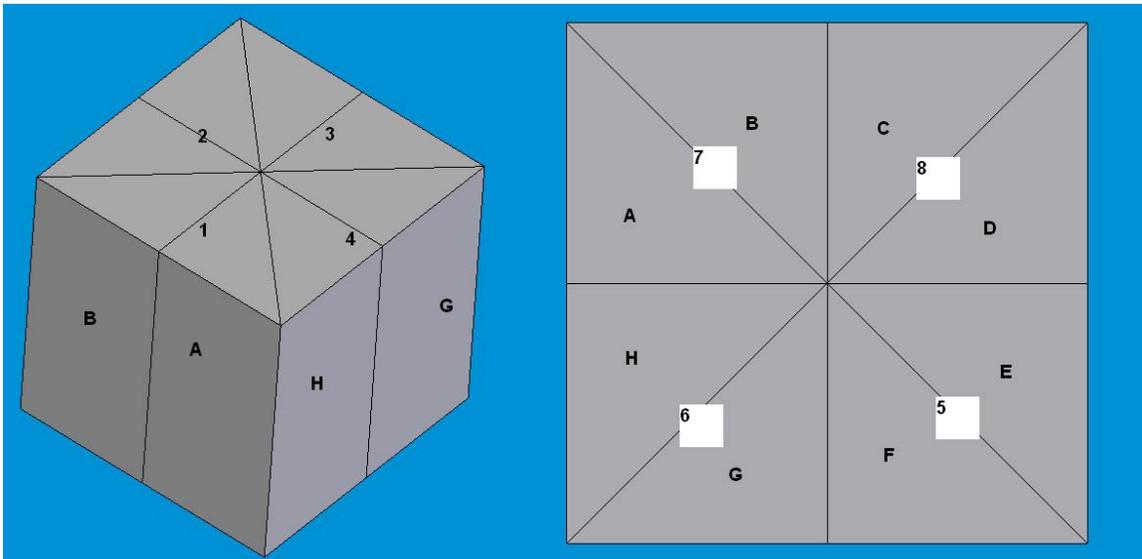


Figura 2.3 Definición de las uniones.

Aunque la escultura ofrece la oportunidad de tomar 7 figuras distintas, se consideran las 4 que a continuación se muestran para el desarrollo del desarrollo presente.

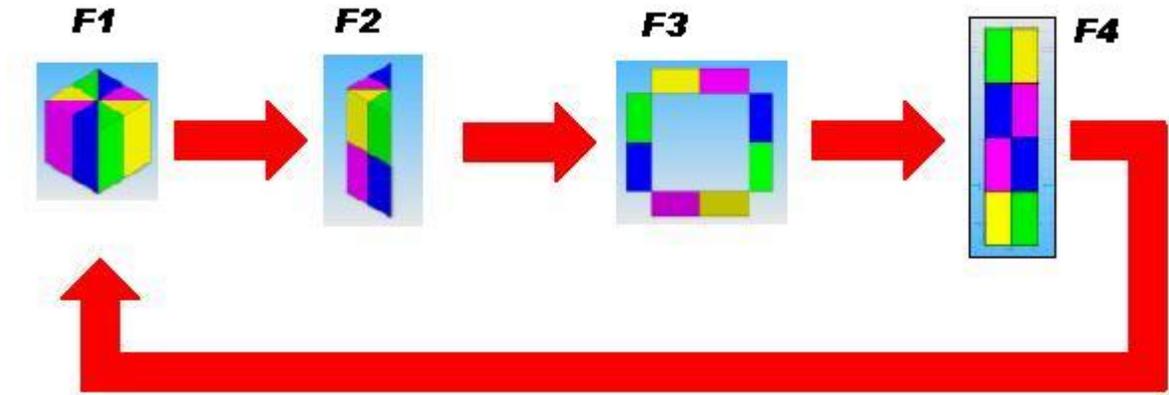


Figura 2.4 Secuencia de posiciones de la escultura.

## **2.1 Objetivos Particulares**

1. Diseñar una estructura resistente, de bajo peso y que no modifique en gran medida la geometría y dimensiones de la escultura original.
2. Seleccionar un actuador para proporcionar el movimiento de forma suave y que resista a la escultura.
3. Seleccionar un sistema de control para los actuadores.
4. Diseñar una rutina de control para los movimientos de la escultura, de tal manera que realice los movimientos programados.

## **2.2 Alcance del Proyecto**

En el presente proyecto se realizará el diseño para automatización de una escultura móvil. El proceso de diseño abarcará desde la definición del problema, obtención de requerimientos y especificaciones, diseño conceptual, diseño de configuración y pruebas funcionales. La implementación global no será parte de este reporte, quedando pendiente para trabajos futuros.

## **2.3 Perfil de diseño del producto**

Tomando como antecedente los resultados obtenidos en el trabajo “Diseño de un mecanismo de articulación y tracción para una escultura transformable de 8 eslabones” [8] y el trabajo “Automatización de una escultura móvil” [9] y de acuerdo a lo requerimientos del cliente, obtenemos los aspectos a considerarse en el diseño [10], [11], [2b], los cuales podemos definir como:

### **Aspectos Generales**

Es una escultura móvil automática para ornato de interiores, principalmente de oficinas. La escultura consta de ocho partes móviles que se desdoblán para formar figuras definidas, está deberá ser capaz por si sola de realizar los movimientos necesarios para cambiar de posición.

### **Aspectos Funcionales**

La escultura debe estar suspendida del techo del lugar donde se va a instalar. Será conectada a una fuente de potencia. El equipo contará con un interruptor de encendido y apagado, cuando este encendido el sistema enviará una señal. Al momento de encenderse iniciará una rutina de movimientos permanentemente. La rutina consta de 4 posiciones, cambiando entre una y otra a una velocidad fija.

### **Aspectos Estéticos**

El diseño de la escultura es obra del artista mexicano “Sebastián” y se desea que tanto los colores como la forma sean lo más semejantes a la escultura original, por lo tanto se intentarán reproducir en la estructura del sistema.

Los aspectos de producción, distribución y mercadeo no son considerados dentro del alcance de este trabajo, pudiendo ser retomados en algún desarrollo posterior.

## 2.4 Requerimientos

Se estudiarán diversas características que son necesarias o deseables en el sistema y se establecerá de manera cualitativa una lista que servirá para establecer las especificaciones.

**Ocupar poco espacio:** Como se pretende instalar en interiores, las dimensiones deben estar restringidas para que no ocupen demasiado espacio u obstruya considerablemente el paso o la visibilidad.

**Moverse lentamente:** Los movimientos del sistema deberán ser sutiles de acuerdo con la solicitud del artista. El trabajo del artista se caracteriza por ser de escala monumental y el ha señalado su único interés por ese tipo de esculturas, en realidad el artista ha solicitado eso para una escultura de escritorio.

**Ser resistente:** La estructura deberá sostener todo el sistema por lo que deberá resistir las cargas del peso sin sufrir deformaciones.

**Actuadores ocultos:** Los actuadores deberán interferir lo menos posible con la forma de la escultura, por tal motivo se pretende mover el sistema con actuadores que sobresalgan solamente lo necesario de la estructura general.

**Rutina definida:** Para evitar conflictos entre los actuadores, los movimientos tendrán que ser coordinados.

**Ergonomía:** Para contar con una mejor interfaz entre el usuario y el sistema se deberá desplegar de alguna manera el estatus que mantiene en determinado momento.

**Mantenimiento simple:** Se pretenderá que el sistema no requiera mantenimiento frecuentemente y que este sea realizado sin necesidad de personal especializado.

**Baja potencia:** El lugar donde se pretende instalar el sistema será en interiores, por lo que se pretenderá que el sistema sea lo mas independiente posible.

**Poco ruido:** Al instalar el sistema en un espacio interior, el ruido del funcionamiento podría interferir en las actividades del inmueble.

**Bajo costo:** El costo del sistema estará limitado por el valor de los componentes propuestos y por el presupuesto fijado del artista.

Se establecerán condiciones cuantitativas basadas en los requerimientos que permitan cumplir con las mismas, así como establecer límites y tolerancias. De esta forma se obtendrá una estrategia de diseño.

Importancia del usuario	Brancusi para oficina		Cómo											
			Dimensiones del eslabón	Par máximo de los actuadores	Momento máximo de flexión y torsión para los materiales	Rutina con posiciones distintas	Potencia de los actuadores	Intervalo de nivel de ruido	Peso de los elementos	Velocidad radial fija	longitud expuesta de la transmisión	Mostrar una señal gráfica de operación	Periodo de mantenimiento	
	Unidades	cm	Kg.cm	Kg.cm	#	kW	dB	Kg	rpm	mm	#	años		
15	Qué	Desempeño	Moverse lentamente	3	6	0	3	3	6	9	0	0	0	
10			Ser resistente	6	9	9	0	3	0	9	0	0	0	3
15			Rutina definida	0	0	0	9	0	0	0	3	0	0	0
15			Baja potencia de actuadores	6	9	3	0	9	3	9	6	0	0	0
5			Nivel bajo de ruido	0	3	0	0	3	9	3	3	0	0	0
10		Forma	Ocupar poco espacio	9	9	3	0	9	0	9	0	3	0	0
10			Geometría similar a la escultura	6	0	9	0	0	0	0	0	6	0	0
10			Actuadores ocultos	3	3	0	0	3	3	0	0	9	0	0
5		Ergonomía	Indicador de estatus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
5			Fácil mantenimiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
100		TOTALES	375	450	255	180	345	165	420	285	180	45	75	

Figura 2.5 Matriz para el diseño de escultura móvil.

La figura 2.5 muestra como la matriz QFD (Quality Function Deployment) puede ser aprovechada mediante una matriz que interrelaciona las necesidades del cliente para un producto determinado, en este caso para la automatización de la escultura. El resultado esperado de usar esta matriz es identificar los aspectos que más importancia tendrán en el diseño. Estos elementos serán, la selección de los actuadores, el peso de los elementos y las dimensiones de los eslabones. Con la definición de estos elementos, se podrán acotar las variables y empezar a obtener propuestas para después probarlas y en su caso iterar hasta llegar al resultado más óptimo.

## **2.5 Análisis**

### **Par requerido para los actuadores**

Para la apropiada selección de los actuadores es necesario realizar un análisis de cargas; de él se derivarán las características mecánicas del proyecto. Se han escogido los casos críticos de la rutina de previamente descrita.

Se ha considerado que la longitud aproximada de cada gajo es de 25 [cm] en su longitud mayor, adicionalmente, que todas las cargas se aplican en el extremo de los gajos, además de una masa total por gajo que incluye la masa de un actuador y de una estructura, lo que implica para algunos casos agregar la masa de un actuador que en realidad no existe. También se considera mover la aplicación de todas las cargas de su centroide al borde mas alejado del centro de momentos, con la intención de tener un caso más crítico. Todas las consideraciones anteriores harán el caso de estudio más crítico que el caso real; además de que se simplifican los cálculos y facilita la selección del motor y estructura.

### - Primer caso

El primer momento crítico se encuentra en la transición de la figura 1 a la figura 2, justo a la mitad de esta y está representada por la siguiente figura:

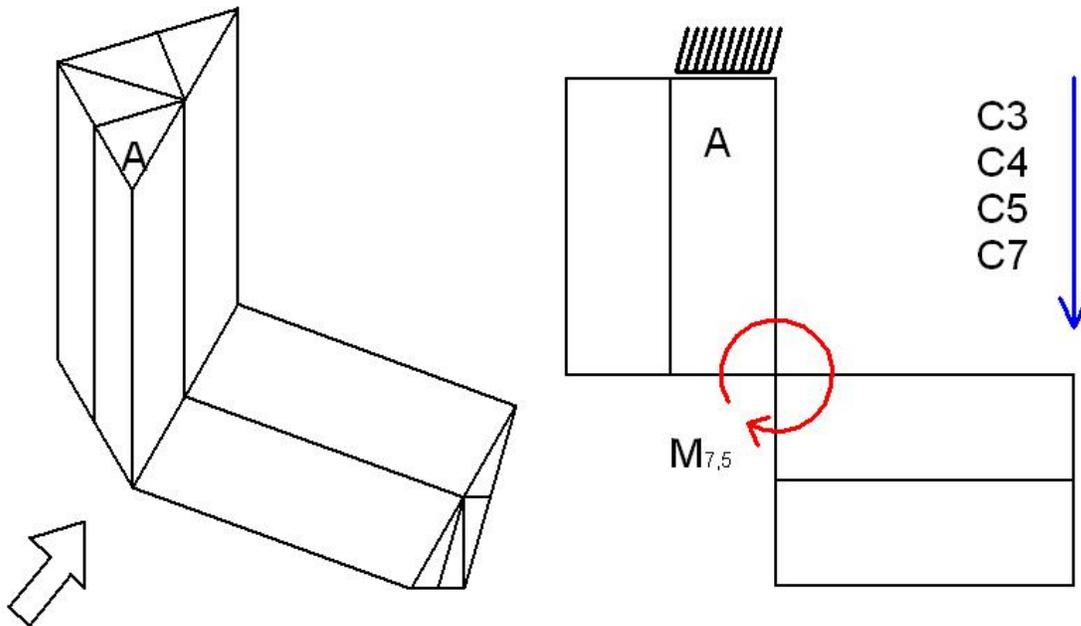


Figura 2.6 Diagrama de cuerpo libre para primer caso.

Con base a los diagramas de la figura 5.4 se obtiene la siguiente fórmula para la sumatoria de momentos sobre el eje de acción de los motores 7 y 5: Donde están colocados los motores

$$\Sigma M_{7,5} = 25[\text{cm}]C_3 + 25[\text{cm}]C_4 + 25[\text{cm}]C_5 + 25[\text{cm}]C_7$$

Como:  $C_3 = C_4 = C_5 = C_7 = CT$

Donde:

$C_3, C_4, C_5, C_7$ : son las masas correspondientes a los elementos que sostienen a los motores 3, 4, 5 y 7.

$CT$  = carga de la suma de masas de un servomotor, un arreglo mecánico y una estructura.

$$\Sigma M_{7,5} = 25[\text{cm}]CT + 25[\text{cm}]CT + 25[\text{cm}]CT + 25[\text{cm}]CT$$

$$\Sigma M_{7,5} = CT(25[\text{cm}] + 25[\text{cm}] + 25[\text{cm}] + 25[\text{cm}])$$

$$\Sigma M_{7,5} = CT(100[\text{cm}])$$

Para este caso el par resultante se distribuye entre 2 motores, por lo que el par necesario es la mitad de la sumatoria de momentos.

$$\text{PPM} = CT(50[\text{cm}]) \underline{\hspace{15em}} (1)$$

Donde PPM es el Par por motor necesario.

#### - Segundo caso

El segundo caso corresponde a la posición número 3, la cual representa un punto de mayor esfuerzo que en toda la transición de la posición 2 a 3, ya que es hasta esta que los motores se encuentran a 90 grados.

En la siguiente figura se harán dos consideraciones para hacer el caso más crítico. En la primera, tanto la carga de la masa de los actuadores como la de los gajos, se aplican en el extremo de la estructura y no en su respectivo centroide de masas. Mientras que en la segunda, se contempla la masa de un actuador extra en para los dos gajos de la extrema derecha en la que realmente sólo va uno. Con estas consideraciones se ayuda a sentar un factor de seguridad para que el cálculo del par necesario realmente sirva como referencia para la selección del servomotor.

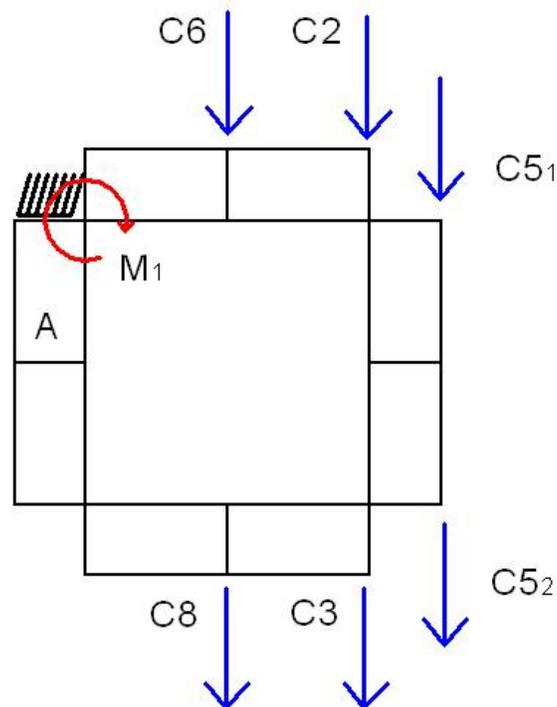


Figura 2.7 diagrama de cuerpo libre caso 2.

Con base a los diagramas de la figura 2.7 se establece la siguiente fórmula para la sumatoria de momentos sobre el eje de acción del motor 1:

$$\Sigma M_1 = 25[\text{cm}]C_6 + 25[\text{cm}]C_8 + 50[\text{cm}]C_2 + 50[\text{cm}]C_3 + 63[\text{cm}]C_{51} + 63[\text{cm}]C_{52}$$

$$\text{Como } C_6 = C_8 = C_2 = C_3 = C_{51} = C_{52} = CT$$

Donde CT = carga de la suma de masas de un servomotor, un arreglo mecánico y una estructura.

$$\Sigma M_1 = CT (25[\text{cm}] + 25[\text{cm}] + 50[\text{cm}] + 50[\text{cm}] + 63[\text{cm}] + 63[\text{cm}])$$

$$\Sigma M_1 = CT (276[\text{cm}])$$

De esta suma de momentos se divide el resultado entre 4 ya que este es el número de motores que soportan el movimiento en esta posición. Por lo que:

$$\text{PPM} = CT (69[\text{cm}]) \underline{\hspace{15em}} (2)$$

Donde PPM es el Par por motor necesario.

### - Tercer caso

La transición entre la figura 3 y 4 representa un menor esfuerzo que la posición 3 ya que el ángulo relativo que forma el eje vertical con el lado más largo del gajo B es menor al caso crítico de 90 grados. En la figura 4 las cargas prácticamente coinciden con el eje vertical que pasa por el centro de momentos por lo que casi no hay ningún momento aplicado en esa posición. Finalmente en la transición de la figura 4 a la 1 se encuentra un punto en el que los gajos A y F tienen sus lados más largos perpendicularmente. Para este caso se involucran 6 gajos, pero por la diferencia de dirección de los ejes y por ser simétrica la escultura se considera únicamente la mitad para el análisis de momentos. El

siguiente diagrama muestra una idealización de la vista que toma como centro de momentos el eje de giro sobre el vértice que une a los gajos A y H.

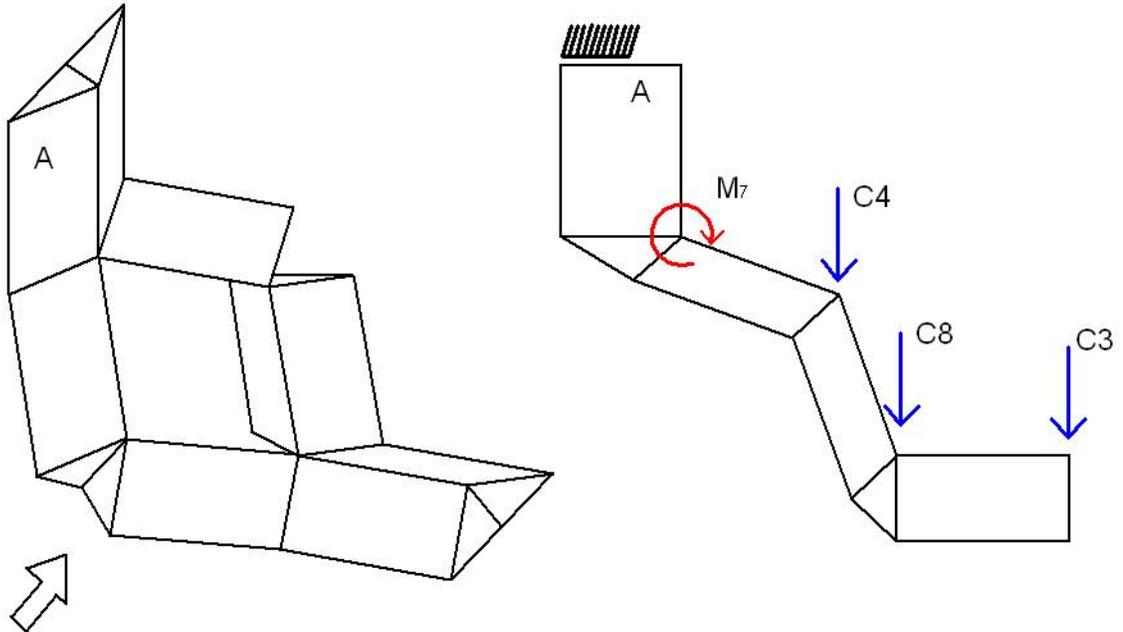


Figura 2.8 Análisis de cargas para tercer caso.

Con la finalidad de hacer más crítico el caso se ha decidido colocar la carga C3 a una distancia mayor, equivalente a si su lado más largo coincidiera con el eje horizontal. Por lo que se obtiene la siguiente fórmula para la sumatoria de momentos en el punto:

$$\Sigma M_7 = 25[\text{cm}]C_4 + 38[\text{cm}]C_8 + 63[\text{cm}]C_3$$

$$\text{Como } C_4 = C_8 = C_3 = CT$$

Donde CT = carga de la suma de masas de un servomotor, un arreglo mecánico y una estructura.

$$\Sigma M_7 = CT(25[\text{cm}] + 38[\text{cm}] + 63[\text{cm}])$$

$$\Sigma M_7 = CT(126[\text{cm}])$$

De esta suma de momentos se divide el resultado entre 3 ya que este es el número de motores que soportan el movimiento en esta posición. Por lo que:

$$\text{PPM} = CT (42[\text{cm}]) \underline{\hspace{15em}} (3)$$

Donde PPM es el Par por motor necesario.

Los resultados anteriores pueden ser comparados ya que al considerar una entidad compuesta por la masa del actuador y la estructura llamada CT, se puede establecer una relación entre ellos. De esta forma encontramos un mayor requerimiento de par en el segundo caso.

En base a la formula (2) establecemos una tabla con diferentes valores para la carga CT.

Tabla 2.1 Relación de CT contra par requerido.

<b>masa total CT (Kg)</b>	<b>par total (Kg.cm)</b>	<b>par por actuador (Kg.cm)</b>
<b>0.02</b>	5.52	<b>1.38</b>
<b>0.04</b>	11.00	<b>2.75</b>
<b>0.06</b>	16.50	<b>4.13</b>
<b>0.08</b>	22.00	<b>5.50</b>
<b>0.10</b>	27.50	<b>6.88</b>
<b>0.12</b>	33.00	<b>8.25</b>
<b>0.14</b>	38.50	<b>9.63</b>
<b>0.16</b>	44.00	<b>11.00</b>
<b>0.18</b>	49.50	<b>12.38</b>
<b>0.20</b>	55.00	<b>13.75</b>
<b>0.22</b>	60.50	<b>15.13</b>
<b>0.24</b>	66.00	<b>16.50</b>
<b>0.26</b>	71.50	<b>17.88</b>
<b>0.28</b>	77.00	<b>19.25</b>
<b>0.30</b>	82.50	<b>20.63</b>
<b>0.32</b>	88.00	<b>22.00</b>
<b>0.34</b>	93.50	<b>23.38</b>
<b>0.36</b>	99.00	<b>24.75</b>
<b>0.38</b>	104.50	<b>26.13</b>
<b>0.40</b>	110.00	<b>27.50</b>
<b>0.42</b>	115.50	<b>28.88</b>
<b>0.44</b>	121.00	<b>30.25</b>
<b>0.46</b>	126.50	<b>31.63</b>
<b>0.48</b>	132.00	<b>33.00</b>
<b>0.50</b>	137.50	<b>34.38</b>

### Cargas sobre la estructura.

La estructura deberá soportar todos los elementos del sistema, por lo cual se deberá establecer un rango de cargas sobre ella con el fin de seleccionar adecuadamente la geometría y el material.

#### - Momento Flexionante

Como el mayor momento de torsión para las articulaciones es el mayor momento de flexión para los gajos, se obtiene el caso más crítico con base en el análisis anterior para el cálculo del par requerido en los actuadores. La posición más crítica resulta ser la ilustrada en la figura 2.9. En ella se muestra el mayor momento flexionante sobre un eslabón, para hacer más crítico el caso de estudio se considera que el gajo analizado está fijo y que soporta plenamente el momento flexionante generado por la carga de la masa de los gajos.

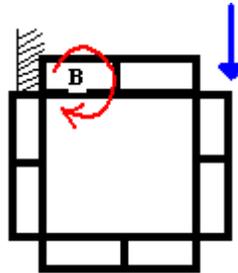


Figura 2.9 Análisis para cargas sobre la estructura.

La figura 2.10 ilustra el diagrama de cuerpo libre para el gajo B.

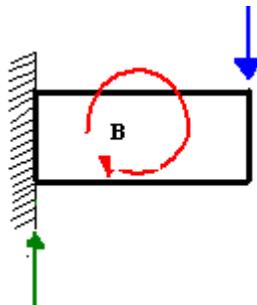


Figura 2.10 Momento de flexión sobre estructura.

Del análisis anterior se estima el par de flexión como:

$$M_f = (CT[\text{Kg}]) 276[\text{cm}]$$

Se establece un intervalo para la primera aproximación asignando valores a CT de entre 0.02 Kg y 0.5 Kg.

Para CT = 0.02 Kg

$$M_{f\text{min}} = (0.02[\text{Kg}]) 276[\text{cm}]$$

$$\mathbf{M_{f\text{min}} = 5.52[\text{Kg.cm}]}$$

Para CT = 0.50 Kg

$$M_{f\text{MAX}} = (0.5[\text{Kg}]) 276[\text{cm}]$$

$$\mathbf{M_{f\text{MAX}} = 138 [\text{Kg.cm}]}$$

#### - **Momento de torsión**

La estructura debe soportar momentos de torsión durante la transición de dos figuras. El primer momento de torsión se presenta en el cambio de la figura 2 a la 3, justo a la mitad cuando los gajos B y C, así como los gajos F y G se encuentran perpendiculares. Esta posición es ilustrada en la figura 2.11

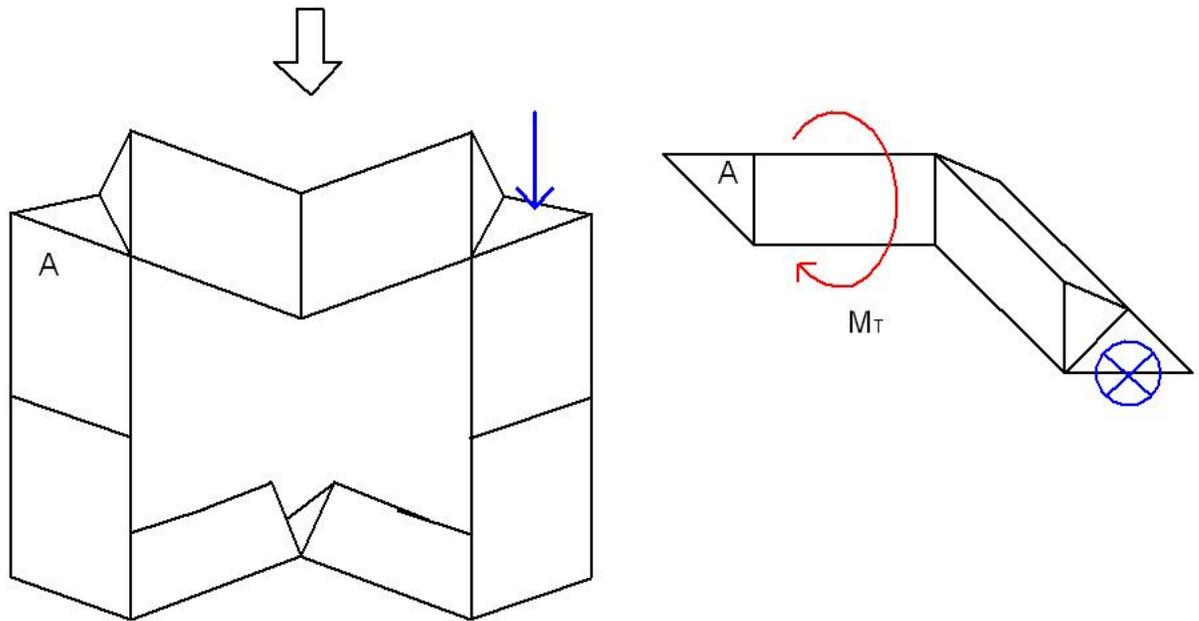


Figura 2.11 Momento de torsión sobre estructura en cambio de figura 2 a 3.

Para hacer más crítico el caso de estudio, suponemos que todas las cargas se ejercen a una distancia  $d = 25$  cm. En esta posición hay 6 gajos ejerciendo un par de torsión sobre el gajo de referencia A, por lo cual el par de torsión total se calcula como:

$$M_T = (25[\text{cm}])(6)(CT[\text{Kg}])$$

Se establece un intervalo para la primera aproximación, asignando valores a CT de entre 0.02 Kg y 0.5 Kg.

Para  $CT = 0.02$  Kg

$$M_{T\text{min}} = (25[\text{cm}])(6)(0.02[\text{Kg}])$$

$$\mathbf{M_{T\text{min}} = 3 [\text{Kg.cm}]}$$

Para  $CT = 0.50$  Kg

$$M_{T\text{MAX}} = (25[\text{cm}])(6)(0.5 [\text{Kg}])$$

$$\mathbf{M_{T\text{MAX}} = 138 [\text{Kg.cm}]}$$

El segundo momento de torsión se presenta en la transición de las figuras 4 y 1, exactamente a la mitad de esta cuando los gajos C y D así como los gajos G y H se encuentran perpendicularmente respectivamente unos de otros. Este instante se ilustra en la figura siguiente:

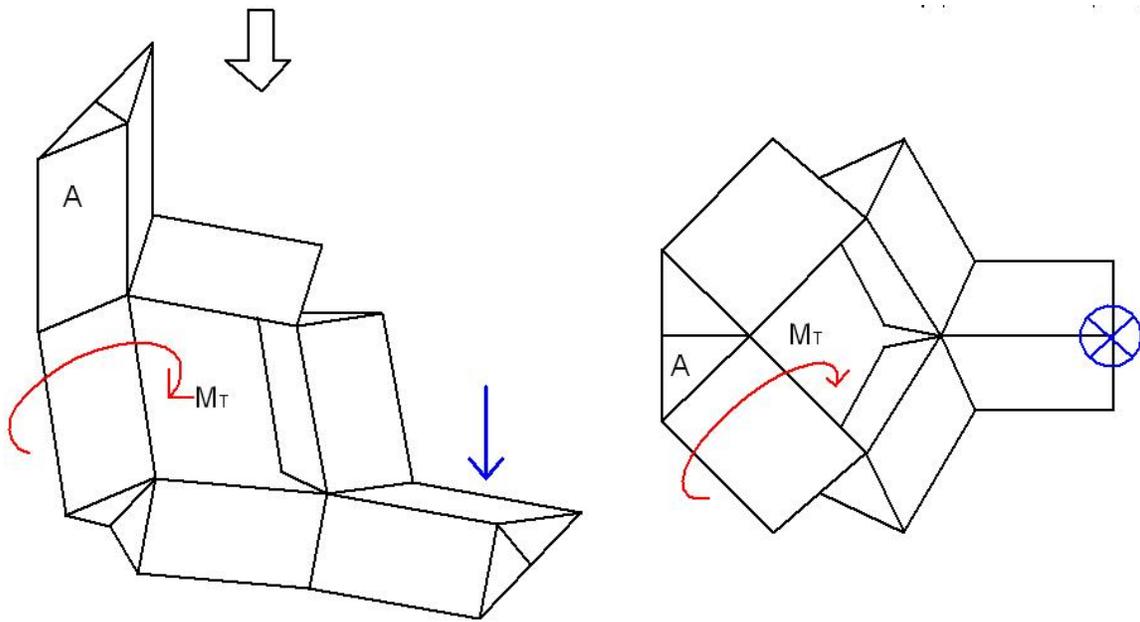


Figura 2.12 Momento de torsión sobre estructura en intervalo de figuras 4 a 1

Para los cálculos de par de torsión máximo se considerará una longitud de aplicación de la fuerza de 2 veces la longitud de los gajos, con esto se hace más crítico el caso y se simplifican los cálculos. En base a la figura 2.12 se obtiene la siguiente fórmula.

$$M_T = (50 \text{ [cm]})(2)(CT[\text{Kg}])$$

Se establece un intervalo para la primera aproximación, asignando valores a CT de entre 0.02 Kg y 0.5 Kg.

Para CT = 0.02 Kg

$$M_{T\text{min}} = (50[\text{cm}])(2)(0.02[\text{Kg}])$$

$$\mathbf{M_{T\text{min}} = 2 \text{ [Kg.cm]}}$$

Para CT = 0.50 Kg

$$M_{T\text{MAX}} = (50[\text{cm}])(2)(0.5 \text{ [Kg]})$$

$$\mathbf{M_{T\text{MAX}} = 50 \text{ [Kg.cm]}}$$

Los valores de par torsión máximo para el segundo caso resultan menores que los del primero, por lo que los valores a considerarse en las especificaciones serán los establecidos en el primer caso.

### **Cargas sobre la articulación**

Para el estudio y determinación de cargas sobre las articulaciones se considerará que el peso de todos los gajos, actuadores y arreglos mecánicos se aplican sobre una de ellas; de esta forma garantizaremos el buen funcionamiento del sistema para cualquier instante.

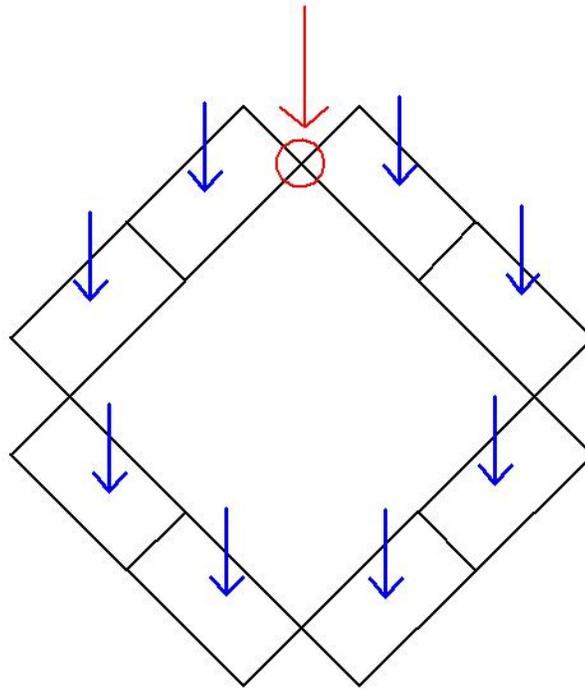


Figura 2.13 Análisis para cargas sobre la articulación

Considerando a la masa CT como la masa en conjunto del actuador, arreglos mecánicos y estructura de cada gajo; se obtiene la siguiente ecuación:

$$CA = 8(CT)$$

Donde CA es la carga sobre la articulación.

Tomando como base el intervalo de masas de la tabla 2.1, obtenemos el siguiente rango:

Para CT = 0.02 Kg

$$CA_1 = 8 (0.02 \text{ [Kg]}) = 0.16 \text{ [Kg]}$$

Para CT = 0.5 Kg

$$CA_2 = 8 (0.5 \text{ [Kg]}) = 4 \text{ [Kg]}$$

### - Momento Flexionante

Las articulaciones estarán sometidas a un momento flexionante igual al momento de torsión máximo que soporta la estructura, por lo que se considera el primer caso del análisis de momento de torsión como el máximo de flexión admisible para la articulación, la relación se muestra en la siguiente figura.

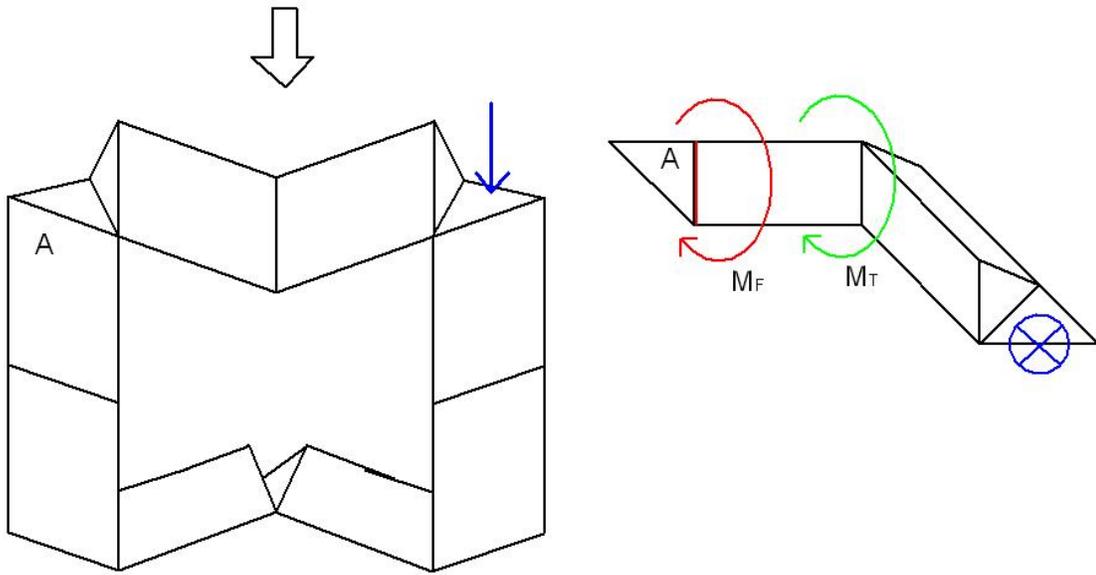


Figura 2.14 Comparación de aplicación de momentos sobre estructura y articulación

En la figura 2.14 podemos apreciar como la aplicación de la misma fuerza genera en la estructura un momento de torsión, mientras que en la articulación uno flexionante retomando los valores calculados para el momento de torsión sobre la estructura encontramos los valores para el momento flexionante sobre la articulación.

$$M_{fmin} = 3[\text{Kg.cm}]$$

$$M_{fMAX} = 138[\text{Kg.cm}]$$

#### - **Momento de torsión**

El momento de torsión que soporta la articulación es igual al calculado para el par requerido en los actuadores, de tal forma que el rango queda establecido como:

$$M_{tminA} = 1.38[\text{Kg.cm}]$$

$$M_{tMAXA} = 34.48 [\text{Kg.cm}]$$

#### **Ruido**

Se pretende instalar la escultura en interiores, por lo que estará en contacto con los usuarios en distancias relativamente cortas, dentro del mismo salón o cuarto. En la siguiente tabla se presenta una lista con los niveles de ruido asociados a situaciones y fuentes comunes.

Tabla 2.2 Niveles de ruido en diversos ambientes.

<b>Niveles Sonoros y Respuesta Humana</b>		
<b>Sonidos característicos</b>	<b>Nivel de presión sonora [dB]</b>	<b>Efecto</b>
Zona de lanzamiento de cohetes (sin protección auditiva)	180	Pérdida auditiva irreversible
Operación en pista de jets Sirena antiaérea	140	Dolorosamente fuerte
Trueno	130	
Despegue de jets (60 m) Bocina de auto (1 m)	120	Maximo esfuerzo vocal
Martillo neumático Concierto de Rock	110	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	100	Muy fuerte
Camión pesado (15 m) Tránsito urbano	90	Muy molesto Daño auditivo (8 Hrs)
Reloj Despertador (0,5 m) Secador de cabello	80	Molesto
Restaurante ruidoso Tránsito por autopista Oficina de negocios	70	Difícil uso del teléfono
Aire acondicionado Conversación normal	60	Intrusivo
Tránsito de vehículos livianos (30 m)	50	Silencio
Líving Dormitorio Oficina tranquila	40	Silencio
Biblioteca Susurro a 5 m	30	Muy silencioso
Estudio de radiodifusión	20	
	10	Apenas audible
	0	Umbral auditivo

NOTA: La tabla anterior pertenece a la *Noise Pollution Clearinghouse*, y su utilización aquí en versión traducida es gentileza de esa organización.

El nivel de potencia de ruido que se desea para este diseño es de 40[dB], que corresponde para una oficina tranquila y que es considerado como ruido moderado que no interrumpe las actividades.

## 2.6 Especificaciones

En base al análisis anterior y a las recomendaciones hechas por el escultor se definen las especificaciones generales del sistema:

Tabla 2.3 Requerimientos y especificaciones.

Variable	Cantidad	Unidades	Justificación
Longitud mayor de gajo	25	cm	Definida por el alcance del diseño
Velocidad angular	3	rpm	Definida por el artista
Peso total del sistema	de 0.16 a 4	Kg	Primera aproximación
Exposición de la transmisión	25	mm	Relación de proporción con tamaño del gajo
Número de figuras	4	#	Definida por el alcance del diseño
Indicador status	1	#	Ergonomía con el usuario
Periodo de mantenimiento	2	años	Ventaja competitiva
Par requerido por articulación	de 1.38 a 34.48	Kg.cm	Calculado en el análisis
Momento de flexión máximo para articulación	de 3 a 138	Kg.cm	Calculado en el análisis
Momento de torsión máximo para articulación	de 1.38 a 34.48	Kg.cm	Calculado en el análisis
Momento de flexión máximo para estructura	de 5.52 a 138	Kg.cm	Calculado en el análisis
Momento de torsión máximo para estructura	de 3 a 138	Kg.cm	Calculado en el análisis
Poco ruido	de 30 a 40	dB	Nivel de ruido en una oficina ordinaria

## **2.7 División de los subsistemas**

Con la finalidad de atacar los problemas de manera asilada, lo que facilita su solución, dividiré el proyecto en subsistemas que tendrán diferencias sustanciales en su funcionamiento pero que se interrelacionarán entre sí, brindando la solución general.

### **2.7.1 Estructura y forma**

En cuanto a la estructura, esta deberá sostenerse a sí misma y al sistema de tal manera que no sufra deformaciones. Es preferible que tenga el menor peso posible para hacer más fácil su manipulación.

En cuanto a forma, se pretende que sea lo más semejante posible a la escultura original, conservando proporciones y colores.

Para el diseño de la estructura se contemplaran los siguientes aspectos:

- 1) Deberá soportar los esfuerzos generados por el propio peso de la escultura, los cuales estarán relacionados con el tamaño de los actuadores y el material del propio esqueleto.
- 2) Deberá considerar a los actuadores y elementos mecánicos para modificar su geometría de tal manera que permita a los gajos formar las diferentes figuras sin interferirse unos a otros, para las figuras definidas en la secuencia de transformaciones al inicio de este capítulo.
- 3) Deberá contemplar los elementos de sujeción necesarios para los actuadores, elementos mecánicos y el recubrimiento.

### 2.7.2 Sistema Mecánico

La función principal del sistema será realizar un conjunto de movimientos consecutivos que den como resultado una rutina que despliegue las diferentes formas de la escultura.

Para el diseño del sistema mecánico deberán contemplarse los siguientes aspectos:

- 1) Los actuadores seleccionados deberán tener la capacidad de potencia necesaria para ejecutar las posiciones de la escultura definidas en el presente capítulo.
- 2) Se deberán considerar todos los arreglos mecánicos para la sujeción de los elementos de la transmisión sobre la estructura.
- 3) Todos los elementos del sistema mecánicos serán colocados dentro de la estructura, por lo que sus dimensiones deberán acoplarse a la misma.

### 2.7.3 Sistema de control

Tendrá como principal objetivo, controlar la secuencia de los movimientos de los actuadores. Comprendiendo la selección de un controlador, la lógica de control y la etapa de potencia.

Para el desarrollo del diseño se deberán considerar los siguientes aspectos:

- 1) El controlador deberá contar con la capacidad de comunicarse con el actuador seleccionado
- 2) El controlador deberá tener una memoria no volátil que mantenga la información aunque se interrumpa el suministro de corriente eléctrica.
- 3) El controlador deberá alojar en su memoria un programa lógico que realice la rutina del cambio de 4 posiciones de la escultura.
- 4) El controlador deberá contar con una fuente de alimentación independiente a la de los actuadores o bien, tener la capacidad suficiente para que funcione correctamente.

## Capítulo III: Diseño Conceptual

En este capítulo se propondrán soluciones al problema definido anteriormente. Un punto importante a seguir es el que concierne a la toma de decisiones, ya que se realizará una comparación de las opciones, ponderando algunas características que resulten convenientes para la solución del problema. En esta sección se trata de definir los principios de funcionamiento de las soluciones.

En el capítulo anterior se realizó un estudio para conocer e identificar las necesidades del cliente, en ellas centramos nuestra atención y las pretendemos satisfacer en nuestro producto. Sin embargo no todas las necesidades tienen la misma ponderación, por lo que utilizamos una metodología de diseño conocida como QFD para establecer con fundamentos los niveles de importancia para cada especificación.

### 3.1 Alternativas Estructurales

Esta sección se divide en 2 partes, la primera que comprende la estructura y forma propia de la escultura y la segunda en donde se selecciona la forma en que será sujeta la estructura al lugar de exhibición.

#### 3.1.1 Alternativas Estructura y Forma

##### Estructura con placas

Esta propuesta consiste en elaborar un esqueleto de algún material firme y luego colocar un forro para darle la forma de escultura. La estructura puede ser elaborada con algún perfil de metal como aluminio o acero; también se podría utilizar madera o algún plástico. Para el forro se pueden utilizar materiales sintéticos. Los elementos motrices se pueden asir del esqueleto de la estructura por medio de elementos de sujeción como tornillos o remaches.

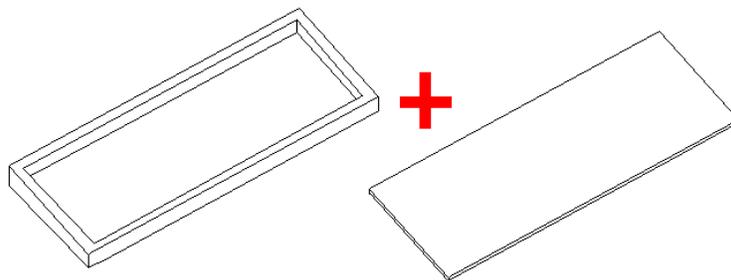


Figura 3.1 Propuesta estructural con esqueleto.

### Placas estructurales

Consiste en eliminar el esqueleto y formar la parte estructural junto con las partes que brindarán la forma de la escultura. Con este arreglo se consigue reducir el peso total, lo que brinda una mayor facilidad para la selección del actuador. Los elementos motrices deberán asirse por medio de algún pegamento ya que al carecer de esqueleto los elementos de sujeción quedarían por fuera de la estructura.

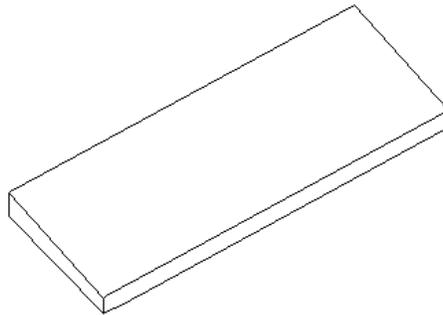


Figura 3.2 Propuesta de placas estructurales

### Cuerpo de espuma

Establece una estructura hecha a base de un polímero esponjoso que ocupe todo el espacio contenido dentro de la escultura, de esta forma dar sustento a todos los elementos mecánicos por medio de algún pegamento. Se requerirá una cubierta de algún material ligero para obtener la forma requerida.

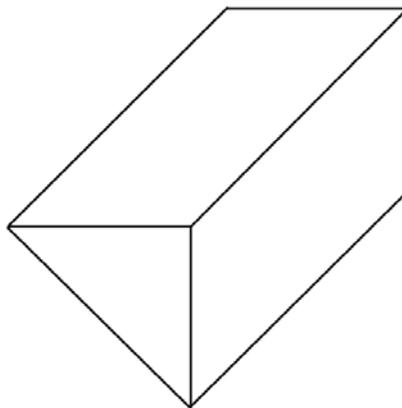


Figura 3.3 Propuesta de estructura de cuerpo de espuma.

### **Cuerpo de sólido hueco.**

En esta propuesta se considera un cuerpo sólido con el contorno con la forma de la figura de cada gajo y con un espacio vacío en el centro. La estructura debe ser fabricada con un material rígido con el grosor necesario para soportar las cargas de la escultura.

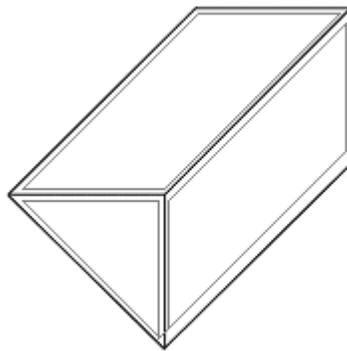


Figura 3.4 Propuesta de estructura de cuerpo de espuma.

## Evaluación y selección de Estructura

Los criterios elegidos para seleccionar la estructura es en primer lugar el peso, ya que este influirá directamente en la potencia necesaria de los actuadores. En segundo lugar la resistencia mecánica, que permitirá que la escultura se mueva sin sufrir deformaciones. En tercero está la apariencia, ya que deseamos que el modelo sea lo más parecido a la escultura original. Por último está la dificultad de fabricación, criterio que tiene la menor ponderación ya que no se requieren grandes volúmenes de producción aunque se debe tomar en cuenta para optimizar el diseño.

	Criterio	Importancia	ALTERNATIVAS			
			Esqueleto con placas	Cuerpo de espuma	Sólido hueco	Placas estructurales
1	Peso	40	=	=	+	+
2	Resistencia mecánica	20	+	=	=	=
3	Complejidad en fabricación	10	-	=	=	=
4	Apariencia	10	=	=	=	=
5	Ensamblaje con elementos	20	+	+	=	-
<b>Total +</b>			2	1	1	1
<b>Total -</b>			1	0	0	1
<b>Puntuación</b>			1	1	1	0
<b>Total de los pesos</b>			<b>30</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>20</b>

Esquema 3.1 Matriz de decisión para concepto de estructura

En las especificaciones se definió al peso como el principal eje de diseño, bajo este precepto, la propuesta del sólido hueco presenta un buen desempeño y no obtuvo ninguna calificación negativa, con lo que se presenta como la mejor opción.

### 3.1.2 Alternativas Soporte

La escultura será instalada en interiores, por lo que requiere un soporte para su instalación. En la siguiente sección se hace la propuesta para el tipo de soporte que se le puede brindar a la escultura.

#### Caja transparente

Esta propuesta consiste en encerrar la escultura en un contenedor transparente, a fin de proteger la escultura de la suciedad y otros factores que podrían interferir en el movimiento de la misma. En la base de la caja transparente se coloca otra opaca en donde se alojarán los dispositivos electrónicos. En esta configuración se tienen dos puntos de sujeción con la escultura.

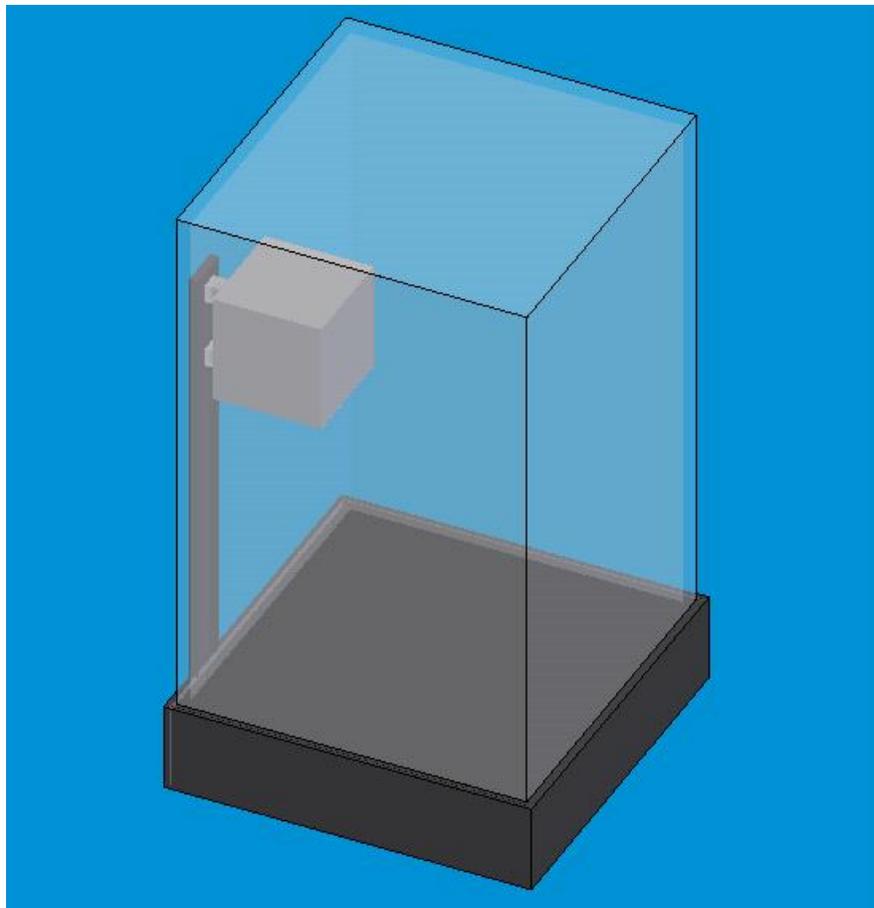


Figura 3.5 Soporte en caja transparente.

### Tubería en la pared

Esta propuesta es discreta ya que consiste en instalar tubería dentro de la pared del cuarto donde se instale la escultura, de esta forma, solamente sobresale un pequeño tramo de la escultura al techo. La conexión a la escultura es en un solo punto en la parte superior. En alguna parte de la pared se colocará una caja para contener los dispositivos electrónicos. Esta propuesta requiere una instalación especial debido a que tendrían que hacerse obras de construcción en el lugar de instalación.

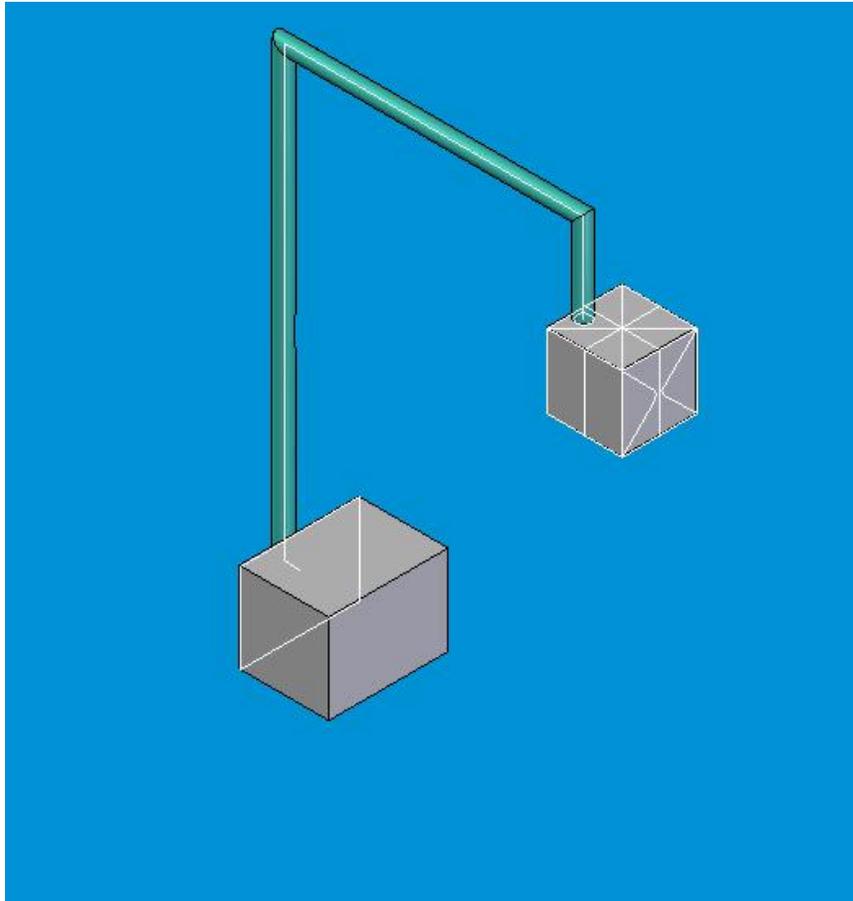


Figura 3.6 Soporte por tubería dentro del techo y la pared.

### Soporte con columna de apoyo

Esta alternativa presenta la ventaja que el soporte puede sostenerse por si mismo y puede ser colocado en diferentes posiciones. La escultura será sujeta en la parte superior y quedará suspendida para realizar sus transformaciones. En la base de la columna habrá un espacio destinado para colocar los dispositivos electrónicos.

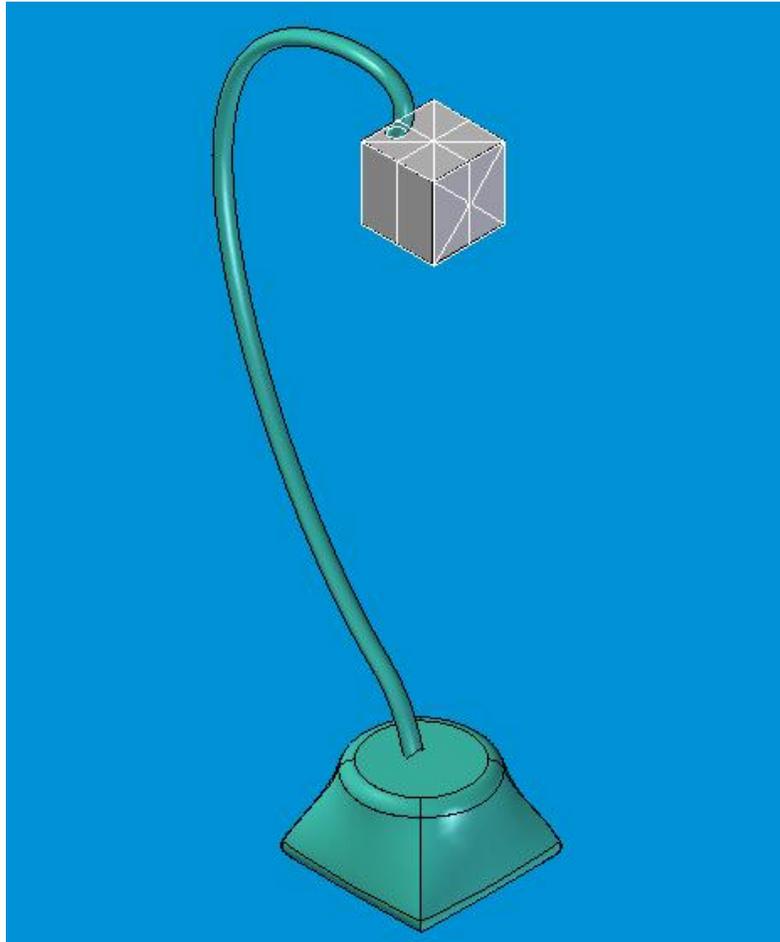


Figura 3.7 Soporte con apoyo en columna.

### Evaluación y selección del soporte para la estructura

Considerando la funcionalidad de la escultura, es deseable que la escultura sea lo más independiente posible, en este sentido se deben evitar aquellos aspectos que puedan provocar fallas en el sistema. Una limpieza inadecuada en la escultura podría causar daños mecánicos en el sistema. Una interferencia en las trayectorias de las transformaciones también podrían crear conflictos, por lo que se desea que el soporte brinde protección a la escultura. En el siguiente esquema se califican las características de cada propuesta.

		Alternativas			
	Criterio	Importancia	Caja transparente	Tubería en pared	Columna
1	Limpieza	20	+	=	=
2	Instalación	20	=	-	=
3	Protección	30	+	=	=
4	Mantenimiento	30	+	=	=
<b>Total +</b>			3	0	0
<b>Total -</b>			0	1	0
<b>Puntuación</b>			3	-1	0
<b>Total de los pesos</b>			<b>80</b>	<b>-20</b>	<b>0</b>

Esquema 3.2. Matriz de decisión para configuración de soporte.

De acuerdo al esquema anterior el soporte con caja transparente presenta las propiedades más adecuadas para el servicio que deseamos brindar, por lo tanto se propone esta opción para integrarse al sistema.

### 3.2 Alternativas Sistema Mecánico

El objetivo principal de este sistema es el de transmitir energía mecánica de los actuadores a los gajos de la escultura. La transmisión dependerá del tipo de actuador, ya que en cada caso sería necesario un tipo especial de arreglo.

#### Actuadores rotatorios con transmisión por engranes

Este arreglo se compone por una fuente motriz y una transmisión; la fuente será un actuador rotacional que impulsará un tren de engranes colocado en el interior de la estructura. Un engrane fijo en la base de otro prisma permitirá el movimiento rotacional entre los gajos.

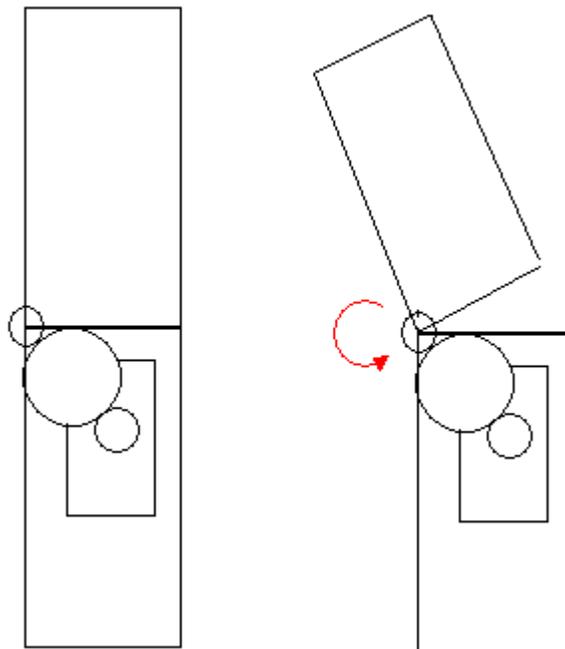


Figura 3.1 Propuesta con transmisión por engranes.

### Actuadores rotatorios con transmisión lineal

Este arreglo se compone por una fuente motriz rotacional y una transmisión lineal por medio de bandas dentadas o cadena, de un lado de la banda se coloca el actuador y del otro una polea fija que permite el movimiento rotacional.

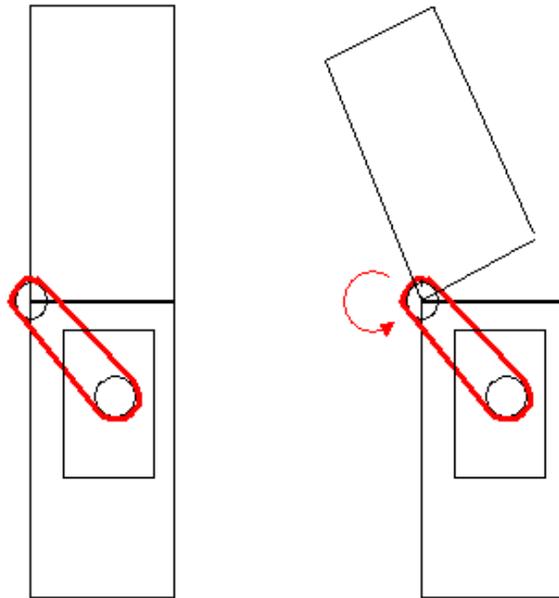


Figura 3.2 Propuesta de actuador rotacional con transmisión lineal

### Actuadores lineales con transmisión por mecanismo manivela-biela-corredera

Este arreglo se compone por una fuente motriz lineal y de un mecanismo manivela-biela-corredera, el impulso del actuador lineal se transfiere a los brazos del mecanismo que en su manivela se encuentra fija un prisma, rotando conjuntamente.

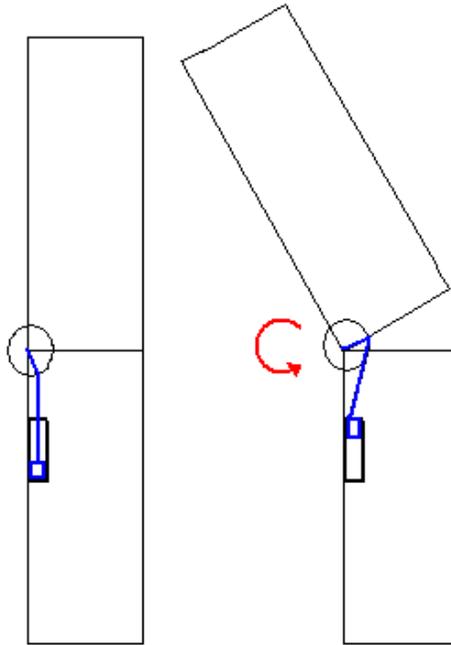


Figura 3.3 Propuesta con mecanismo manivela-biela-corredera.

### Evaluación y selección de transmisión

Los criterios considerados para seleccionar la mejor opción para este sistema incluyen: la eficiencia mecánica, fácil ensamble, la complejidad del arreglo, apariencia sobre la estructura, la compatibilidad con la estructura. Los anteriores aspectos deberán garantizar el movimiento entre gajos soportando las cargas que sean ejercidas sobre la transmisión.

	Criterio	Importancia	ALTERNATIVAS		
			Actuadores rotatorios con transmisión por engranes	Actuadores rotatorios con transmisión por bandas	Actuadores lineales con transmisión por mecanismo manivela-biela-corredera
1	Eficiencia mecánica	5	=	-	=
2	Fácil ensamblaje	10	+	=	=
3	Complejidad del arreglo	20	=	=	-
4	Peso del arreglo	30	+	=	-
5	Apariencia sobre la estructura	10	=	+	=
6	Compatibilidad con estructura	25	=	+	=
<b>Total +</b>			2	2	0
<b>Total -</b>			0	-1	-2
<b>Puntuación</b>			2	1	-2
<b>Total de los pesos</b>			<b>40</b>	<b>30</b>	<b>-45</b>

Esquema 3.3 Matriz de decisión para concepto mecánico

Los resultados de esta matriz devuelven un desempeño similar entre las propuestas de transmisión por bandas y por engranes, sin embargo al tener un número de partes y peso menor, la transmisión por engranes es considerada como la mejor opción.

### **3.3 Alternativas Sistema de Control**

#### **Microcontrolador**

Un microcontrolador es un chip en el que se incluye un microprocesador, una unidad de memoria programable, una memoria de datos y sus periféricos. Sus principales características son: bajo consumo de energía, autosuficiencia, espacio reducido (por ser sistemas embebidos) y costo relativo bajo. Existe una muy amplia variedad de microcontroladores que se distinguen por su capacidad, es decir algunos procesan la información más rápido que otros o bien trabajan con mayor cantidad de datos.

Dentro de la industria es muy común encontrarlos, sobre todo en dispositivos controlados automáticamente; control de motores, electrodomésticos, equipo de oficina, juguetes etc.

Por las características de este dispositivo, se podría programar directamente en él, la rutina de movimientos y emplear alguna de sus salidas digitales para controlar los actuadores.

#### **Componentes electrónicos**

Existe un basto número de dispositivos electrónicos que se pueden utilizar para diseñar un controlador, básicamente encontramos elementos que permiten acondicionar una señal, elementos de memoria y de potencia.

La arquitectura de control en este caso contemplaría un controlador específico de acuerdo al tipo de actuador seleccionado, una unidad de memoria en la que se almacene la rutina deseada y una etapa de potencia.

El control dependiendo del tipo de actuador, contemplaría la manipulación de una señal eléctrica para mantener o cambiar la posición, se podría retro alimentar el sistema con un sensor de posición o no dependiendo el tipo de actuador.

La rutina deberá grabada en una unidad de almacenamiento de datos, de tal forma que el controlador del actuador reciba las señales que cambien el estado del sistema. La memoria tendrá la capacidad para almacenar la rutina y de no perder la información al interrumpirse el suministro de energía.

La etapa de potencia incluye el suministro de energía para los elementos electrónicos y los actuadores, así como una etapa intermedia entre el controlador y los actuadores de ser necesario.

## **LabVIEW**

LabVIEW es un software de simulación matemática con interfaz gráfica que tiene el respaldo de muchos años de investigación y es una herramienta muy flexible cuando se le combina con una tarjeta de adquisición de datos. La versatilidad de su modo de empleo lo ha llevado a ser utilizado en múltiples aplicaciones, desde juegos para niños (programación de robots armados con LEGO®) hasta robustos sistemas de adquisición de datos y control.

Entre algunas de sus características destacan:

- 1) Posibilidad de realizar pruebas en tiempo real mediante la comparación de una simulación del proceso contra el estado real del proceso medido con un sistema de adquisición de datos.
- 2) Gracias a las librerías del software se pueden conectar y adquirir información de prácticamente cualquier instrumento, sensor, o bus de campo.
- 3) Su interfaz gráfica permite interpretar mejor los datos recibidos, de tal forma que se pueden procesar y analizar de forma sencilla con un amplio rango de herramientas.
- 4) Cuenta con la opción de crear sistemas de control mediante PLC's operados y programados desde las interfaces gráficas de programación y monitoreo.

Aplicado al problema, el software podría brindar un monitoreo en tiempo real de la posición y velocidad de los gajos, al mismo tiempo que se despliegan los datos en una

computadora. Con esta información se puede crear un control para los actuadores y tener la posibilidad de manipular algunas variables por medio de la interfaz gráfica.

### Evaluación y selección de sistema de controlador

Los criterios para la selección del controlador son los siguientes; facilidad de programación, que se refiere a la comodidad para efectuar las sintaxis de los comandos o arreglos; complejidad, que se refiere al número de componentes que conformar el controlador; ergonomía, que trata sobre la forma en que interactúa el controlador con el usuario, es decir que tan fácil es emplear las herramientas; conectividad, que se refiere a la facilidad con la que se pueden unir varios dispositivos al controlador central; uso de recursos auxiliares, referente a la cantidad y tipo de equipo adicional necesario para operar, por ejemplo fuentes de potencia o computadoras.

			ALTERNATIVAS		
	Criterio	Importancia	Microcontrolador	Componentes electrónicos	LabVIEW
1	Facilidad de programación	30	=	-	+
2	Complejidad	20	+	=	=
3	Ergonomía	5	=	-	+
4	Conectividad	15	+	=	+
5	Uso de recursos auxiliares	30	+	=	-
<b>Total +</b>			3	0	3
<b>Total -</b>			0	-2	-1
<b>Puntuación</b>			3	-2	2
<b>Total de los pesos</b>			<b>65</b>	<b>-35</b>	<b>20</b>

Esquema 3.3 Matriz de decisión para concepto de control.

## Capítulo IV: Diseño de Configuración

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo para la determinación de los componentes de cada parte del proyecto, basándonos en lo definido anteriormente, donde se estableció el diseño conceptual. Esta etapa del desarrollo se refiere a la elección de las partes que cumplan con el principio de funcionamiento del diseño conceptual.

### 4.1 Alternativas de Estructura

La estructura comprende el cuerpo que brindará sustentación a la escultura y a todos los elementos mecánicos, así como los componentes que permanecerán a la vista y darán la forma de la escultura *brancusi*.

La estructura contará únicamente con una sola capa que deberá mantener la forma de la escultura sin deformaciones visibles. La parte externa de la estructura tendrá que ser lo más fiel posible a la forma de la escultura *brancusi*, tanto en forma como en colores y textura.

#### Estructura fabricada en madera

Este material puede proveer una resistencia mecánica adecuada para soportar las cargas de la escultura, es un material relativamente ligero. Para las dimensiones de la escultura probablemente se pudiera optar por varias piezas para formar la cavidad, aunque se deberá seleccionar un método de unión adecuado para resistir las cargas.

#### Estructura fabricada en metal

Esta propuesta contempla un modelo en una sola pieza hecho con algún metal ligero, con las características propias de este tipo de material se consigue una estructura robusta, sin embargo el peso del mismo podría interferir para encontrar un actuador

apropiado. La fabricación con este tipo de material tendría que realizarse por medio de fundición con un “corazón” para obtener la concavidad deseada.

### Estructura fabricada en polímero

En esta opción se considera un material ligero para copiar el contorno de la escultura, las propiedades del material pueden ser útiles para igualar su geometría. Como existe una gran variedad de polímeros, se deberá elegir aquel que con un grosor de pared adecuado pueda soportar las cargas de la escultura.

### Evaluación y selección de estructura

En el siguiente cuadro se determina el diseño a emplear ponderando los factores más críticos del sistema.

		Importancia	Alternativas		
			Estructura de madera	Estructura de metal	Estructura de polímero
1	Peso	40	=	=	+
2	Resistencia mecánica	20	=	+	=
3	Soporte de elementos mecánicos	15	=	=	=
4	Fabricación	15	-	-	+
5	Apariencia	10	=	=	=
<b>Total +</b>			0	1	2
<b>Total -</b>			1	1	0
<b>Puntuación</b>			-1	0	2
<b>Total de los pesos</b>			-15	5	55

Esquema 4.1 Matriz de decisión para configuración de la estructura.

El principio de funcionamiento es el mismo para las tres propuestas, lo que marca una diferencia es la funcionalidad que tienen las propiedades de cada material.

La parte que aportará la mayor parte del peso a la escultura es la cubierta, por eso es esta cualidad la que se califica como la más importante. En este aspecto el polímero es el que mejor desempeño tiene y resulta como mejor opción.

Se debe considerar para la siguiente etapa de diseño los elementos de la misma que interactúan con el resto de los componentes, por ejemplo los elementos de sujeción de los elementos mecánicos, aquellas regiones donde pudiera haber colisiones de los gajos, o bien, las partes móviles del sistema.

## **4.2 Alternativas Actuadores**

En el capítulo anterior se definió el concepto para el sistema mecánico el cual requiere esencialmente de una fuente motriz. A esta se le acoplarán elementos mecánicos para transmitir la potencia y hacer girar los *gajos*. A continuación se presenta la descripción de algunos tipos de motores de tipo rotacional.

### **Servomotor**

El servomotor es un actuador eléctrico de corriente directa al cual se le controla su posición radial mediante el ancho de pulso que se le aplique. Se puede implementar este actuador junto con un arreglo de engranes para resolver el problema motriz, colocando un actuador con un tren de engranes en un gajo y uno fijo en otro gajo para que este gire sobre el eje del engrane fijo.

### **Motor de CD mas sensor**

La posición de este actuador eléctrico no se puede controlar por si sólo, porque siempre está en movimiento continuo. Para utilizarlo en este caso sería necesario colocar sensores que nos brinden información sobre la posición radial y acondicionar esta señal para crear un control que nos brinde los resultados deseados. Adicionalmente a la colocación de sensores se necesita un tren de engranes transmitir efectivamente la energía.

## Motores a pasos

El motor a pasos es un motor de corriente directa que tiene un arreglo interno de electroimanes que le permiten permanecer fijo en una posición. Para su operación se requiere enviarle una señal de control compuesta por varios pulsos. Estos pulsos pueden hacer variar su posición y su velocidad. Para la implementación en la escultura se requiere de un sensor que le indique una posición de referencia “home” para poder realizar las rutinas. Adicionalmente ser necesario colocarle un mecanismo de transmisión para hacer girar los gajos.

### Evaluación y selección de actuador rotacional.

La fuente motriz deberá ser de tipo rotacional con capacidad para control de posición radial, la cual no será en ningún caso menor a 180°. El control será implementado por un microprocesador contemplando la etapa de potencia correspondiente. Las dimensiones del motor están restringidas a las establecidas en las especificaciones de la estructura. El suministro de energía para el motor será de entre 5 y 12v. En el siguiente esquema se valúan los criterios establecidos para cada tipo de motor.

	Criterio	Importancia	Alternativas		
			Servomotor	Motor de CD	Motor a pasos
1	Control de la posición radial	40	+	-	+
2	Módulo de potencia Incluido	20	+	=	=
3	Consumo energético	10	=	=	=
4	Alta relación torque vs peso	30	+	=	=
<b>Total +</b>			2	0	1
<b>Total -</b>			0	1	1
<b>Puntuación</b>			2	-1	2
<b>Total de los pesos</b>			<b>90</b>	<b>-40</b>	<b>40</b>

Esquema 4.2 Matriz de decisión para configuración del sistema mecánico.

Aunque los tres motores pueden cumplir la función especificada, el servomotor puede resolverlo de forma más sencilla, ahorrado tiempo y recursos. Para el caso del motor de corriente directa se necesita un elemento que nos indique la posición del motor, lo que haría necesario colocar un sensor posiblemente de tipo *encoder*, además de requerir un

módulo de potencia. El motor a pasos tiene como ventaja que no emplea un sensor pero su control posición es de tipo relativo y no absoluto, por lo que el diseño de la rutina se complica, además de requerir un punto de referencia tipo *home*. El servomotor por su parte ofrece un control de posición absoluto, los modelos comerciales tienen integrada la parte de potencia y tienen una alta relación entre ligereza y torque, por lo que es el motor que mejor cumple con las necesidades del proyecto.

### **4.3 Alternativas Controlador**

#### **Microchip PIC**

Este microcontrolador es uno de los más usados debido a su gran versatilidad y sencillez de manejo. Existen diversas herramientas que permiten primero crear un programa, después simularlo y posteriormente cargarlo a la memoria interna por medio de dispositivos electrónicos especializados o incluso por medio de algún circuito que se comunica con cualquier PC por medio del puerto serial o USB. Todo esto ha hecho del PIC un dispositivo muy popular dentro de los ámbitos, profesional y amateur. Una característica que distingue al microcontrolador PIC es su capacidad para procesar datos, ya que con la estimulación adecuada puede trabajar a una frecuencia de 20 MHz. Dependiendo del modelo, se pueden tener varios puertos de entradas y salidas configurables, lo que le brinda mucha flexibilidad para diferentes aplicaciones. Adicional a sus características técnicas, esta opción tiene como ventajas los desarrollos ya realizados y la experiencia en el manejo de los mismos.

#### **NI COP8**

Es un circuito integrado fabricado por National Semiconductor [3b]. Las siglas COP8 identifican a un Procesador Orientado al Control de 8 bits. La familia de los COP se divide en cuatro grandes grupos:

- Familia Básica en Máscara: Para funciones sencillas con periféricos integrados.
- Familia Característica en Máscara: Orientada a comunicaciones.
- Familia OTP: Solamente se puede programar una vez.
- Familia S: Alto desempeño, multifuncional.

### **Motorola 68HC11**

El 68HC11 es un poderoso microcontrolador de 8 y 16 bits con un conjunto de instrucciones que comparte con microcontroladores similares a los que se les conoce como su familia. Algunas de las funciones que se pueden utilizar son: entradas y salidas digitales, temporizadores, convertidor analógico digital, generador de PWM y comunicación síncrona-asíncrona entre otros. En su modo optimizado es capaz de realizar sus operaciones en frecuencias de hasta 4 MHz. Cuenta con dos acumuladores de 8 bits nombrados "A" y "B" que pueden ser empleados como uno solo en un doble acumulador "D". Dos registros indexados de 16 bits ("X" y "Y") que permiten indexar cualquier parte del mapa de memoria, esto quiere decir que el 68HC11 tiene un buen desempeño en el procesamiento de datos. Aunque es un microprocesador de 8 bits tiene algunas funciones para 16 bits. Algunas características que maneja son:

- Poderosas instrucciones de manipulación de bits.
- Seis poderosos modos de memoria (inmediato, Extendido, Indexado, Inherente y Relativo).
- Modo de paro y espera.
- Entradas y salidas mapeadas en la memoria y funciones especiales.

### **Evaluación y selección de microcontrolador.**

El microcontrolador debe cumplir en su parte funcional con la capacidad de utilizar temporizador ya que el sistema funcionará mediante ciclos estándares de tiempo. Deberá contar con al menos 8 salidas digitales de 0 a 5 [V]. Se requiere que la velocidad de procesamiento de datos sea de al menos 4 [MHz]. El suministro de energía debe ser de 5 [v]. Para el diseño del prototipo deberá tener la capacidad de ser programado varias veces.

En la parte de hardware es recomendable utilizar elementos que ya cuenten con tecnología probada en otros desarrollos. En su etapa de desarrollo la tarjeta electrónica deberá comunicarse con una computadora para la programación del microcontrolador, una vez concluida esta etapa la tarjeta de control podrá prescindir del puerto de comunicaciones para reducir costos y recursos.

El esquema siguiente brinda la importancia considerada para cada requerimiento:

		Alternativas			
	Criterio	Importancia	Microchip PIC	NI COP 8	Motorola 68HC11
1	Programable vía PC	10	=	=	=
2	Hardware desarrollado	20	+	-	-
3	Peso	5	=	=	=
4	Conocimiento del software de programación	30	+	-	-
5	Rapidez	10	+	=	=
6	Salidas Digitales	5	=	=	=
7	Costo	5	+	=	=
8	Capacidad de uso de <i>timer</i>	15	=	=	=
<b>Total +</b>			4	0	0
<b>Total -</b>			0	2	2
<b>Puntuación</b>			4	-2	-2
<b>Total de los pesos</b>			<b>55</b>	<b>-50</b>	<b>-50</b>

Esquema 4.3 Matriz de decisión para configuración del sistema de control.

Los tres microcontroladores cuentan con características similares en cuanto a funcionamiento y desempeño; sin embargo el hecho de que exista una tarjeta construida aunada a la experiencia en el desarrollo de proyectos bajo la plataforma de Microchip, son criterios que terminaron por indicar que los microprocesadores de dicha compañía son la mejor opción.

## Capítulo V: Diseño de Detalle

En esta sección se definirá a cada uno de los elementos de los sistemas que integran al proyecto. Se definirán dimensiones y modelos específicos para los componentes.

### **5.1 Diseño Sistema Mecánico**

#### **5.1.1 Selección del servomotor**

El sistema mecánico comprende un actuador de tipo rotacional y un mecanismo transmisor de potencia en la cual se integran los elementos necesarios para transferir el movimiento rotacional del motor a cada estructura.

El mecanismo transmisor de potencia deberá transferir el movimiento rotacional de la fuente motriz a la estructura sin perder la posición relativa por medio de deslizamientos. La transmisión deberá considerar el arreglo que ofrezca una mejor ventaja mecánica.

#### **Selección del servomotor**

De los capítulos anteriores se ha determinado que el actuador a utilizar es un servomotor. Para la selección del modelo y capacidad del motor se realizarán cálculos de par máximo en las posiciones más críticas de la rutina.

En base a la formula (2) del capítulo 2 establecemos una tabla con diferentes valores para la carga CT.

Tabla 5.1 Relación de CT contra par requerido.

<b>masa total CT (Kg)</b>	<b>par total (Kg.cm)</b>	<b>par por motor (Kg.cm)</b>
<b>0.02</b>	5.52	<b>1.38</b>
<b>0.04</b>	11.00	<b>2.75</b>
<b>0.06</b>	16.50	<b>4.13</b>
<b>0.08</b>	22.00	<b>5.50</b>
<b>0.10</b>	27.50	<b>6.88</b>
<b>0.12</b>	33.00	<b>8.25</b>
<b>0.14</b>	38.50	<b>9.63</b>
<b>0.16</b>	44.00	<b>11.00</b>
<b>0.18</b>	49.50	<b>12.38</b>
<b>0.20</b>	55.00	<b>13.75</b>
<b>0.22</b>	60.50	<b>15.13</b>
<b>0.24</b>	66.00	<b>16.50</b>
<b>0.26</b>	71.50	<b>17.88</b>
<b>0.28</b>	77.00	<b>19.25</b>
<b>0.30</b>	82.50	<b>20.63</b>
<b>0.32</b>	88.00	<b>22.00</b>
<b>0.34</b>	93.50	<b>23.38</b>
<b>0.36</b>	99.00	<b>24.75</b>
<b>0.38</b>	104.50	<b>26.13</b>
<b>0.40</b>	110.00	<b>27.50</b>
<b>0.42</b>	115.50	<b>28.88</b>
<b>0.44</b>	121.00	<b>30.25</b>
<b>0.46</b>	126.50	<b>31.63</b>
<b>0.48</b>	132.00	<b>33.00</b>
<b>0.50</b>	137.50	<b>34.38</b>

La tabla 5.1 muestra que para el intervalo entre 0.02 y 0.5 Kg para CT existe un par necesario de entre 1.38 y 34.38 Kg.cm, de lo cual se busca en servomotores que entren dentro de esas características.

La tabla 5.2 muestra una lista de algunos servomotores comerciales con sus características [4b]. Se ha agregado una columna donde se hace una relación entre el peso del servomotor y el par que ofrece.

Tabla 5.2 Lista de Servomotores comerciales

Marca	Modelo	Peso		Torque @ 6 v		Relación T/P
		[oz]	[Kg]	[oz.in]	[Kg.cm]	
HiTech	HSR-5995TG	2.2	0.062	417.00	<b>29.8</b>	480
Futaba	S9252	2.1	0.063	340.00	<b>24.3</b>	385
Futaba	S3306	4.3	0.128	333.00	<b>23.8</b>	186
Cirrus	CS704MG	1.6	0.046	204.40	<b>14.6</b>	317
Futaba	S9206	2.0	0.06	133.00	<b>9.5</b>	158
Futaba*	S9252	1.7	0.05	92.40	<b>6.6</b>	132
Futaba	S3010	1.4	0.04	91.00	<b>6.5</b>	163
Futaba	S3003	1.4	0.04	57.40	<b>4.1</b>	103
Futaba	S3001	1.7	0.05	57.00	<b>4.1</b>	81
Futaba	S3151	1.4	0.04	54.00	<b>3.9</b>	96
Futaba	S9254	1.7	0.05	47.20	<b>3.4</b>	67
Futaba	S148	1.7	0.05	42.00	<b>3.0</b>	60
Futaba	S3110	0.3	0.01	25.00	<b>1.8</b>	179
Hobbico	CS-5	0.3	0.01	22.40	<b>1.6</b>	160
Futaba	S3107	0.3	0.01	16.80	<b>1.2</b>	120

\* a 4.8 [V]

En base a las tablas 5.1 y 5.2 se realiza un cuadro comparativo donde se establecen los rangos de peso y par en el cual cada motor podría funcionar para el diseño.

Rango de operación para distintos servomotores		Masa total (Kg)	Par por motor (Kg.cm)
CS-5	S3110	0.02	1.38
		0.04	2.76
	S3010	0.06	4.14
	S9252	0.08	5.52
	S9206	0.10	6.90
	Cirrus CS704MG	0.12	8.28
		0.14	9.66
	Futaba S3306	0.16	11.04
	Futaba S9252	0.18	12.42
	HiTech HSR-5990TG	0.20	13.80
		0.22	15.18
		0.24	16.56
		0.26	17.94
		0.28	19.32
		0.30	20.70
		0.32	22.08
		0.34	23.46
		0.36	24.84
		0.38	26.22
		0.40	27.60
		0.42	28.98
		0.44	30.36
		0.46	31.74
		0.48	33.12
		0.50	34.50

Figura 5.1 Rango de cumplimiento de diversos servomotores

Considerando los datos obtenidos se selecciona el servomotor de la marca Hi-Tech, modelo HSR-5995TG (la hoja de datos se encuentra incluida en el anexo C) y que además de ofrecer la mejor relación entre peso y par, ofrece un rango más amplio de operación que permite seleccionar con mayor facilidad los elementos mecánicos. A partir de este momento se consideraran las características de dicho servomotor (peso, tamaño, geometría) para el diseño de los demás sistemas.

En base a las características del fabricante se hace el modelo tridimensional del servomotor.

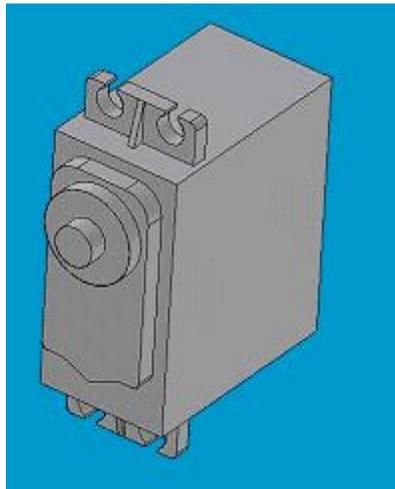


Figura 5.2 Modelo del servomotores HSR-5995TG

### 5.1.2 Diseño de la transmisión

En el segundo capítulo se analizaron las cargas y momentos a los que se somete la articulación, en base a esos datos se diseñará una transmisión mecánica, empleando en algunos casos partes comerciales .

### - Diseño de eje

Para el diseño del eje se consideran los datos obtenidos de la sección 2.5:

- a) Carga Máxima:  $CM = 4$  [Kg]
- b) Momento Flexionante Máximo:  $M_{fM} = 138$  [Kg.cm]
- c) Momento de Torsión Máximo:  $T_M = 34.48$  [Kg.cm]

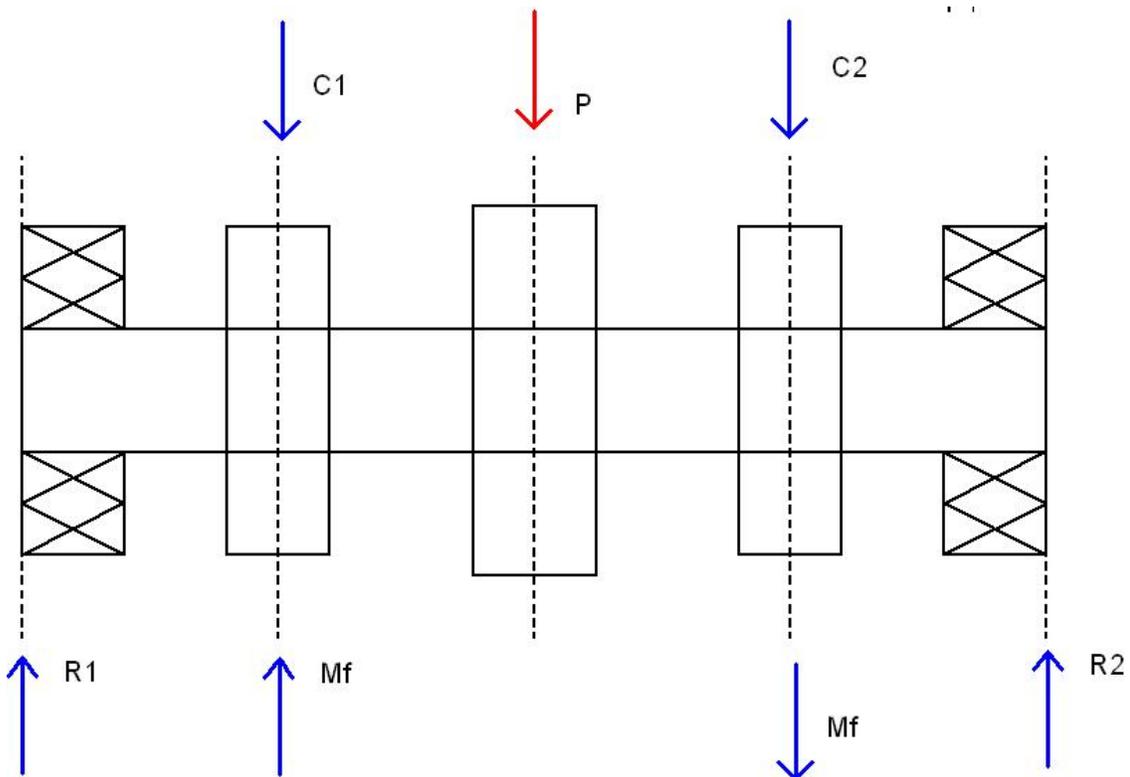


Figura 5.2, diagrama de cuerpo libre del eje.

Donde:

C1 y C2 son las cargas por el peso de todos los gajos sobre los sujetadores del eje a la estructura del gajo.

P la carga derivada del par de torsión sobre el engrane.

R1 y R2 son las reacciones en los extremos sobre los rodamientos.

Mf son las fuerzas equivalentes producidas por el momento flexionante calculado en el capítulo 2

Los datos anteriores consideran una masa unitaria CT con peso máximo de 0.5 [Kg], esta masa unitaria CT incluye el peso de un gajo, un servomotor y el arreglo mecánico de transmisión.

Utilizando el método de momento de torsión máximo [12] se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\tau = (T.c) / J$$

si  $J = (\pi .d^4)/32$  , entonces:

$$\tau = (16.T) / (\pi .d^3)$$

Donde  $\tau$  es el esfuerzo cortante permisible,  $c$  es el radio del eje,  $J$  es el momento polar de inercia y  $T$  es el momento de torsión máximo.

Manteniendo fijo el par de torsión y proponiendo un eje de 0.4 cm de diámetro se obtiene el siguiente esfuerzo:

$$\tau = (16)(35[\text{Kg.cm}]) / (\pi .(0.4[\text{cm}])^3)$$

$$\tau = 2785 [\text{Kg/cm}^2]$$

Por lo que se requiere un material con un esfuerzo máximo de fluencia mayor a 2785 [Kg/cm<sup>2</sup>]

Se comparan dos tipos de material para seleccionar uno. El primero es el acero 1070 rolado en frío que cuenta con un esfuerzo máximo de fluencia de 5050 [kg/cm<sup>2</sup>] y una densidad aproximada de 7.6 [g/cm<sup>3</sup>]. El segundo material es la aleación de Aluminio 6061-T91 que cuenta con esfuerzo máximo de fluencia de 4030 [Kg/cm<sup>2</sup>] y una densidad de 2.8 [g/cm<sup>3</sup>]

El acero presenta mejores propiedades mecánicas pero es más denso que el aluminio; este por su parte además de cumplir con el requerimiento de esfuerzo máximo, tiene una densidad baja, lo que a su vez se traduce en menor peso para el sistema. Basándonos en los puntos estratégicos del diseño, que establecen al peso como uno de los principales referentes, se propone como material para el eje la aleación de aluminio 6061-T91, esta aleación tiene un tratamiento térmico para endurecerlo y otro posteriormente liberar esfuerzos con lo que se logra que el material se vuelva mucho mas duro y menos quebradizo que el simple 6061. Dentro de la gama de aleaciones 6061 el

material propuesto es uno de los que presenta mayor esfuerzo máximo de fluencia, debido a los tratamientos y trabajos sobre él [13].

#### - Selección de engranes

Para la selección del engrane se tomará en cuenta el par de torsión máximo calculado en el capítulo 2 y la velocidad angular especificada. Con ambos valores se obtiene un valor para la potencia que debe soportar el engrane.

En el capítulo 2 se determinó que el par máximo de torsión es de 34.48 [Kg.cm] y que la velocidad angular es de 3 [rev/min], empleando la fórmula para potencia:

$$P = T \cdot \omega$$

$$P = 34.48 \text{ [Kg.cm]} (1/100) \text{ [m/cm]} 9.79 \text{ [m/s]} 3 \text{ [rev/min]} (1/60) \text{ [min/s]}$$

$$P = 0.17 \text{ [w]}$$

En base a esta potencia, a las dimensiones del servomotor elegido y a que no se considera un tren de engranes sino dos engranes del mismo número de dientes que irán colocados, uno sobre el eje de transmisión y otro sobre el servomotor; se propone un engrane comercial de la marca HPC. El catálogo del proveedor está incluido en la sección de anexos [5b]. Las características principales del engrane son:

No. de parte: G0.5-53

Máxima potencia admisible: 41 [W]

Tipo: Recto (aunque el engrane tipo helicoidal es más silencioso, las cargas axiales podrían desalinearse a los engranes)

No. dientes: 53 (impar para reducir desgaste)

Diámetro: 27.50 [mm]

Diámetro de paso: 26.50 [mm]

Ancho de engrane: 6 [mm]

Orificio central: 6 [mm]

Material: Acero 214M15



Figura 5.3 Engranajes helicoidales marca HPC.

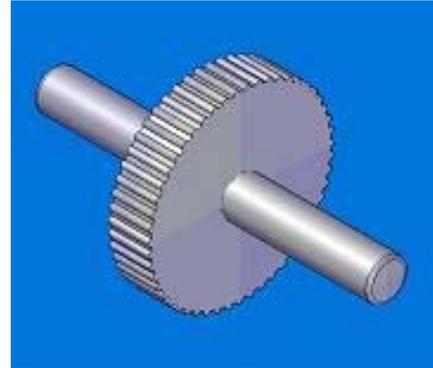


Figura 5.4 Modelo de engrane seleccionado.

#### - Conector de engrane con servomotor

Para que el servomotor pueda transferir la potencia motriz requiere un engrane de las mismas características del que fue seleccionado. Como el servomotor es un producto comercial cuenta con un piñón estándar de fábrica. En esta sección se propone el diseño de una pieza que permite acoplar el engrane con el servomotor.

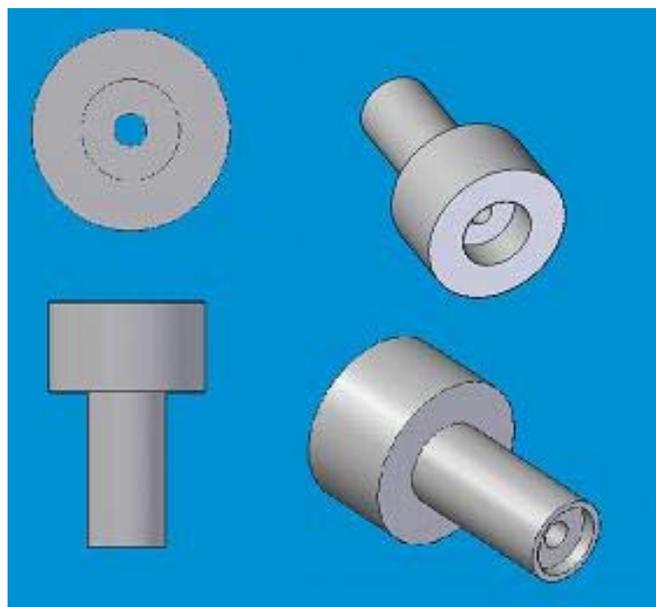


Figura 5.5 modelo de la pieza sujetadora de engrane y servomotor.

El ensamble con el servomotor se muestra en las siguientes figuras

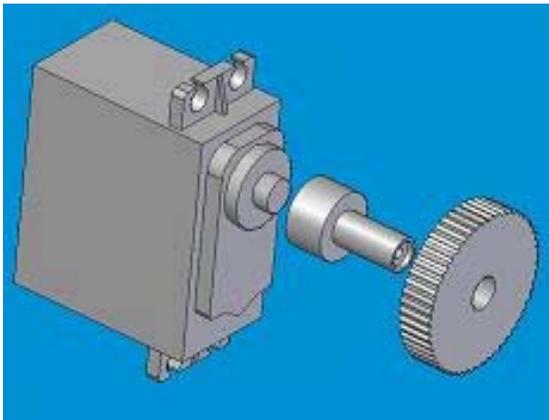


Figura 5.6 piezas para ensamble de servomotor

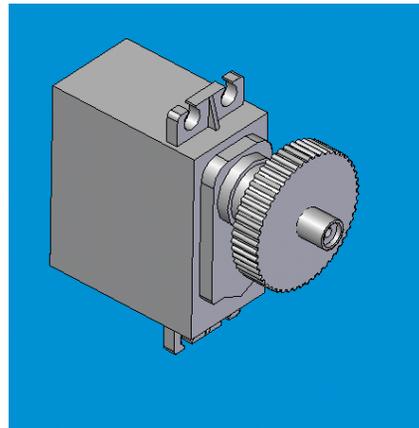


Figura 5.7 Ensamble completo de servomotor

Finalmente el ensamble general del sistema mecánico es como se muestra en la siguiente figura.

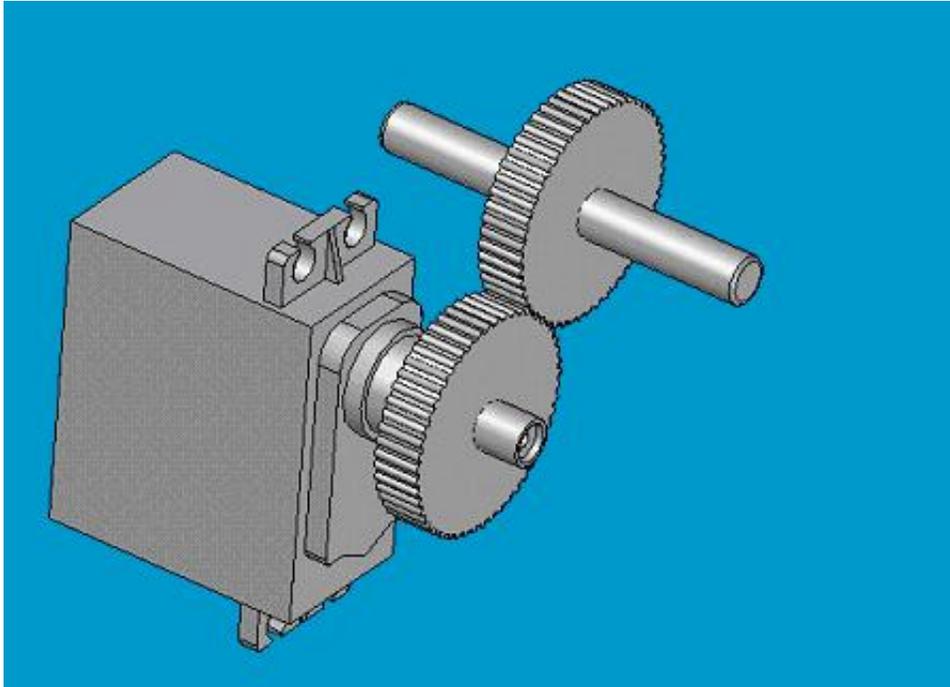


Figura 5.8 Ensamble de servomotor y eje de rotación.

En el Anexo B, se muestran los planos generales donde se aprecia el ensamble de los elementos de transmisión.

## **5.2 Diseño de Estructura**

Los sistemas interactúan entre sí de forma sinérgica, en particular la estructura y el sistema mecánico; que se encuentran vinculados por el peso de ambos con la potencia requerida para los motores. Para este fin se debe definir alguna de las variables con el propósito de obtener propuestas y posteriormente validarlas. Tomando en consideración las dimensiones de los elementos seleccionados anteriormente, se diseñará un modelo tridimensional en el cual se compruebe que no existe interferencia física entre los elementos en todas las posiciones de la rutina.

### 5.2.1 Diseño de gajos

En esta sección se hará una propuesta en la que se respete la forma original de la escultura, considerando las figuras que puede adoptar la misma, de tal manera que los actuadores puedan ser localizados sin colisionar con las demás partes.

La propuesta comprende el diseño de los 8 gajos que componen la escultura, los espacios adecuados para la ubicación del servomotor, sujetador de servomotor y transmisión. Para empezar se modela un cuerpo con la silueta de los gajos de la escultura sin ningún tipo de arreglo, con el objetivo de probar mediante el método de análisis finito algunos materiales y espesores de las paredes. Posteriormente con los elementos del sistema de transmisión modelados, se harán los arreglos necesarios a la geometría para que se respeten las dimensiones de los elementos motores.

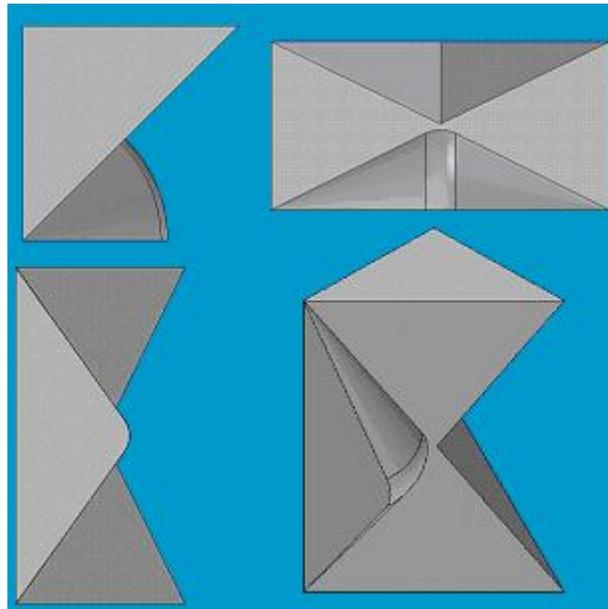


Figura 5.9 Modelo de la estructura básica común.

Se nombra a los diferentes gajos con el fin de identificarlos en las posiciones en que interactúan unos con otros.

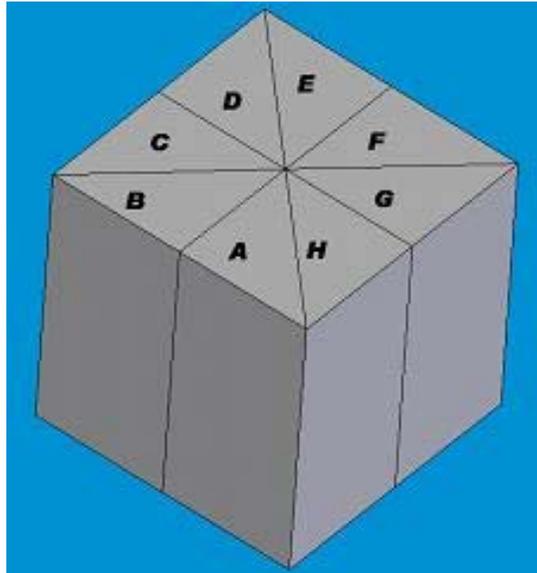


Figura 5.10 Nombramiento de los gajos.

De acuerdo a las diferentes posiciones de la escultura, será necesario que el sistema de transmisión se encuentre geométricamente dispuesto para no interferir en cualquiera de las figuras. La forma de los gajos en la escultura original es idéntica en los 8 gajos, sin embargo para este diseño el sistema mecánico tendrá que ocupar un espacio físico en la superficie de cada gajo y dado que las diferentes posiciones de la escultura generan diferentes requerimientos geométricos, el diseño de cada gajo se realizará independientemente.

Para encontrar los puntos en los cuales cada gajo interfiere con otros se considera que cada gajo tiene dos movimientos relativos con dos gajos (figura 5.11) y además que tiene dos posiciones en los cuales es cubierto por otros gajos. (figura 5.12)

Las dimensiones y geometrías se encuentran detalladas en los planos del Anexo B.

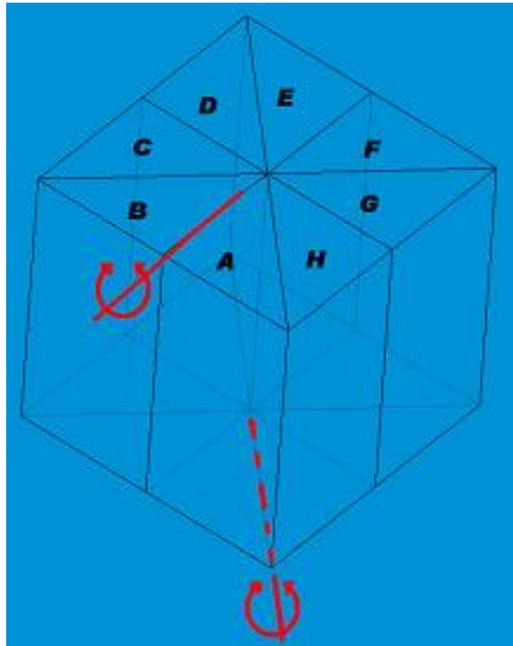


Figura 5.11 Rotación relativa de los gajos, en este caso los gajos B y H tienen movimiento relativo con el gajo A.

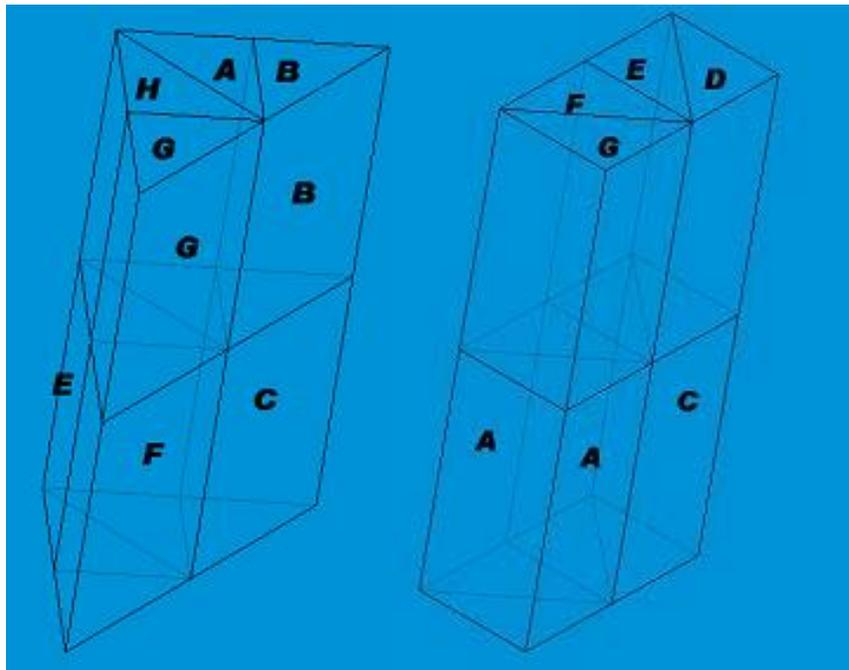


Figura 5.12 Interacción entre gajos en diferentes posiciones, en este caso se ilustra como el gajo A se junta en diferentes figuras con los gajos D, E, F y G.

- Gajo A

El gajo "A" tiene movimiento relativo con respecto a los gajos "H" y "B", así como intersecciones con los pares de gajos "E-F" y "D-E"

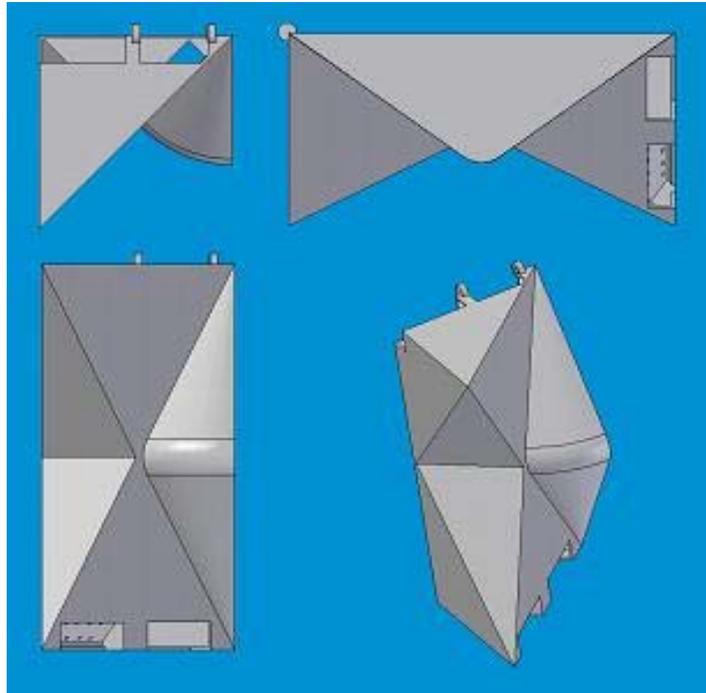


Figura 5.13 Diseño de gajo A.

- Gajo B

El gajo "B" tiene movimiento relativo con respecto a los gajos "A" y "C", así como intersecciones con los pares de gajos "E-F" y "F-G"

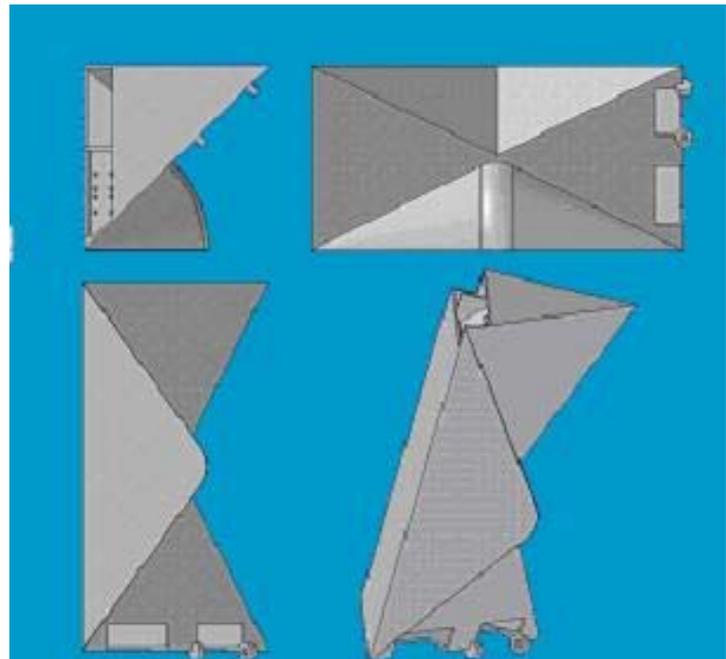


Figura 5.14 Diseño de gajo B.

- Gajo C

El gajo “C” tiene movimiento relativo con respecto a los gajos “B” y “D”, así como intersecciones con los pares de gajos “G-H” y “F-G”

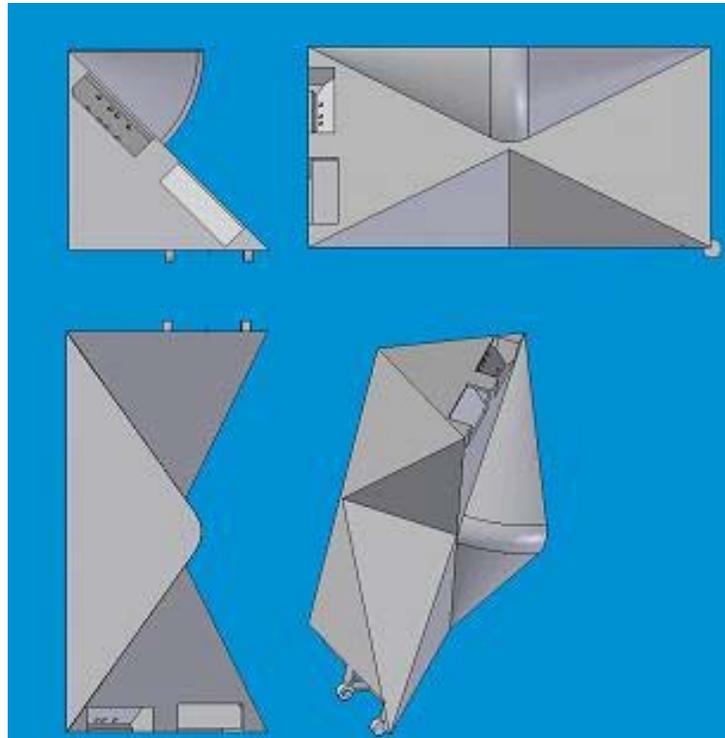


Figura 5.15 Diseño de gajo C.

- Gajo D

El gajo “D” tiene movimiento relativo con respecto a los gajos “C” y “E”, así como intersecciones con los pares de gajos “G-H” y “A-H”

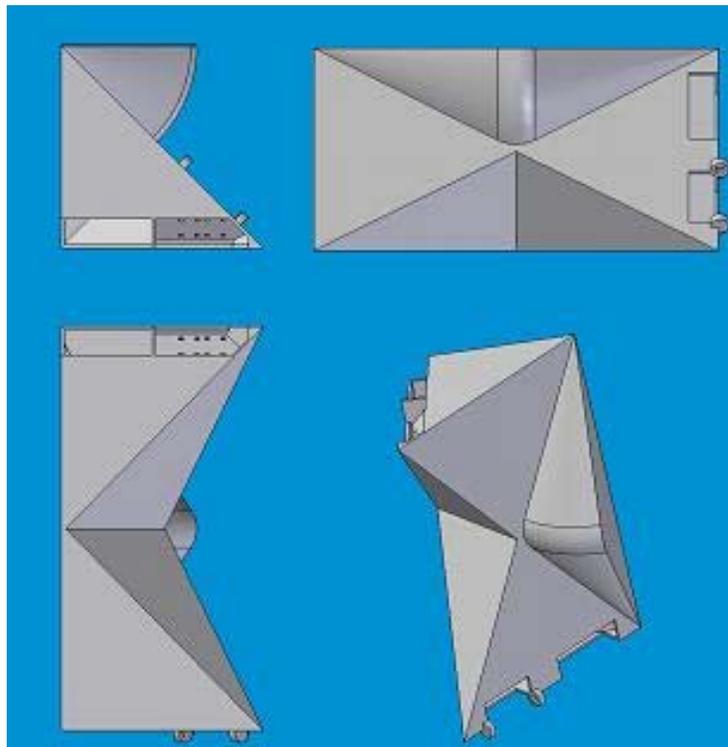


Figura 5.16 Diseño de gajo D.

- Gajo E

El gajo “E” tiene movimiento relativo con respecto a los gajos “D” y “F” ,así como intersecciones con los pares de gajos “A-B” y “A-H”

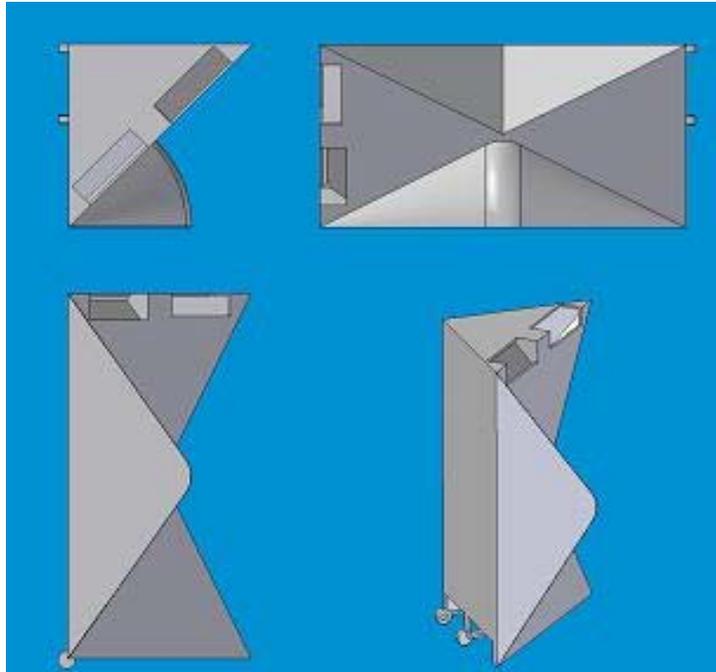


Figura 5.17 Diseño de gajo E.

- Gajo F

El gajo “F” tiene movimiento relativo con respecto a los gajos “E” y “G” ,así como intersecciones con los pares de gajos “A-B” y “B-C”

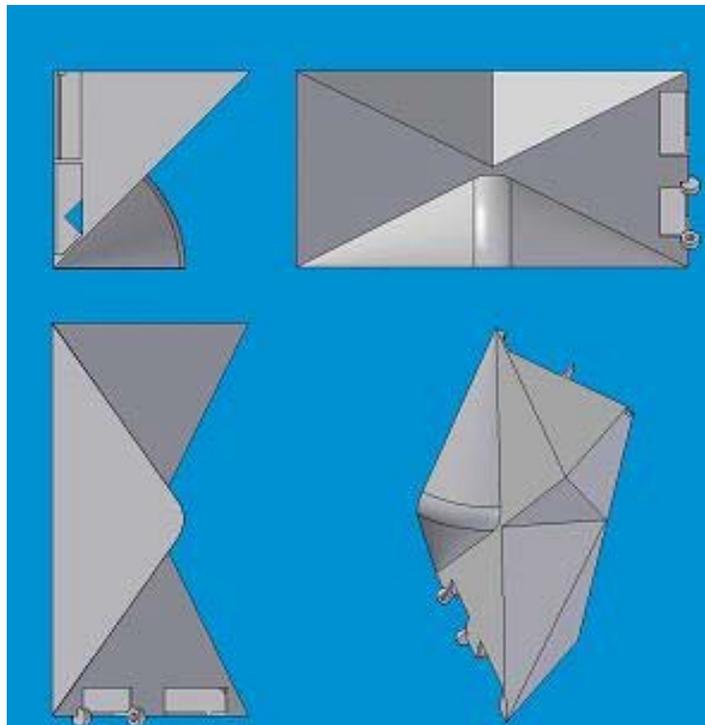


Figura 5.18 Diseño de gajo F.

- Gajo G

El gajo "G" tiene movimiento relativo con respecto a los gajos "F" y "H", así como intersecciones con los pares de gajos "C-D" y "B-C"

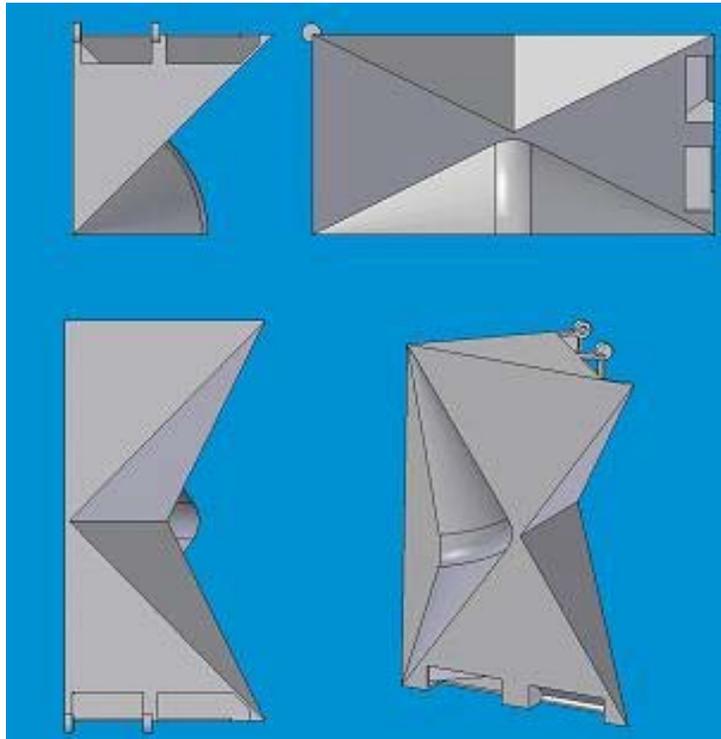


Figura 5.19 Diseño de gajo G.

- Gajo H

El gajo "H" tiene movimiento relativo con respecto a los gajos "G" y "A", así como intersecciones con los pares de gajos "C-D" y "D-E"

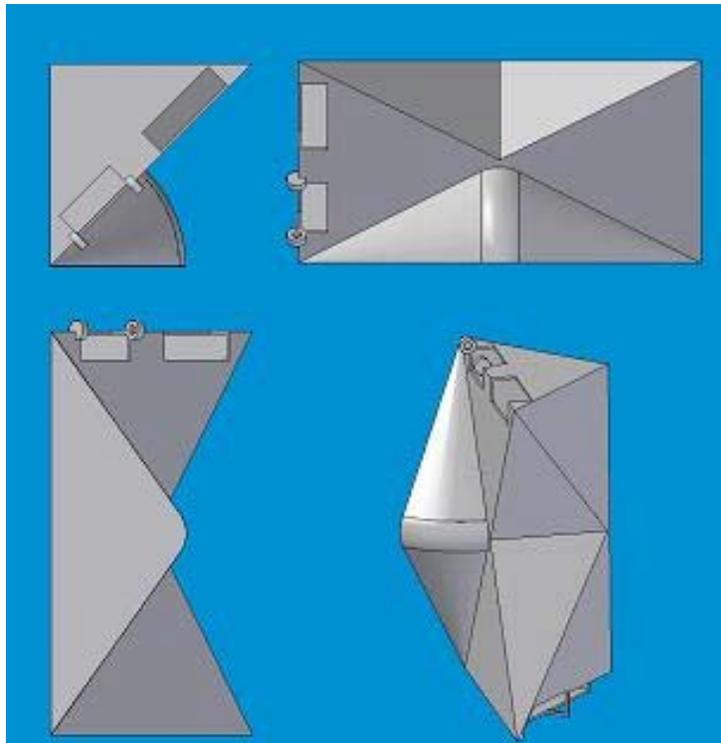


Figura 5.20 Diseño de gajo H.

Todos los gajos cuentan con una parte hueca que brinda una mayor ligereza a la estructura, con apoyo del software de Solid Edge ® se calcula el peso aproximado de cada gajo, proponiendo un espesor de las paredes de 2 mm y como material al estireno que tiene una densidad de alrededor de 1 g/cm<sup>3</sup>.

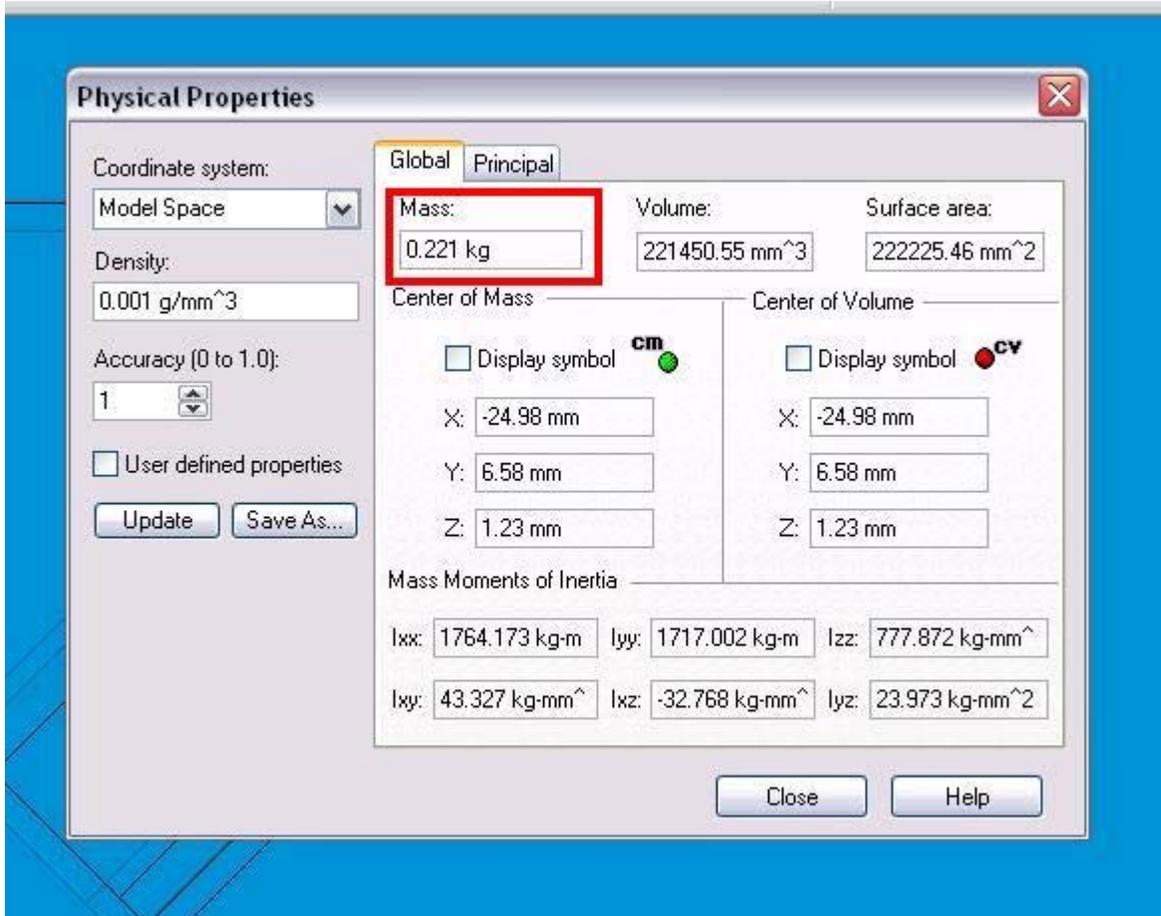


Figura 5.21 Cálculo de peso de la estructura

Se observa que se tiene una masa de alrededor de 221 gramos, que está por debajo de los límites calculados en la sección 5.1.1 para el servomotor seleccionado.

## 5.2.2 Integración de la transmisión con los gajos

La transmisión se acopla a los gajos por dos partes, la primera es la que sostiene al eje y la segunda es la que sujeta al servomotor.

Para el primer caso, el propio diseño de los gajos proporciona soporte al eje. En esta propuesta se establece que la propia estructura funcione como rodamiento, por lo cual el diseño contempla la geometría necesaria para que el eje de giro esté alineado de tal manera que los gajos puedan girar sin colisiones.

En el segundo caso, se requiere de una pieza que una al servomotor con la estructura, en esta propuesta se considera una sola pieza simétrica que puede ser utilizada para todos los servomotores, ya que se puede emplear cualquiera de sus lados para sujetarse a la estructura. Con esto se reduce el número de piezas diferentes.

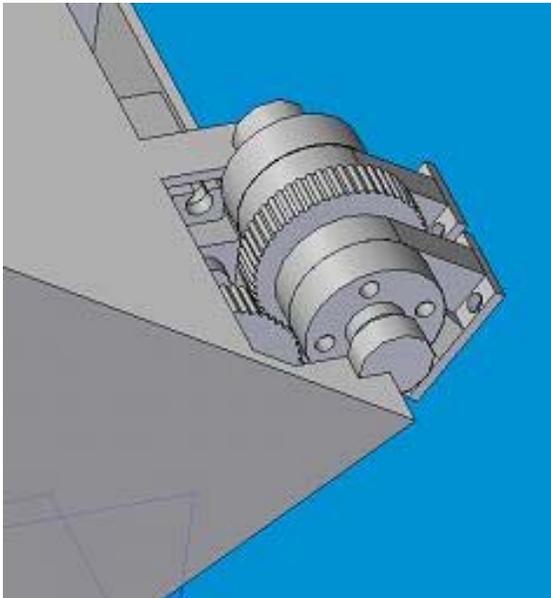


Figura 5.22 Detalle típico del ensamble de transmisión.

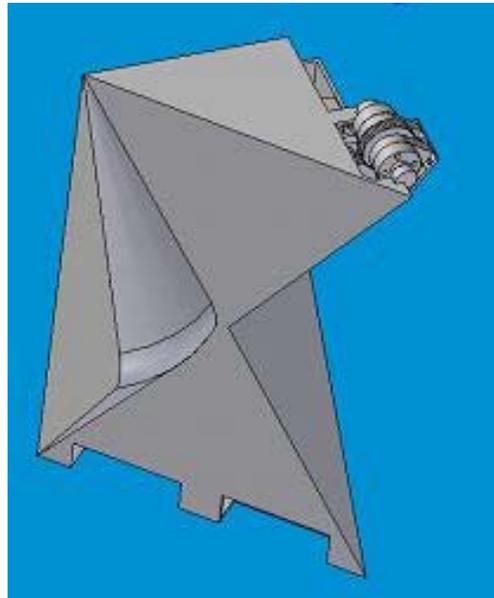


Figura 5.23 Ensamble de transmisión sobre estructura

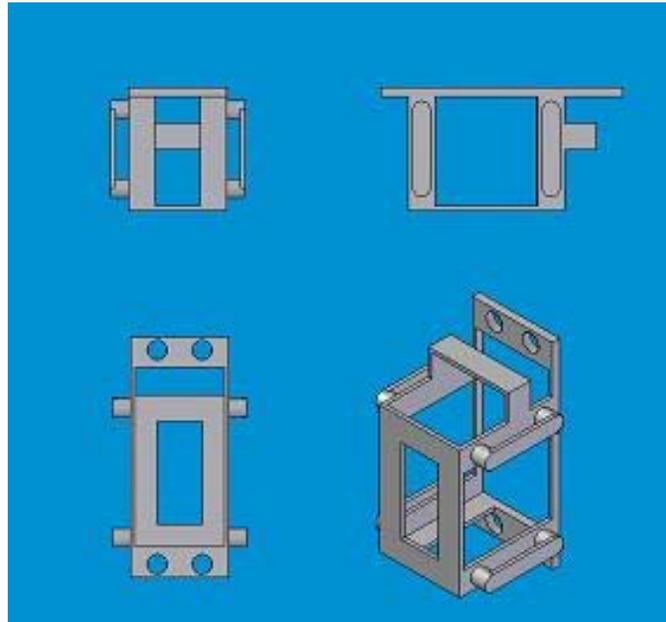


Figura 5.24 Diseño de sujetador de servomotor

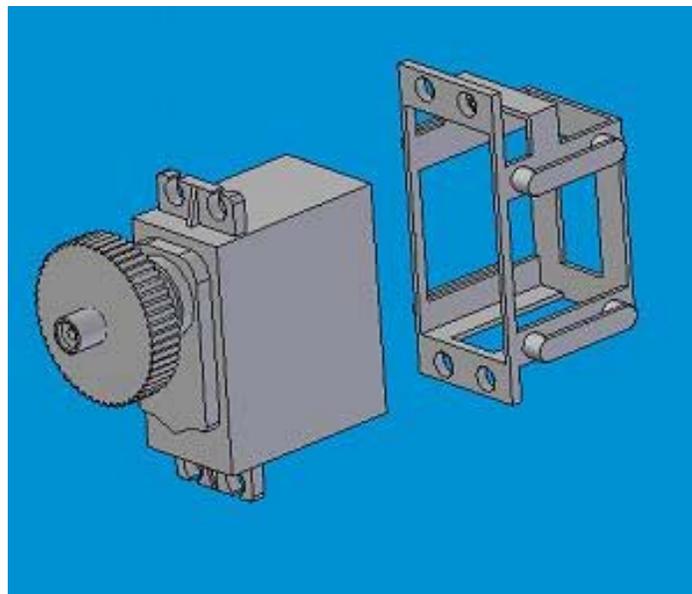


Figura 5.25 piezas para el ensamble del sujetador del servomotor

### 5.2.3 Canalización de cables de servomotores

Sobre la estructura pasarán dos tipos de cables, uno para la potencia con un par de hilos y el otro para las señales de un solo hilo. Para la potencia se pueden conectar los motores en paralelo, por lo que solamente un par de hilos atravesarán las estructuras. Para las señales se requiere un hilo por cada servomotor, por lo que será recomendado el uso de cable plano.

La acometida del cable se hará por el gajo A, que es por cual se sujetará toda la estructura. A partir de este gajo habrá 2 rutas para los cables. La primera recorrerá los gajos A, B, C, D y llevará la señal de control y las líneas de potencia a los motores 1, 2, 6 y 5; mientras que la otra ruta pasará por los gajos H, G, F, E y enviará la señal de control y las líneas de potencia a los motores 7, 4, 8 y 3.

Para las articulaciones conectadas en el lado largo de los gajos, los cables pasarán por unos canales ubicados sobre la misma superficie, entre los espacios donde van los motores.

Para las articulaciones conectadas en los lados cortos de los gajos, los cables pasarán por el vértice triangular que forman los dos gajos.

Los cables recorrerán las rutas que se indican en las siguientes figuras:

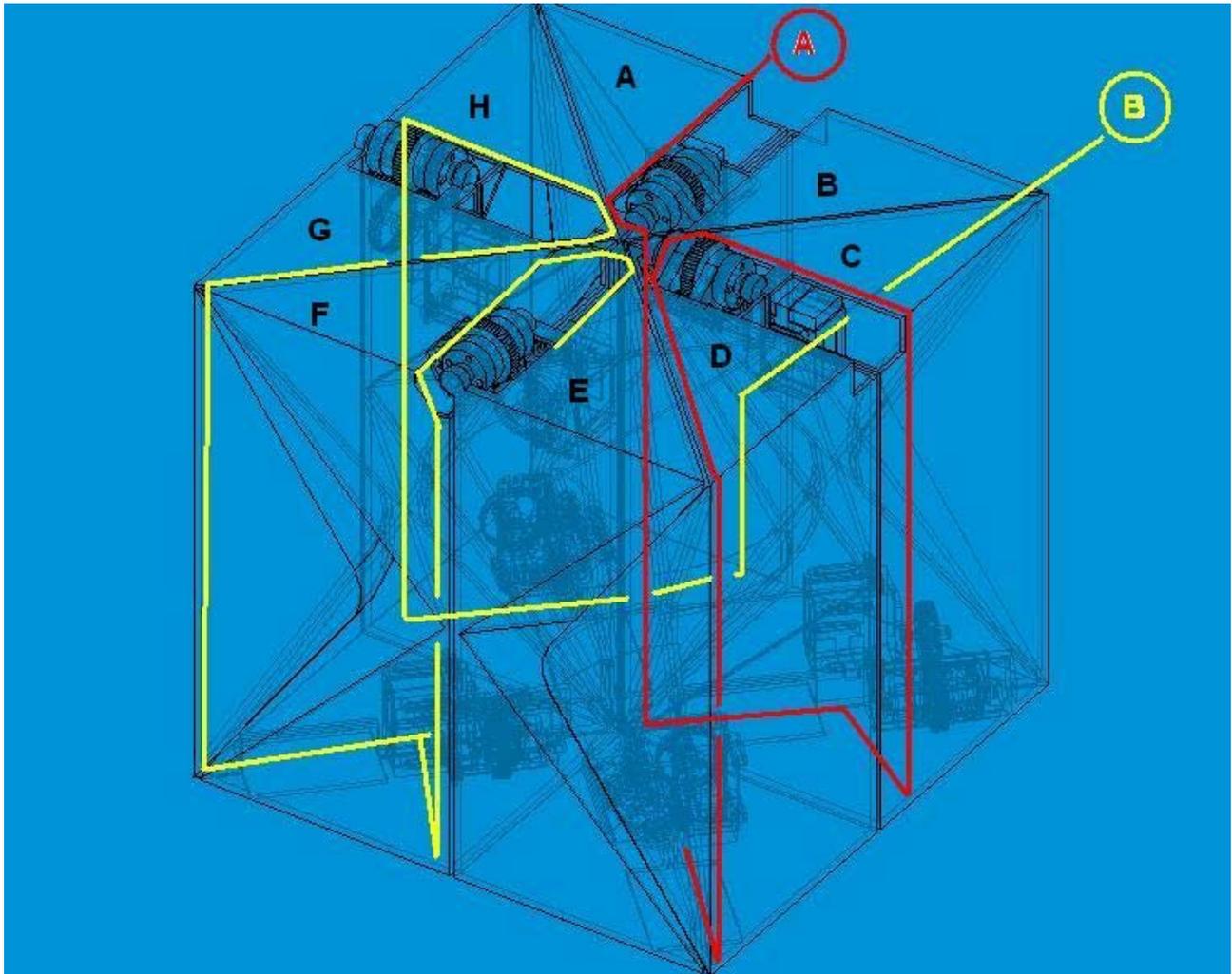


Figura 5.26 Vista superior de la canalización de cable, en color rojo está representada la ruta A y en color amarillo la ruta B

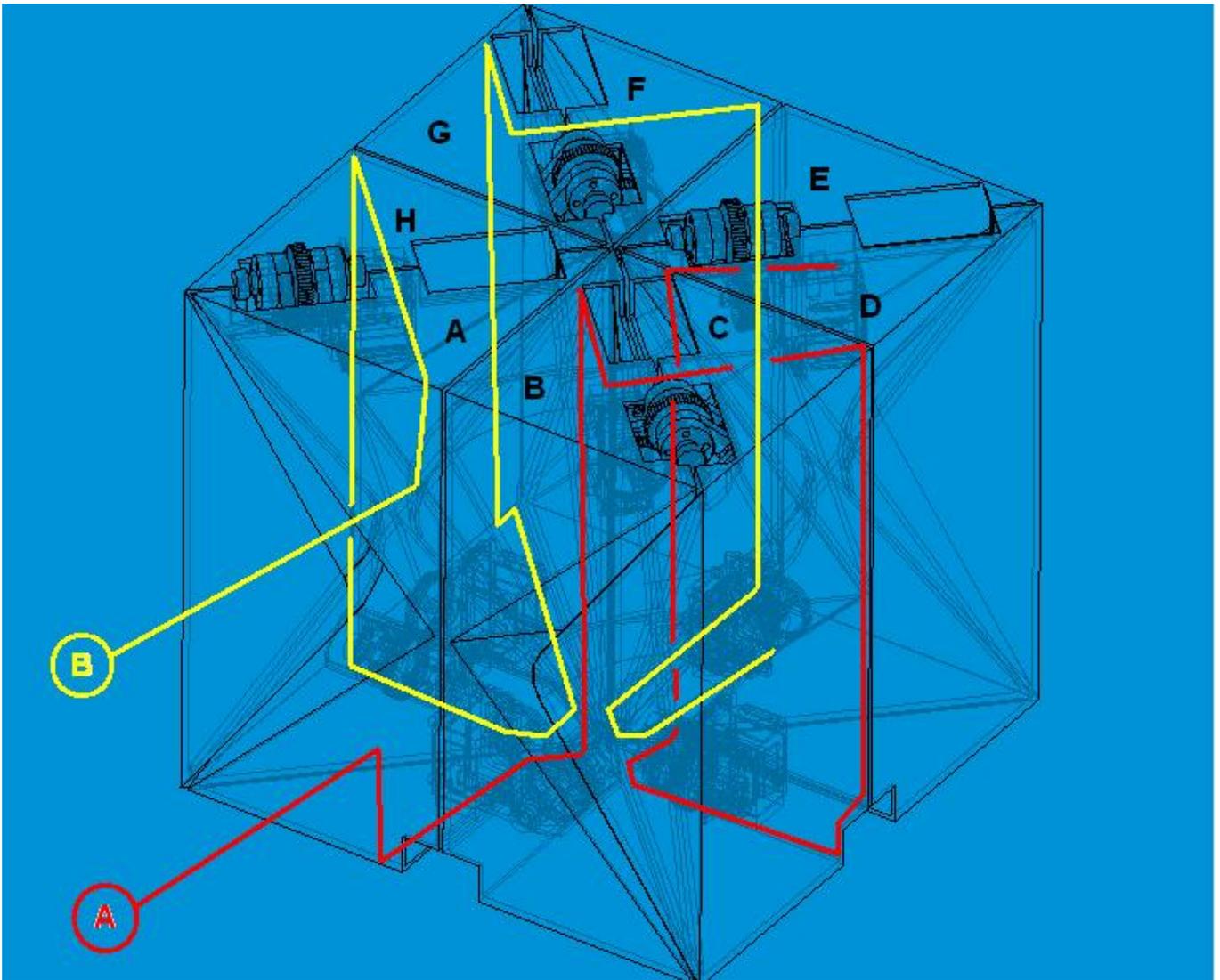


Figura 5.27 Vista inferior de la canalización de cable, en color rojo está representada la ruta A y en color amarillo la ruta B

### 5.2.4 Soporte de la Escultura

La escultura estará sustentada en un contenedor tipo exhibición consistente en un prisma con paredes traslucidas que permitan ver la escultura y una caja inferior donde se alojará el equipo electrónico de control.

La escultura se sujetará en dos puntos del gajo A por los cuales entrarán las dos rutas de cables.

La siguiente figura muestra la propuesta del soporte donde se pueden apreciar las acometidas de las rutas A y B

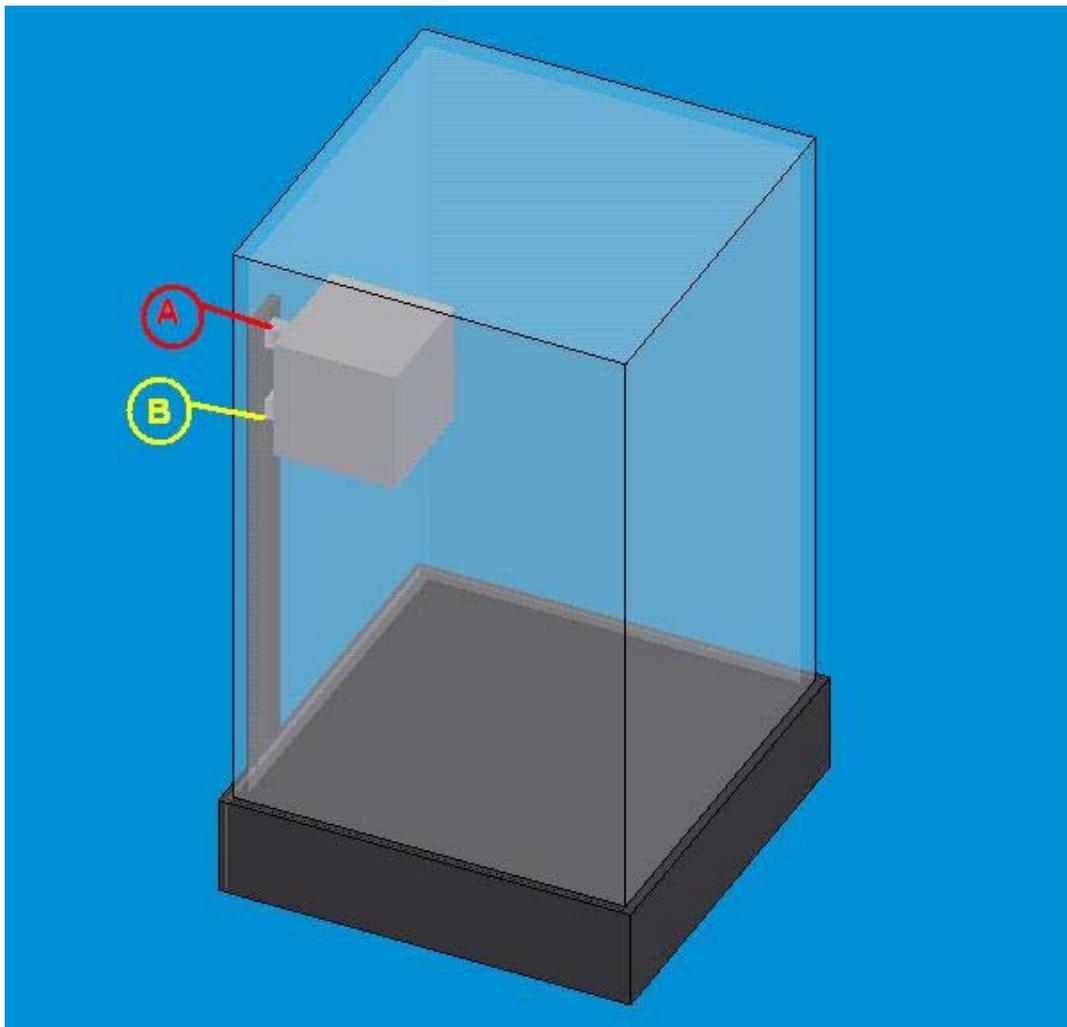


Figura 5.28 Soporte para la escultura

### **5.3 Diseño del controlador**

Para lograr el correcto control de la escultura se debe tener en cuenta las definiciones hechas en los capítulos anteriores. Partiendo de que se requiere controlar el movimiento de 8 piezas (gajos) unidos por articulaciones, se elabora un análisis de sus posiciones relativas en cada una de las figuras definidas para la rutina, así como de las posiciones intermedias entre los cambios de una posición a otra. De este análisis se deriva que existen 4 parejas de gajos que mantienen idénticas posiciones durante toda la transición de la rutina, sin embargo para que se cumpla esta condición, es necesario que los ejes de rotación queden establecidos en direcciones fijas. Esta restricción no representaría ningún problema sino fuera por la limitación de espacio en la escultura, ya que bastaría con colocar los servomotores dirigidos arbitrariamente para lograr este fin.

Como resultado del estudio del modelo tridimensional, se sabe que los servomotores cumplen la restricción de espacio cuando no están alineados para cumplir la condición en que existen 4 parejas de gajos con iguales posiciones.

De este arreglo surge la necesidad de controlar a 8 servomotores de forma independiente.

#### **5.3.1 Selección de microcontrolador PIC**

En el capítulo anterior se definió el uso de un microcontrolador PIC de la marca Microchip, sin embargo existe gran variedad de modelos que varían mucho unos de otros, por lo que se debe tener en cuenta a los elementos a ser controlados para dimensionar al microcontrolador. En este caso particular se requiere controlar 8 servomotores; algunos modelos de microcontroladores PIC, tienen incluidos módulos con generadores de ancho de pulso (PWM), la cantidad de estos varía con el modelo. Sin embargo la cantidad de PWM que tienen los microcontroladores es en el mayor de los casos de 5, haciendo necesario el uso de al menos dos de ellos. Para optimizar recursos y emplear un solo microcontrolador se propone generar los pulsos por medio de las salidas digitales del mismo. El PIC modelo 16F877A tiene 5 puertos, de los cuales 2 tienen la capacidad para utilizarlos como 8 salidas digitales. Para el desarrollo de este proyecto se utilizará este modelo y una tarjeta de desarrollo elaborada por el Ing. Ulises Peñuelas Rivas.

### 5.3.2 Arquitectura de control

El sistema de control propuesto se describe gráficamente en la figura 5.29, en ella se muestra como se envía una señal para cada uno de los ocho servomotores a ser controlados.

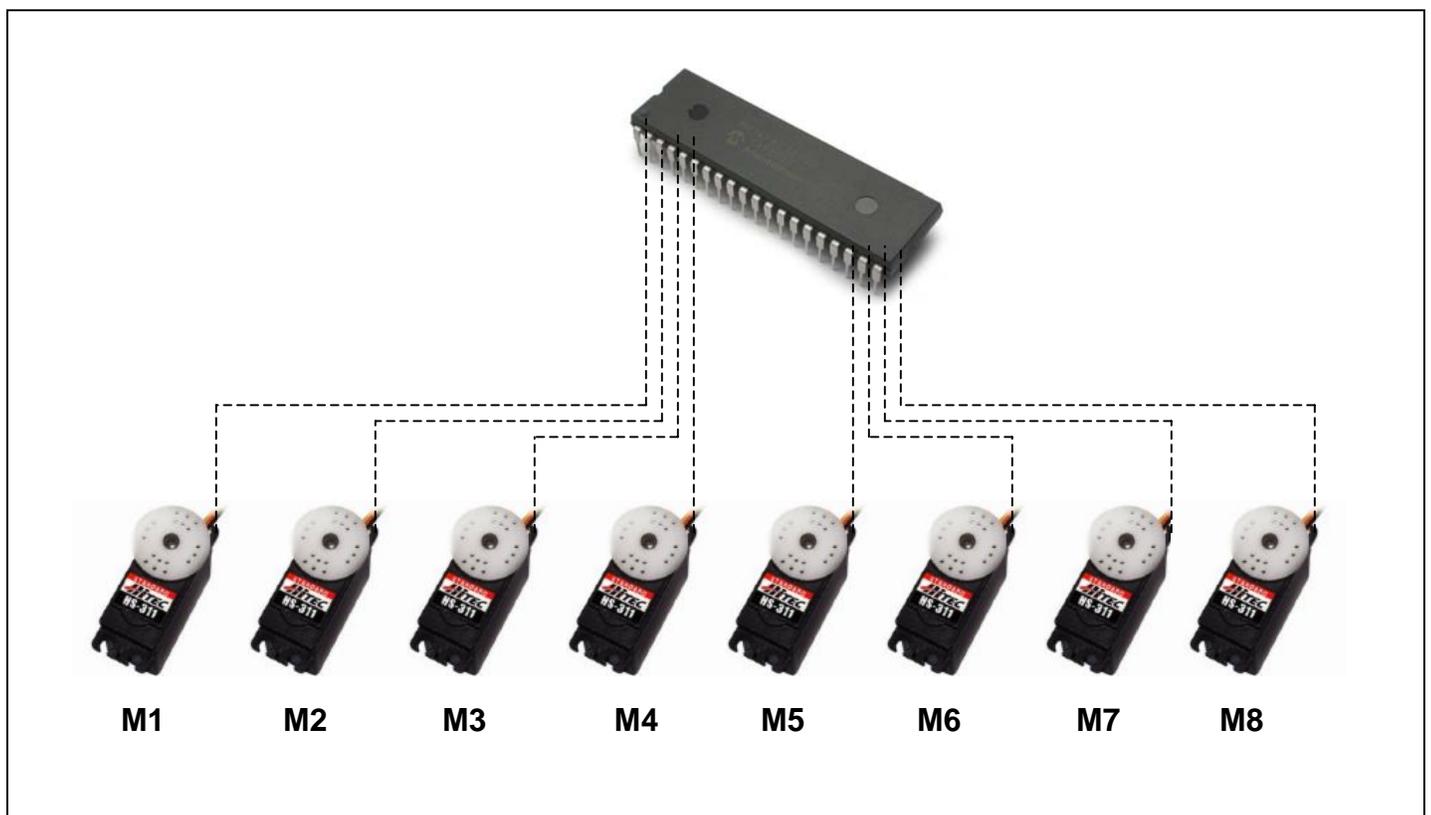


Figura 5.29 Arquitectura de control del sistema.

### 5.3.3 Diseño de rutina de control

Como se definió en el capítulo 2 se desea controlar el movimiento de los gajos para formar 4 de las 7 figuras que puede formar la escultura Brancusi, dichas figuras forman una rutina que se describe en la figura 5.30

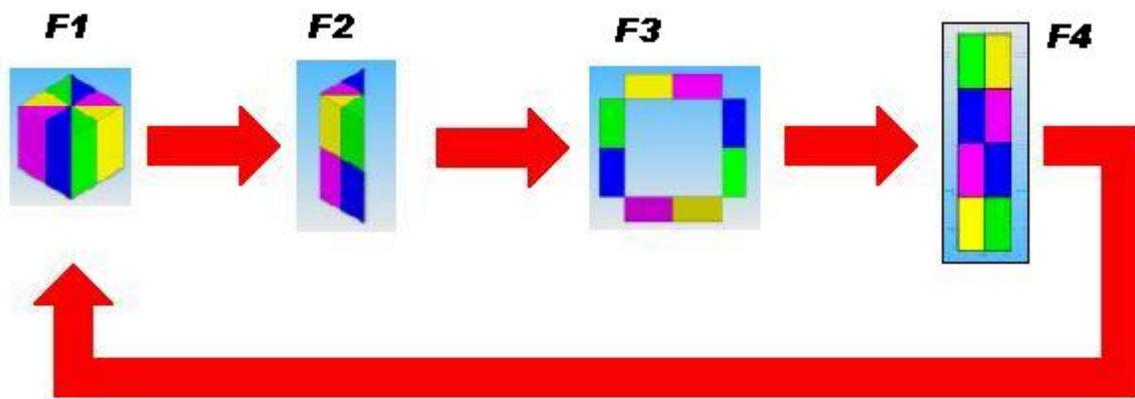


Figura 5.30 Rutina de transformación de la escultura.

Para poder dar un seguimiento de cada servo motor se debe hacer una definición de los motores de acuerdo a su posición respecto a los gajos, las figuras 5.31 y 5.32, así como la tabla 5.2 identifican cada uno de los motores.

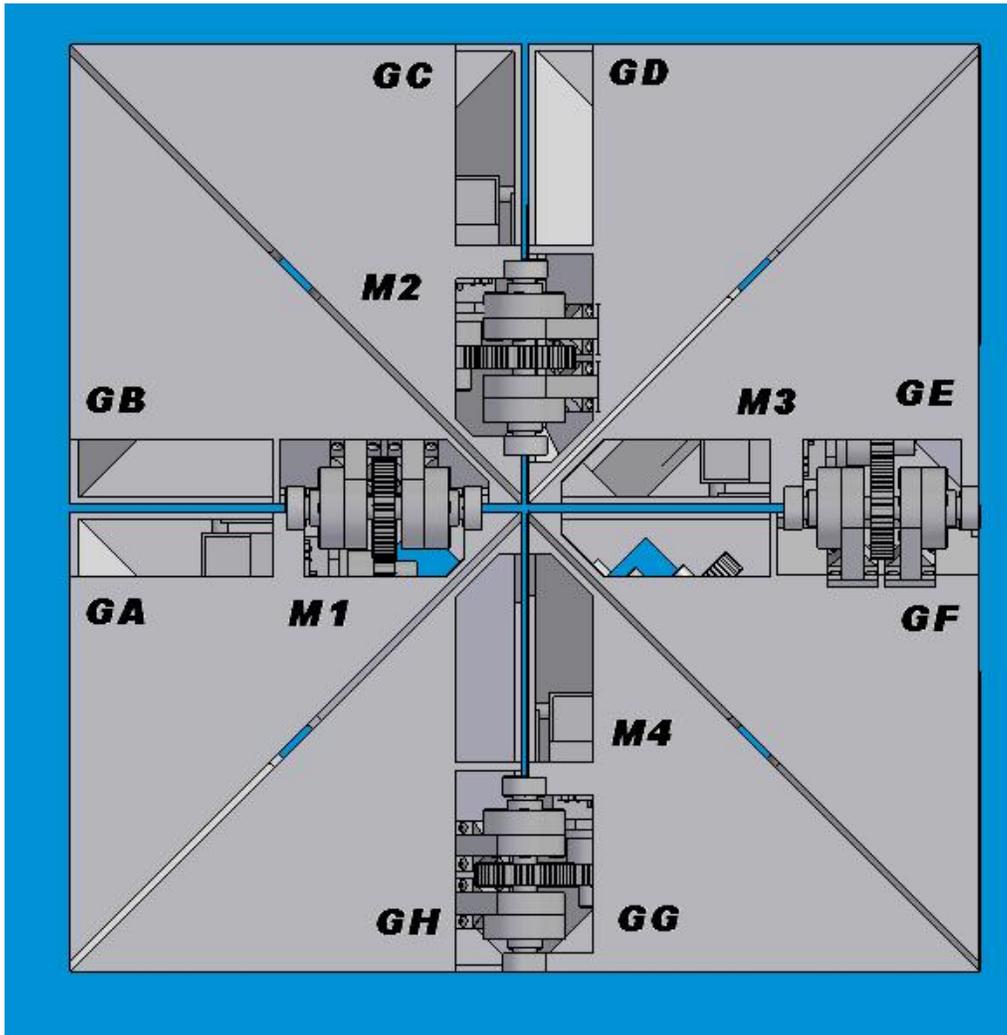


Figura 5.31 Definición de motores desde vista superior.

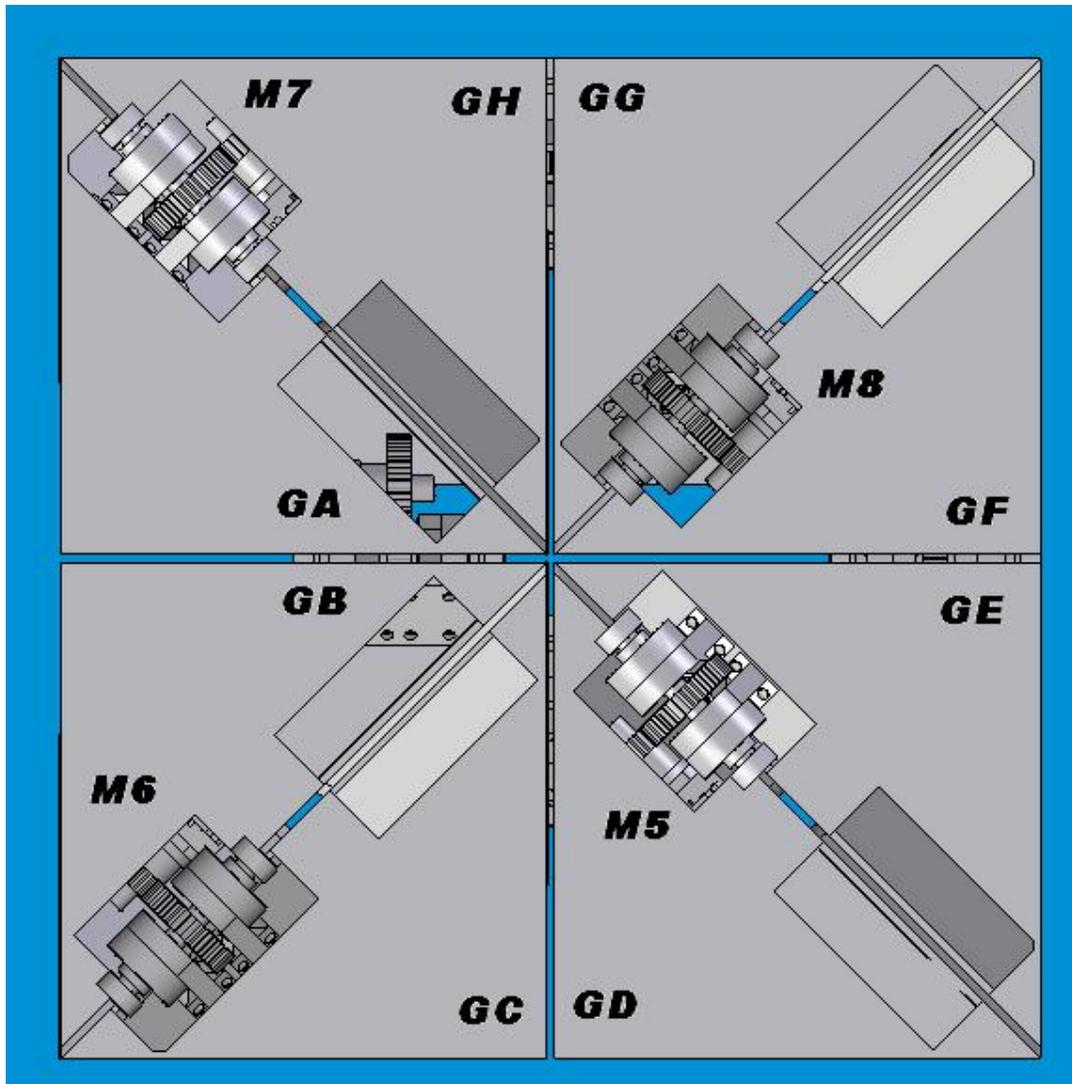


Figura 5.32 Definición de motores desde vista inferior.

Tabla 5.2 Localización de servomotores en escultura.

<b>Motor</b>	<b>Gajo de montaje:</b>	<b>Gajos unidos:</b>
1	A	A-B
2	C	C-D
3	E	E-F
4	G	G-H
5	D	D-E
6	B	B-C
7	H	H-A
8	F	F-G

Se toma como referencia el sentido antihorario para determinar la posición radial del servomotor como se indica en la figura 5.33

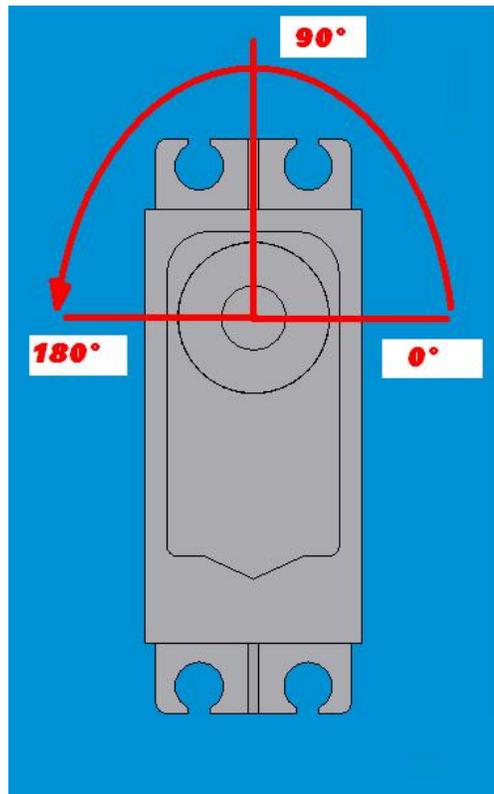
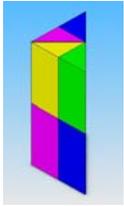
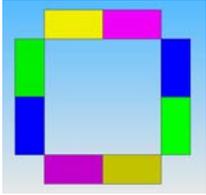
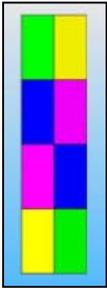


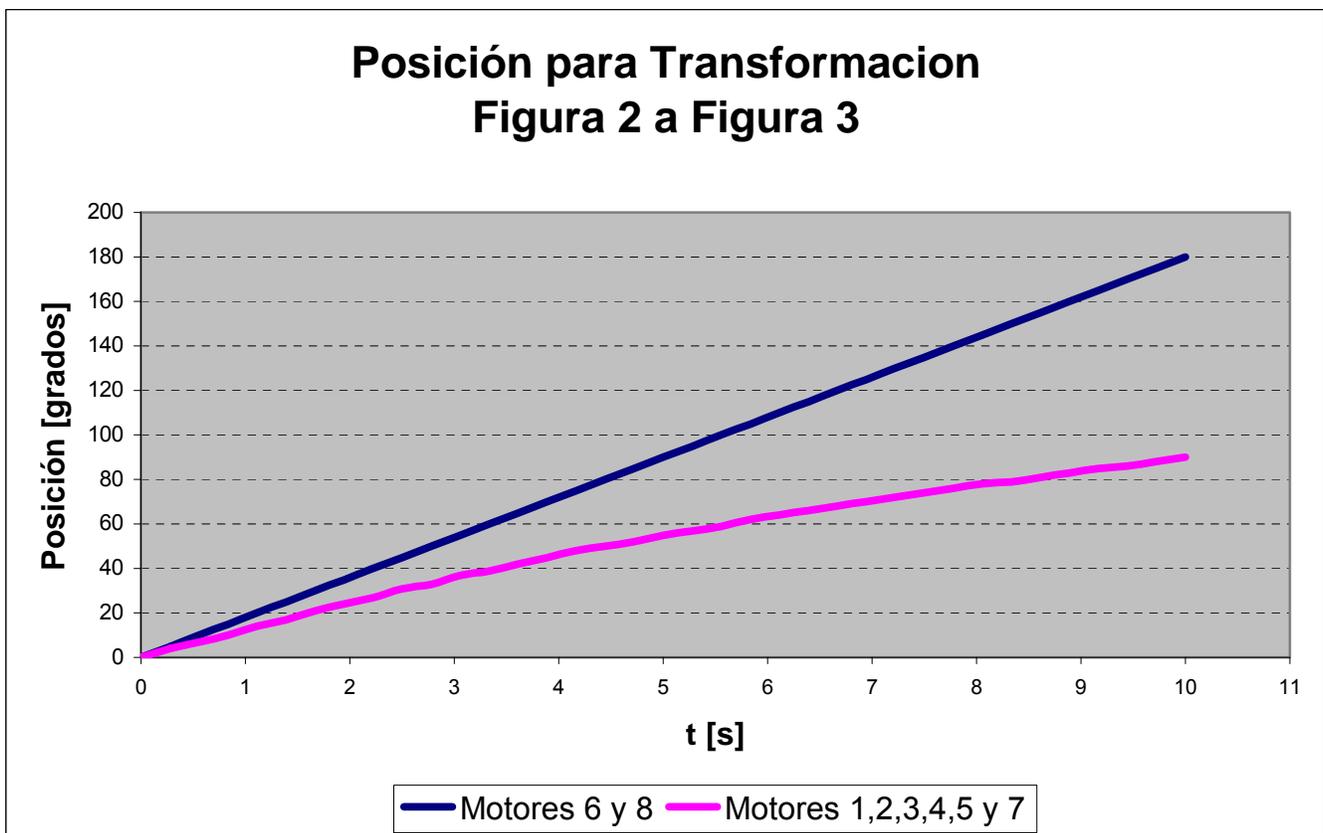
Figura 5.33 Convención para la posición radial de los servomotores.

Con base a la rutina definida y establecidos los motores, se desarrolla una tabla que indica la posición radial de los servomotores de acuerdo a la convención de la Tabla 5.3

Tabla 5.3 Posiciones para los servomotores en cada figura.

Figura	Tiempo [s]	Figura	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
1	0		0	0	180	180	180	0	0	180
2	10		0	0	180	180	0	0	180	180
3	20		90	90	90	90	0	180	180	0
4	30		0	180	180	0	0	180	180	0
1	40		0	0	180	180	180	0	0	180

De acuerdo a las pruebas realizadas para la construcción de la escultura en tamaño real en los laboratorios de Ingeniería Mecánica y en particular en el trabajo “Diseño de automatización de escultura móvil” [9], el comportamiento aislado de cada articulación es diferente a cuando interactúan todos los gajos al mismo tiempo, para el estudio en este trabajo se considera que para todas las transformaciones el comportamiento de los cambios de posición es lineal a excepción de la transformación entre las figuras 2 y 3, para la cual se tiene el siguiente comportamiento:



Gráfica 5.1, Posición para los motores durante la transformación de la Figura 2 a la Figura 3.

En la gráfica se aprecia un comportamiento lineal para los motores que recorren 180 grados, que son los motores 6 y 8. En cambio aquellos que solamente tienen un cambio de 90 grados el comportamiento no es lineal.

### 5.3.3 Diseño de programa de control

Una vez establecidos las referencias, la secuencia de posiciones y tiempo para cada uno de los motores, se realiza el diseño del controlador.

Los servomotores requieren una señal con anchos de pulsos modulados, para este fin se emplearán los 8 canales del puerto D del microcontrolador PIC 16F877A. Estos canales tendrán la función de salidas digitales y las señales para los servomotores se configuran en la programación. El programa contará con constantes configurables al principio del mismo, con la intención de poder ajustar el periodo de los pulsos (el mismo para todos los canales). Cada canal tendrá una salida digital que iniciara el ciclo en señal alta y que pasará a baja después dependiendo de la posición en la que se desee colocar al servomotor.

La señal para que el servomotor funcione adecuadamente debe tener un periodo de 20 [ms]. La posición estará sujeta al ciclo de trabajo del pulso que oscilará entre 200 [us] y 2200 [us] para 0 y 180 grados respectivamente como se muestra en la figura 5.30

Para lograr una señal modular, se empleará la función de “interrupciones”, lo cual permitirá emplear intervalos fijos de tiempo. Estos intervalos de tiempo serán fijados en 100 [us] y serán llamados bloques. El tiempo de ejecución de una línea de código es de 0.2 [us], por lo tanto el límite de líneas de código con una resolución por bloque de 100 [ms] es de 500 líneas.

El periodo del pulso para el servomotor será de 20 [ms] por lo que se requieren 200 bloques, esto quiere decir que al concluir los 200 bloques todas las señales volverán a su estado alto. Al conjunto de 200 bloques se le llamará “ciclo” y corresponderá al periodo del pulso enviado al servomotor. Por cada 25 ciclos se considerará un microciclo que es la cantidad mínima de pulsos idénticos que se envían al servomotor antes de cambiar su ciclo de trabajo, dicho microciclo tendrá una duración total de 500 [ms]. Para hacer el cambio entre figura y figura, deberán pasar 10 segundos aproximadamente, por lo que se requieren 20 microciclos, a este periodo se le llamara miniciclo. Finalmente toda la rutina

se llevara a cabo en 40 segundos a lo que se nombrará como macrociclo. La tabla 5.4 muestra la equivalencia entre los periodos definidos.

nombre	símbolo	duración	núm. de bl	núm. de C	núm. de uC	núm. de mC	núm. de MC
macrociclo	MC	40 [s]	400,000,000,000	80000	80	4	1
miniciclo	mC	10 [s]	5,000,000	1000	20	1	NA
microciclo	uC	500 [ms]	5,000	25	1	NA	NA
Ciclo	C	20 [ms]	200	1	NA	NA	NA
bloque	bl	100 [us]	1	NA	NA	NA	NA

Tabla 5.4. Equivalencias para periodos de la rutina.

Los bloques permiten definir los tiempos de duración del ciclo alto del pulso, con ello se logra controlar las posiciones de los servomotores, por ejemplo para la posición de 0 grados se requiere un ciclo alto de 200 [ms] lo que se obtiene con 2 bloques; por otro lado un periodo 22 bloques, brindará un ciclo alto de 2200 [ms] con lo que el servomotor se colocará a 180 grados. Este comportamiento se describe en la figura 5.30

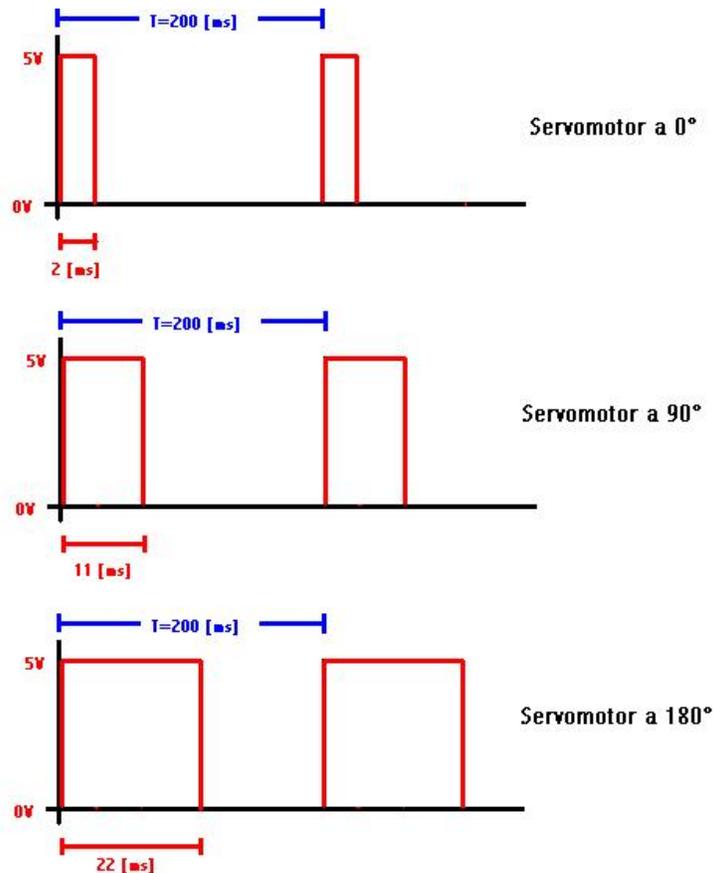


Figura 5.34. Representación de la señal para el servomotor.

Las posiciones que se definieron para la rutina de la escultura, serán cubiertas de acuerdo al ancho del ciclo de trabajo que se envíe a cada servomotor. La variable “CX” será determinada para fijar el número de bloques en cada ciclo.

El servomotor seleccionado en la sección 5.1.1 es de la marca HI-TEC, para fines de comprobación de la rutina de control se emplea un servomotor de la marca FUTABA, sin embargo el ancho de los pulsos no corresponden al de las posiciones del HI-TEC, por lo que se pretende reproducir el desempeño del servomotor seleccionado un número de pasos similar, lo que brindará una imagen del desempeño que realizaría el servomotor seleccionado. El programa de control tiene la flexibilidad para trabajar en diferentes rangos teniendo como limitante el número de líneas de código ejecutadas por cada interrupción.

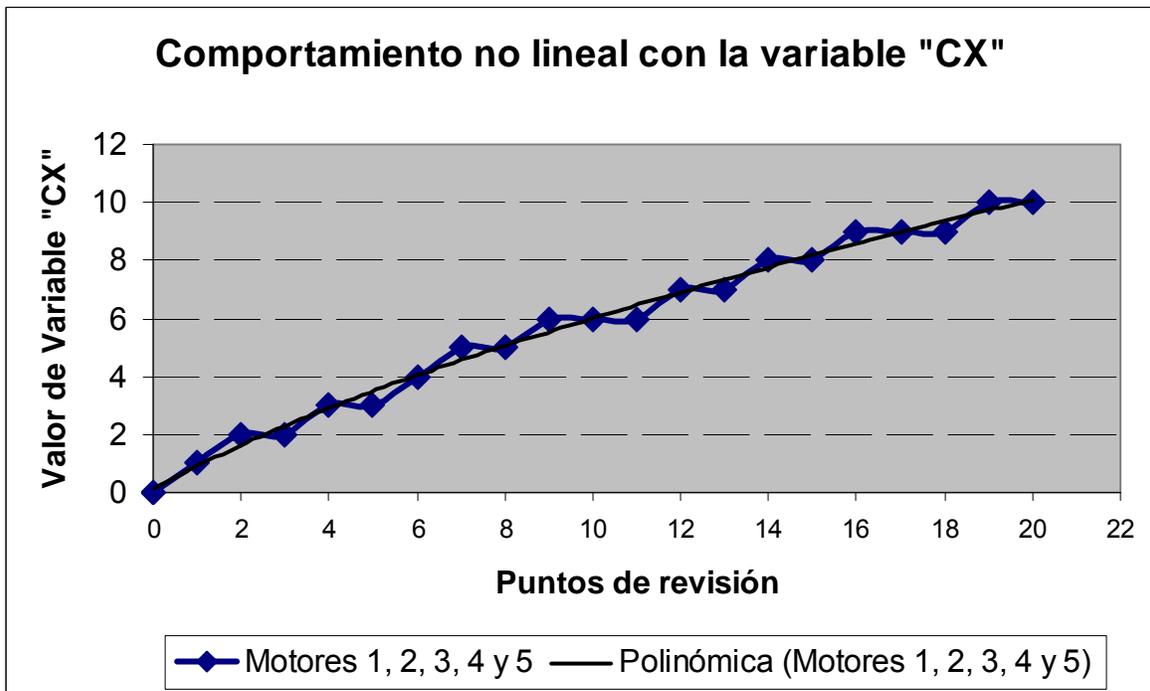
HI-TEC									
		# de líneas código	500	250	200	150	125	100	50
		bloque [us]	100	50	40	30	25	20	10
-90°	1100 [us]	C <sub>MÍNIMA</sub>	11	22	28	37	44	55	110
Neutro	1500 [us]	C <sub>NEUTRAL</sub>	15	30	38	50	60	75	150
+90°	1900 [us]	C <sub>MÁXIMA</sub>	19	38	48	63	76	95	190
		No. de pasos por 180°	8	16	20	27	32	40	80

FUTABA									
		# de líneas código	500	250	200	150	125	100	50
		bloque [us]	100	50	40	30	25	20	10
-90°	200 [us]	C <sub>MÍNIMA</sub>	2	4	5	7	8	10	20
Neutro	1200 [us]	C <sub>NEUTRAL</sub>	12	24	30	40	48	60	120
+90°	2200 [us]	C <sub>MÁXIMA</sub>	22	44	55	73	88	110	220
		No. de pasos por 180°	20	40	50	67	80	100	200

Como se describió anteriormente en la gráfica 5.1, existe un comportamiento no lineal durante la transformación de la Figura 2 a la Figura 3. Se considera que en el programa de control la variable “CX” representa un avance de 9 grados por unidad.

Cada 0.5 segundos el programa de control realiza una revisión para decidir si el servomotor debe cambiar de posición o si debe permanecer en la que ya está. De tal

forma que se tendrán 20 verificaciones entre cada transformación. La siguiente gráfica muestra los valores que debe adoptar la variable "CX" para obtener un comportamiento no lineal durante el cambio de posiciones:



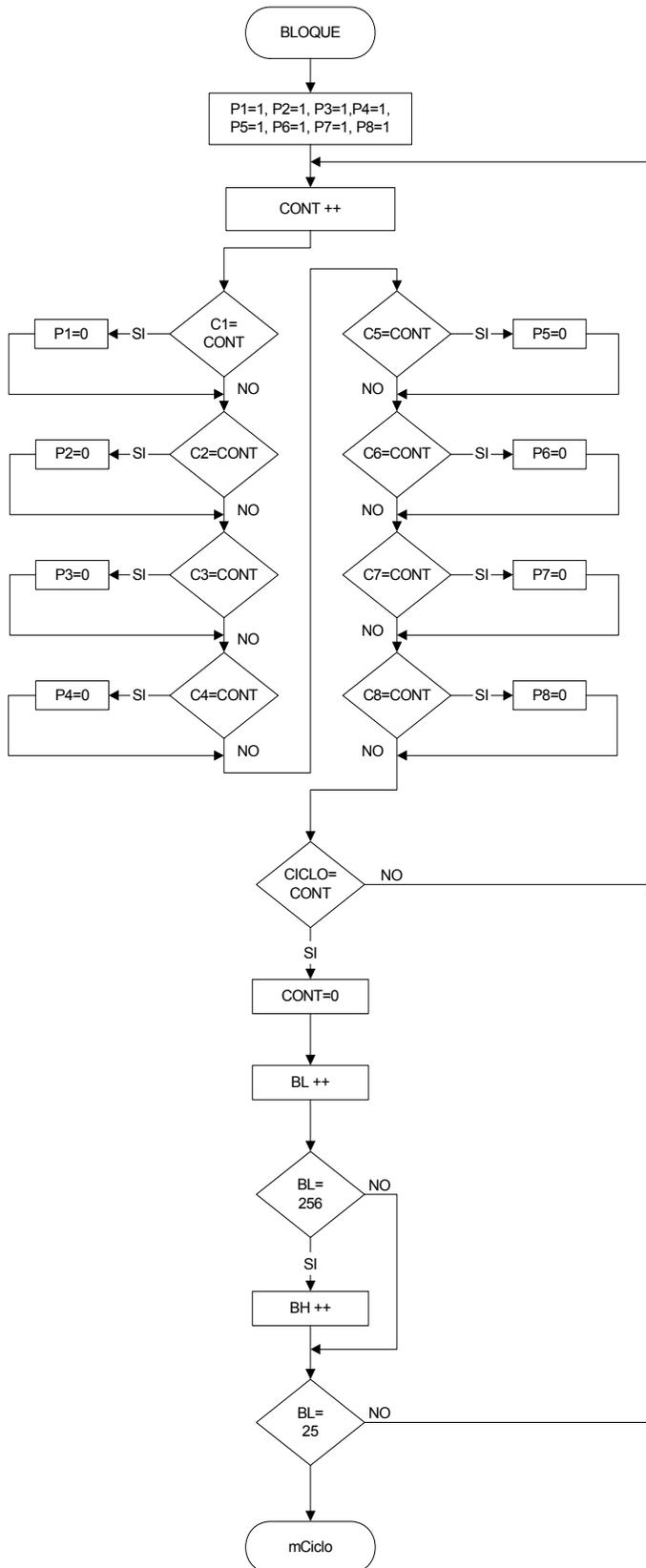
Gráfica 5.2: Valores de la variable "CX" para obtener comportamiento no lineal

Como la resolución del control es de 9 grados, es necesario hacer uso de puntos discretos para la interpolación de la curva. En la siguiente figura se determinan los valores de la variable "CX" para toda la rutina de control:

Tiempo [s]	Servomotor								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
0	2	2	22	22	22	2	2	22	FIGURA 1
1	2	2	22	22	20	2	4	22	
2	2	2	22	22	18	2	6	22	
3	2	2	22	22	16	2	8	22	
4	2	2	22	22	14	2	10	22	
5	2	2	22	22	12	2	12	22	
6	2	2	22	22	10	2	14	22	
7	2	2	22	22	8	2	16	22	
8	2	2	22	22	6	2	18	22	
9	2	2	22	22	4	2	20	22	
10	2	2	22	22	2	2	22	22	FIGURA 2
11	4	4	20	20	2	4	22	20	
12	5	5	19	19	2	6	22	18	
13	6	6	18	18	2	8	22	16	
14	7	7	17	17	2	10	22	14	
15	8	8	16	16	2	12	22	12	
16	9	9	15	15	2	14	22	10	
17	10	10	14	14	2	16	22	8	
18	11	11	13	13	2	18	22	6	
19	11	11	13	13	2	20	22	4	
20	12	12	12	12	2	22	22	2	FIGURA 3
21	11	13	13	11	2	22	22	2	
22	10	14	14	10	2	22	22	2	
23	9	15	15	9	2	22	22	2	
24	8	16	16	8	2	22	22	2	
25	7	17	17	7	2	22	22	2	
26	6	18	18	6	2	22	22	2	
27	5	19	19	5	2	22	22	2	
28	4	20	20	4	2	22	22	2	
29	3	21	21	3	2	22	22	2	
30	2	22	22	2	2	22	22	2	FIGURA 4
31	2	20	22	4	4	20	20	4	
32	2	18	22	6	6	18	18	6	
33	2	16	22	8	8	16	16	8	
34	2	14	22	10	10	14	14	10	
35	2	12	22	12	12	12	12	12	
36	2	10	22	14	14	10	10	14	
37	2	8	22	16	16	8	8	16	
38	2	6	22	18	18	6	6	18	
39	2	4	22	20	20	4	4	20	
40	2	2	22	22	22	2	2	22	FIGURA 1

Figura 5.35 Secuencia de valores de la variable "C" en rutina de control

### 5.3.4 Diagramas de flujo



En la parte inicial del programa se establecen todas las salidas con un pulso alto, luego se incrementa un contador que sirve de referencia para contar el número de bloques hasta el momento y para bajar el pulso, de esta forma se verifica cada salida y se determina si en ese ciclo se debe bajar el pulso.

El siguiente paso es revisar si el contador ha llegado a su cuenta máxima (200 bloques) terminando el ciclo.

Si el ciclo ha terminado agrega uno al contador hasta que sumen 25 ciclos terminando un microciclo.

En ese momento se entra a otra subrutina para modificar los valores que determinan el ancho de pulso. Lo cual quiere decir que se mantiene el mismo pulso al servomotor al menos por 200 ciclos, es decir 0.5 [s].

Figura 5.36. Diagrama de flujo de rutina de control, sección de verificación.

### Subrutina de selección de miniciclo.

En esta subrutina se determina en que miniciclo se encuentra el programa, verificando a la variable mC. Estos miniciclos corresponden a cada una de las 4 figuras que se forman en este trabajo. Dependiendo del valor de la variable se redirige el programa a cada subrutina de transición entre las figuras de la escultura.

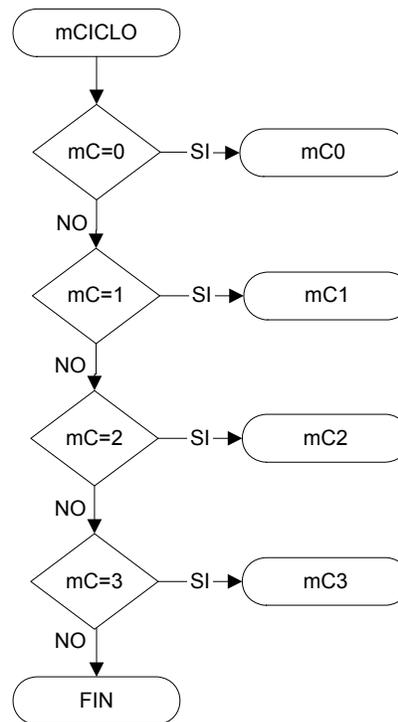


Figura 5.37 Subrutina de control mCICLO

## Subrutina de transición entre figura 1 y 2

De acuerdo a los valores de la figura 5.31 se asignan valores a las variables C5 y C7 para lograr la regulación gradual del ancho del pulso y por consiguiente la posición radial de los servomotores. Al final se verifica con alguna de las dos variables si se ha llegado a la posición deseada para formar a la figura 2.

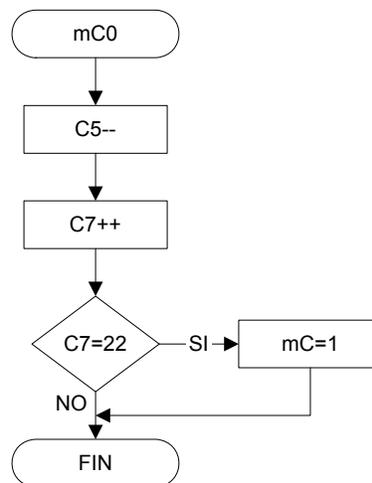


Figura 5.38 Subrutina de control mC0

## Subrutina de transición entre figura 2 y 3

De acuerdo a los valores de la figura 5.31 se asignan valores a las variables C1, C2, C3, C4, C6 y C8 para lograr el perfil de posiciones no lineal. La siguiente tabla muestra el cambio en la variable "CX" de forma ascendente y decreciente de acuerdo a cada uno de los 20 microciclos que comprende una transformación desde la figura 2 hasta la figura 3. En la figura 5.35, se muestra como solamente en aquellos microciclos en los que hay cambio de valor en la variable "CX", se realiza una verificación y ajuste de todas las variables. Al final se verifica con alguna de las seis variables si se ha llegado a la posición deseada para formar a la figura 3.

Tabla 5.5, Cambio de la variable "CX" con respecto al perfil de posiciones no lineal.

No. de microciclos	Cambio en "CX"	
	Ascendente	Decreciente
0	0	10
1	1	9
2	2	8
3	2	8
4	3	7
5	3	7
6	4	6
7	5	5
8	5	5
9	6	4
10	6	4
11	6	4
12	7	3
13	7	3
14	8	2
15	8	2
16	9	1
17	9	1
18	9	1
19	10	0
20	10	0

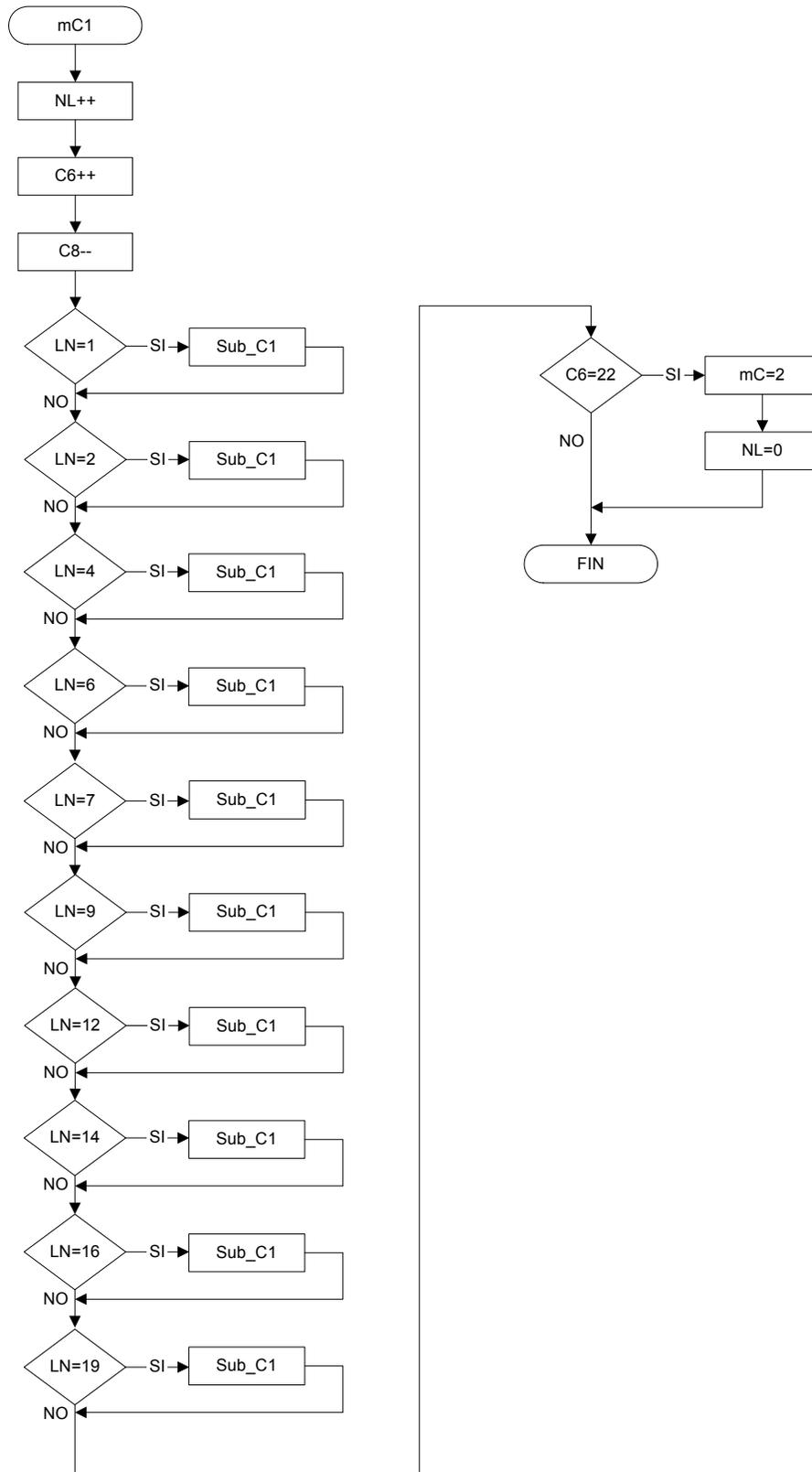


Figura 5.39 Subrutina de control mC1

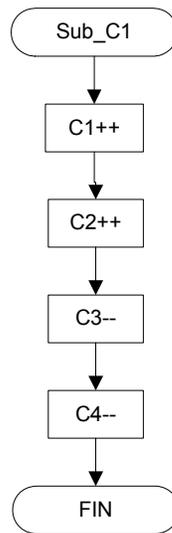


Figura 5.40 Sub rutina Sub\_C1 para cambio de valores de variables C1, C2, C3 y C4

## Subrutina de transición entre figura 3 y 4

De acuerdo a los valores de la figura 5.31 se asignan valores a las variables C1, C2, C3 y C4 para lograr la regulación gradual del ancho del pulso y por consiguiente la posición radial de los servomotores. Al final se verifica con alguna de las cuatro variables que cambian en esta transición, si se ha llegado a la posición deseada para formar a la figura 4.

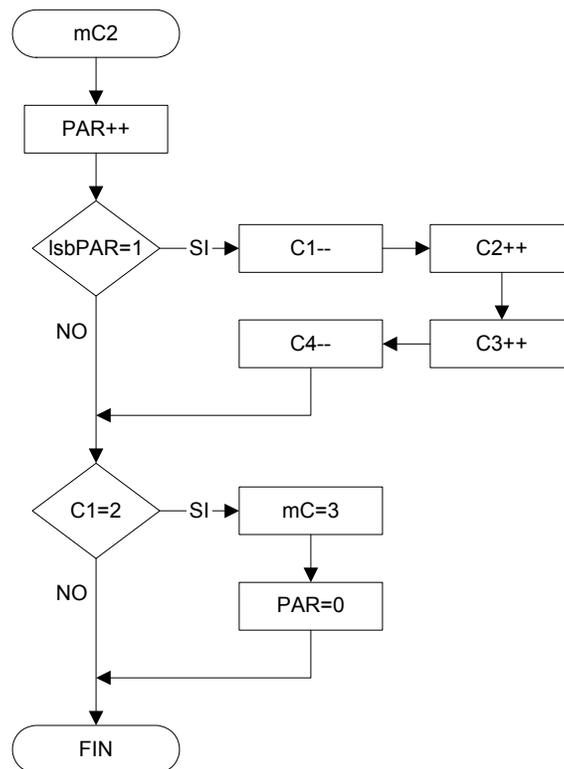


Figura 5.41 Subrutina de control mC2

## Subrutina de transición entre figura 4 y 1

De acuerdo a los valores de la figura 5.31 se asignan valores a las variables C2, C4, C5, C6, C7 y C8 para lograr la regulación gradual del ancho del pulso y por consiguiente la posición radial de los servomotores. Al final se verifica con alguna de las seis variables que cambian en esta transición, si se ha llegado a la posición deseada para formar a la figura 3.

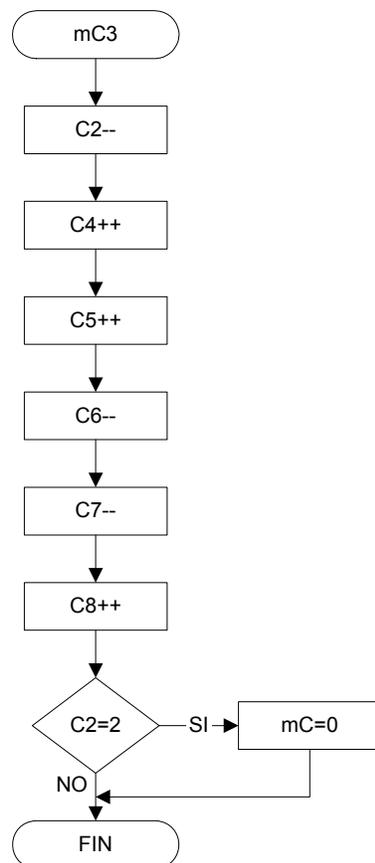


Figura 5.42 Subrutina de control mC3

El código fuente del programa de control se encuentra en el Anexo A.

## Capítulo VI: Pruebas Funcionales

En el siguiente capítulo se presenta el desarrollo y resultados de las pruebas realizadas para la validación de la rutina de control. El alcance de estas pruebas consiste en la comparación de las posiciones radiales de cada servomotor con el control en ejecución y las esperadas por el diseño. Las pruebas se realizan fijando un punto sobre el engrane de transmisión del servomotor y observando su posición conforme al tiempo. Para demostrar los comportamientos típicos de un motor con posiciones lineales y los que no los tienen, se fabricó un prototipo demostrativo de un par de gajos de la escultura únicamente para visualizar el desempeño del controlador, no se pretende reproducir el diseño de la estructura ni de la transmisión, sin embargo, de manera conceptual fueron incluidos en este prototipo para recopilar información referente a la interacción del control con dichos elementos.

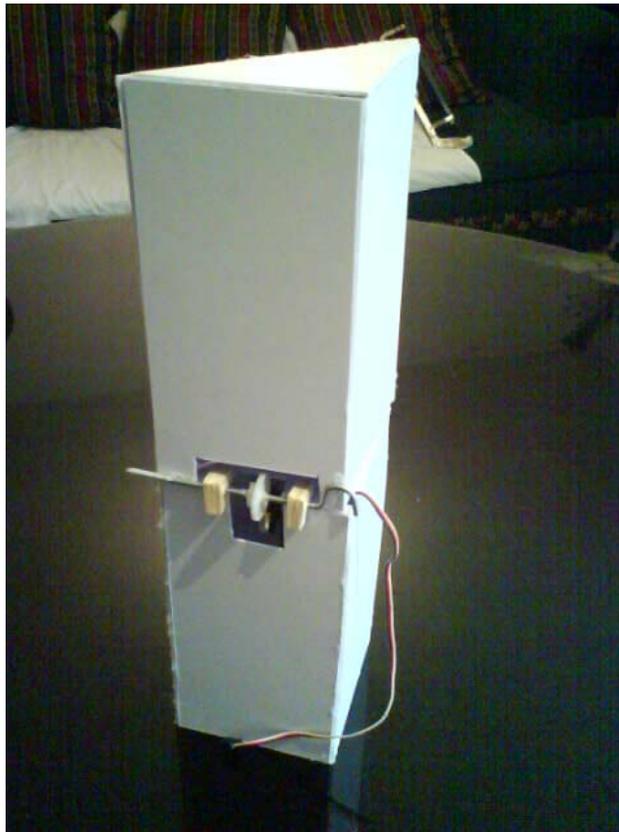


Figura 6.1 Prototipo demostrativo representando un par de gajos de la escultura

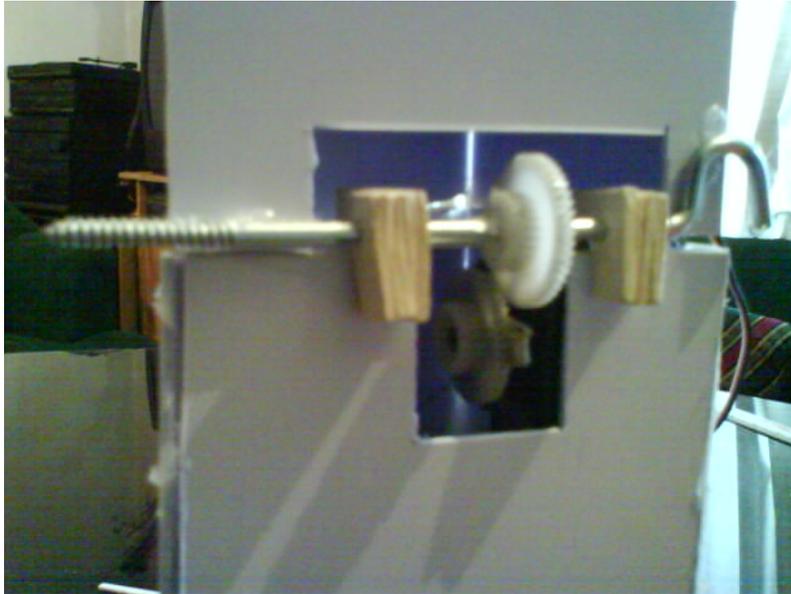


Figura 6.2 Detalle de la transmisión del prototipo

### ***6.1 Relación de perfiles de velocidad entre articulaciones para las transformaciones de cubo a media torre, ventana a torre y torre a cubo.***

De acuerdo a lo indicado en el capítulo anterior, este grupo lo comprenden las articulaciones que en toda la rutina de control tienen un comportamiento lineal en sus posiciones radiales. En él podemos incluir a los motores 5, 6, 7 y 8. Se probaron individualmente cada una de las rutinas de los 4 motores, se observó su posición radial y se comparó con las posiciones indicadas en la tabla 5.3 obteniendo como resultado la correcta operación de las rutinas. A la vista los motores giran de forma homogénea respecto al tiempo, es decir, recorren la misma distancia en los mismos intervalos de tiempo, esto debido al comportamiento lineal del perfil de velocidad para estos motores.

El desplazamiento de los servomotores fue pausado, con un movimiento parecido al de un motor a pasos, este movimiento no resulta el más óptimo pues el desplazamiento no es continuo sino que presenta pequeñas pausas entre cada avance, este comportamiento es debido a la programación del control, ya que solamente se tienen 20 pasos entre los 180 grados que conforman el movimiento de los motores.

## ***6.2 Relación de perfiles de velocidad entre articulaciones para la transformación media torre-ventana***

Esta transformación tiene la particularidad de que si comparamos los perfiles de velocidad de los motores que recorren 180 grados contra los que recorren sólo 90, se encuentra que para los segundos la gráfica sería una curva muy ligera en comparación con los primeros que tienen una línea recta para describir sus posiciones respecto al tiempo. Esta peculiaridad fue tomada del trabajo “Diseño de escultura móvil”. En este grupo podemos incluir a los motores 1, 2, 3 y 4. De igual manera que con los motores anteriores se probaron individualmente las rutinas de estos 4 motores, pero esta vez, además de tomar en cuenta las posiciones de la tabla 5.3, se comparó las posiciones de la gráfica 5.1 para el periodo de transformación entre las figuras 2 y 3 (de “media torre” a “ventana”, ver sección 5.3.3). Las pruebas arrojaron como resultado la correcta ubicación de los motores tanto para las etapas lineales como las no lineales.

El desempeño fue muy similar a los anteriores, en cuanto a la forma de desplazarse, observando un movimiento pausado, aunque en este caso los cambios de posición presentan intervalos de tiempo distintos. Con las pruebas en el prototipo es más claro ver este comportamiento, ya que por la longitud del gajo se percibe mejor la trayectoria de los gajos y por ende la posición de los motores.

Aunque el objetivo de estas pruebas era comprobar el funcionamiento de la rutina de control, gracias a ellas, fue posible recopilar información valiosa sobre el ensamble de la estructura. Se observó que existen esfuerzos notables sobre el servomotor, lo que provoca un ligero desplazamiento del mismo, esto puede ocasionar que se pierda

contacto entre los engranes, por lo que es importante cuidar la sujeción del servomotor sobre la estructura, procurando que esta sea lo más fijo posible. Lo mismo puede causar una mala alineación del servomotor, ya que si no se tiene el eje de rotación del servomotor paralelo con el eje de rotación del eje del gajo, este presentará un movimiento excéntrico respecto al otro, provocando mayores esfuerzos entre los ejes y en el peor de los casos una separación de los engranes.

## Conclusiones

La propuesta de la estructura cumple el límite de peso que está fijado de acuerdo a la capacidad de torque de los servomotores propuestos. La geometría de la escultura no fue modificada con relación a la escultura original, sin embargo se tuvo que retirar parte de la estructura para acoplar los mecanismos y cables, en una revisión del diseño se podrían reducir estos claros para obtener una figura más estética.

El servomotor seleccionado cuenta con una capacidad de torque superior a la calculada para la posición de mayor carga, con esto se garantiza que en todas las posiciones se los motores podrán fijarse en la posición deseada.

El sistema de control seleccionado corresponde a un controlador dedicado basado en microcontrolador Microchip PIC, esta herramienta resultó de gran ayuda gracias a su capacidad de salidas digitales, permitiendo que el control se realice en una sola tarjeta, ahorrando costos y espacio

La rutina de control cumple con éxito las posiciones esperadas en las tablas de diseño, que corresponden a 4 de las 7 transformaciones que la escultura permite. En una revisión de la rutina, se podría incluir las otras posiciones, ya que la limitante del programa es el número de líneas por bloque, sin embargo este se encuentra saturado en alrededor del 40% por lo que aún se dispone de espacio para insertar el código.

Recomendaciones de mejora en el diseño:

- a) Utilizar restricciones mecánicas para ubicar el soporte del servomotor en la estructura. Esto quiere decir que mediante formas geométricas idénticas, tanto en la estructura como en el sujetador, se puede lograr un ensamble más exacto.
- b) El uso de un arreglo de engrane sin fin, mejora el desempeño mecánico, ya que se requiere un motor con menos potencia y que en caso de pérdida de suministro

eléctrico, la escultura permanecerá en el último estado. La consideración necesaria para este arreglo es que se debe conocer la posición del gajo y retroalimentar al controlador para detener o aumentar el avance. Esto se puede lograr modificando el interior de los motores, extrayendo el potenciómetro que le sirve como referencia y colocándolo sobre el eje de giro del gajo.

- c) Refinar el código para estandarizar los periodos inactivos de las diferentes secuencias, generando un bloque estándar de mayor precisión.
- d) Cambiar la duración de los bloques para aumentar la resolución del servomotor.
- e) Se puede modificar el diseño de la pieza que sujeta al eje con los gajos, ya que pertenece a un ensamble de una pieza comercial que se fija al eje y posteriormente esta se fija a la pieza diseñada. La intención de utilizar piezas comerciales era la de reducir tiempos y costos de fabricación, sin embargo en este caso se puede simplificar el diseño reduciendo el número de piezas si se realiza un cambio en el diseño de la pieza sujetadora de tal manera que cumpla la función de la pieza comercial que se fija al eje.

Durante el desarrollo del proyecto en sus diferentes etapas se enfrentaron diversos obstáculos derivados principalmente de la interacción de los diversos sistemas, esta experiencia deviene en un conocimiento adquirido tanto en el proyecto de este trabajo como en el proceso de diseño en general.

La estrecha interrelación de los sistemas en el proyecto puede generar grandes cambios en alguno como resultado de cambios en los demás, siendo mucho más difícil de corregir aquellos sistemas que por su naturaleza resultan muy complicados en cambiar e incluso en casos más drásticos pueden llevar al cambio total del concepto considerado en las primeras aproximaciones, es por este motivo que los sistemas menos flexibles deben diseñarse primero y a su vez los más flexibles deberán ser diseñados en última instancia. Con esto se logra reducir el tiempo de respuesta y de desempeño como consecuencias de un cambio en alguno de los sistemas.

En cualquier proyecto y siendo más evidente en aquellos en los que hay diferentes sistemas interactuando entre si, hay un gran número de parámetros que pueden afectar al producto final, de tal manera que se deben hacer consideraciones a fin de acotar el problema y encontrar soluciones óptimas y viables. En muchos casos no es suficiente con las consideraciones tomadas en las primeras aproximaciones y es durante la prueba de los principios funcionales que proponemos que podemos verificar si se está acercando el diseño a lo esperado o si se deben tomar decisiones para cumplir con las especificaciones del producto.

El diseño de cualquier producto o equipo pretende resolver ciertos problemas definidos por el usuario, en cuanto se termina un diseño se espera de forma ideal que se cumplan las expectativas de desempeño para las cuales fue creado, sin embargo una vez que el producto está en uso se observan aspectos que pueden brindar mejoras al diseño. Centrando la atención en estos puntos y con las bases del diseño anterior se pueden reducir los tiempos y costos de rediseño, brindando como resultado un mejor producto al usuario final. En este trabajo fue muy importante para agilizar el proceso de diseño, el conocimiento adquirido en el diseño para automatización de la escultura *Brancusi* en gran escala por un grupo de trabajo de alumnos y profesores de la Facultad de Ingeniería de la UNAM [9]. Sus recomendaciones y consideraciones fueron un valioso aporte durante el desarrollo del diseño.

## Bibliografía

- 1 KASSNER, Lily, *Diccionario de la escultura mexicana del siglo XX*, Primera edición, Dirección general de publicaciones, UNAM, México 1983.
- 2 KASSNER, Lily, *La geometría sensual de Sebastián*, Primera impresión, Dirección general de publicaciones, CONACULTA.
- 3 BOLTON, W., *Mecatrónica*, Segunda Edición, Alfaomega 2001.
- 4 MC CLOYD, D., *Robótica una introducción*, Primera Edición, México 1993.
- 5 CRAIG John., *Introduction to robotics, mechanics and control*, Third Edition, Pearson Prentice Hall, 2005.
- 6 SCHILLING, Robert J., *Fundamentals of robotics, analysis and control*, Prentice Hall, USA 1990
- 7 OLLERO, Aníbal., *Robótica Manipuladores y robots móviles*, Boixareu Editores, España 2001.
- 8 SÁNCHEZ, Emilio, *Diseño de un mecanismo de articulación y tracción para una escultura transformable de 8 eslabones*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, México 2008.
- 9 SÁNCHEZ, Arianna, *Diseño de automatización de escultura móvil*, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, México 2009.
- 10 VARIOS, *Material de apoyo*, Programa Empresarial para el Diseño de Productos, CDM-CIDI, 2007.
- 11 ULLMAN, David G. *The Mechanical Design Process*, Tercera EdiciónMc, Graw Hill.
- 12 NORTON, Robert, *Diseño de máquinas*, México 1999, Ed.Prentice Hall.
- 13 KAUFMAN, Gilbert, *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, USA 2000.

## Referencias

- 1b** Centro Nacional de las Artes  
<http://www.cenart.gob.mx/doc/doc/timeline/movins/cinet.html>  
Junio 2007.
- 2b** Sitio de internet de Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger  
<http://www.ulrich-eppinger.net/>  
Junio 2007.
- 3b** Nacional Instruments Co,  
<http://www.ni.com/labview/whatis/>  
Febrero 2008
- 4b** Servomotores marca Futaba  
<http://www.futaba-rc.com/servos/digitalservos.html>  
Febrero 2008
- 5b** Engranés HPC  
[http://www.hpcgears.com/products/spur\\_gears.htm](http://www.hpcgears.com/products/spur_gears.htm)  
Febrero 2008

## **Anexos**

***Anexo A: Código fuente del programa de control***

***Anexo B: Planos de estructuras y ensambles***

***Anexo C: Hojas de Datos***



```

movwf      C2          ;C2=w
movlw      .22         ;w=22
movwf      C3          ;C3=w
movlw      .22         ;w=22
movwf      C4          ;C4=w
movlw      .22         ;w=22
movwf      C5          ;C5=w
movlw      .2          ;w=3
movwf      C6          ;C6=w
movlw      .2          ;w=2
movwf      C7          ;C7=w
movlw      .22         ;w=22
movwf      C8          ;C8=w
movlw      .0          ;w=0
movwf      mC         ;mC=w
clrf      BL          ;BL=.0
clrf      BH          ;BH=.0
clrf      par         ;par=0
clrf      NL          ;NL=0
movlw      .200        ;w=0
movwf      CICLO      ;CICLO=w
movlw      tmr1H      ;w=tmr1H
movwf      TMR1H     ;TMR1H=w
movlw      tmr1L      ;w=tmr1L
movwf      TMR1L     ;TMR1L=w
movlw      b'00000001' ;w= 00000001
movwf      T1CON      ;T1CON= w, preescala = 1:8, timer 1 encendido
goto      $          ;Permanece en la misma linea
;
;*****
; RUTINA DE INTERRUPTIÓN
;*****
;
;
INTER  movlw      .0          ; w=0
xorwf   CONT,w      ;CONT xor w
btfs   STATUS,Z    ;STATUS,Z==1??
goto   P0          ;no ---> ve a P0
movlw  b'11111111' ;si ---> w= 11111111
movwf  PORTD       ;PD= w
;
;*****
; COMPROBACIÓN DE CICLO POSITIVO EN EL PULSO
;*****
;
;
P0     movf      C1,w      ;w=C1
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C1
btfsc  STATUS,Z    ;STATUS,Z==0??
bcf    PORTD,0     ;si ---> PORTD,0 = 0
movf   C2,w      ;no ---> w=C2
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C2
btfsc  STATUS,Z    ;STATUS,Z==0??
bcf    PORTD,1     ;si ---> PORTD,1 = 0
movf   C3,w      ;no ---> w=C3
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C3
btfsc  STATUS,Z    ;STATUS,Z==0??
bcf    PORTD,2     ;si ---> PORTD,2 = 0
movf   C4,w      ;no ---> w=C4
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C4
btfsc  STATUS,Z    ;STATUS,Z==0??
bcf    PORTD,3     ;si ---> PORTD,3 = 0
movf   C5,w      ;no ---> w=C5
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C5
btfsc  STATUS,Z    ;STATUS,Z==0??
bcf    PORTD,4     ;si ---> PORTD,4 = 0
movf   C6,w      ;no ---> w=C6
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C6
btfsc  STATUS,Z    ;STATUS,Z==0??
bcf    PORTD,5     ;si ---> PORTD,5 = 0
movf   C7,w      ;no ---> w=C7
xorwf  CONT,w      ;CONT xor C7

```



```

;
;*****
; SUBROUTINA 2 PARA TRANSFORMACIÓN MEDIA TORRE A VENTANA
;*****
;
;
mC1   incf          C6           ;C6++
      decf          C8           ;C8--
      incf          NL           ;NL++
      movlw        .1           ; w=.1
      xorwf        NL,w         ;NL xor .1
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .2           ;no ---> w=.2
      xorwf        NL,w         ;NL xor .2
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .4           ;no ---> w=.4
      xorwf        NL,w         ;NL xor .4
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .7           ;no ---> w=.7
      xorwf        NL,w         ;NL xor .7
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .9           ;no ---> w=.9
      xorwf        NL,w         ;NL xor .9
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .12          ;no ---> w=.12
      xorwf        NL,w         ;NL xor .12
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .14          ;no ---> w=.14
      xorwf        NL,w         ;NL xor .14
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .16          ;no ---> w=.16
      xorwf        NL,w         ;NL xor .16
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .19          ;no ---> w=.19
      xorwf        NL,w         ;NL xor .1
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==0??
      goto         SubC1        ;si ---> ve a SubC1
      movlw        .22          ;no ---> w=.22
      xorwf        C6,w         ;C6 xor .22
      btfsf        STATUS,Z     ;STATUS,Z==1??
      goto         SAL2        ;no --->ve a SAL2
      incf          mC           ;si ---> mC++, mC=2
      clrf         NL           ;NL=0
      goto         SAL2        ;ve a SAL2
SubC1 incf          C1           ;C1++
      incf          C2           ;C2++
      decf          C3           ;C3 --
      decf          C4           ;C4 --
      goto         SAL2        ;ve a SAL2
;
;*****
; SUBROUTINA 3 PARA TRANSFORMACIÓN VENTANA A TORRE
;*****
;
;
mC2   incf          par         ;par++
      btfsf        par,0       ;par,0==0??
      goto         S2          ;no ---> ve a S2
      decf          C1         ;si ---> C1 --
      decf          C4         ;C4 --
      incf          C2         ;C2 ++
      incf          C3         ;C3 ++
S2     movlw        .2         ; w=.2

```

```

xorwf      C1,w      ;C1 xor .2
btfs      STATUS,Z ;STATUS,Z==1??
goto      SAL2      ;no --->ve a SAL2
incf      mC        ;si ---> mC++, mC=3
clrf      par       ;par=0
goto      SAL2      ;ve a SAL2

;
;*****
;
; SUBROUTINA 4 PARA TRANSFORMACIÓN TORRE A CUBO
;*****
;
;
mC3      decf      C2      ;C2--
          decf      C6      ;C6--
          decf      C7      ;C7--
          incf      C4      ;C4 ++
          incf      C5      ;C5 ++
          incf      C8      ;C8 ++
          movlw     .2      ; w=.2
          xorwf     C2,w    ;C2 xor .0
          btfs     STATUS,Z ;STATUS,Z==0??
          clrf     mC      ;si ---> mC=0
          goto     SAL2    ;no ---> ve a SAL2

;
;*****
;
; REGRESO A MODO "EN ESPERA"
;*****
;
;
SAL      incf      CONT      ;CONT++
SAL2    movlw     tmr1H      ;w=tmr1H
          movwf     TMR1H     ;TMR1H=w
          movlw     tmr1L      ;w=tmr1L
          movwf     TMR1L     ;TMR1L=w
          bcf      PIR1,TMR1IF ;TMR1IF=0 apaga la bandera del timer 1
          retfie           ;sale de interrupcion

          end

```

## Anexo B: Planos

### **ENSAMBLE SERVOMOTOR**

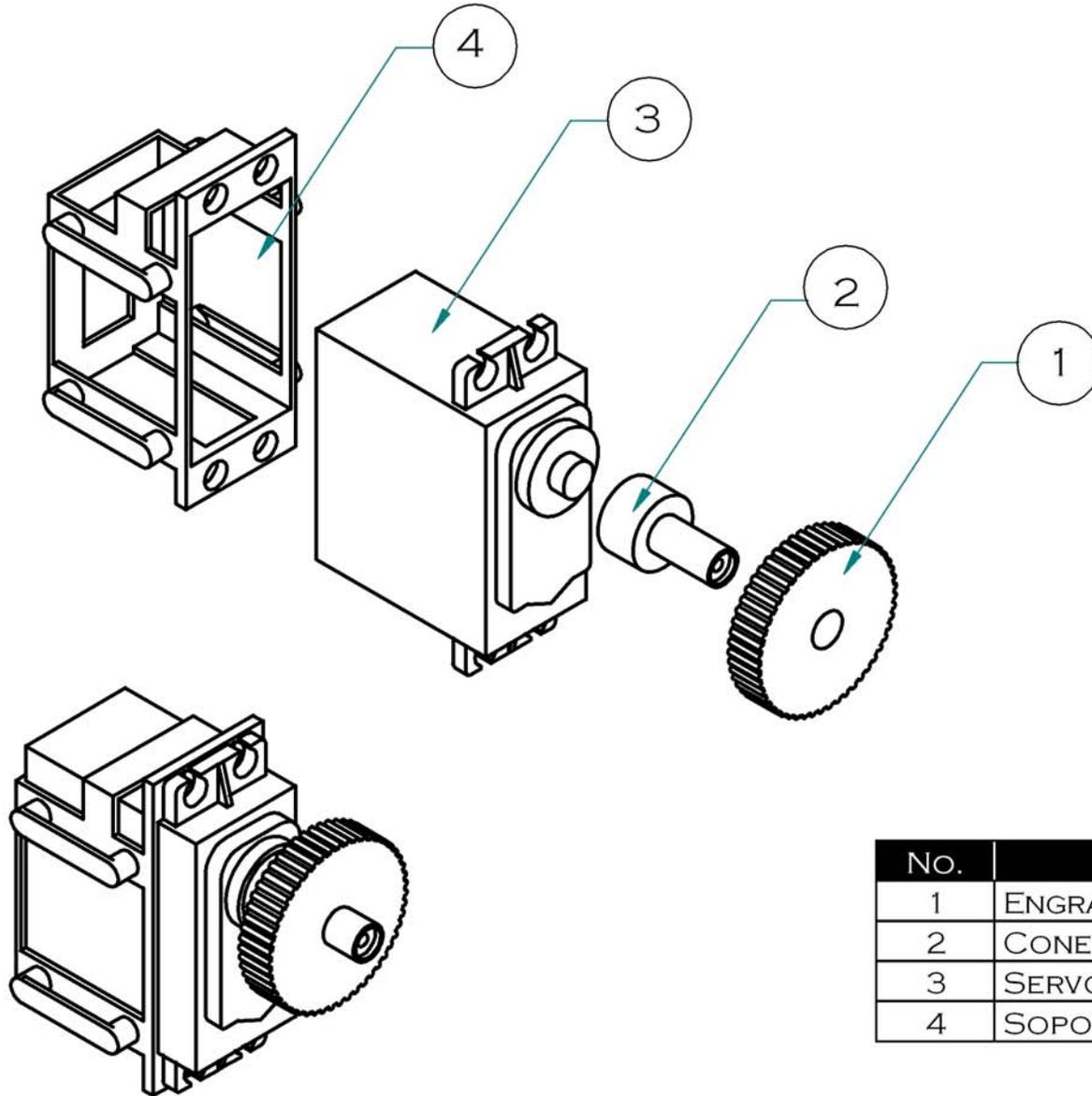
No. Dibujo	Descripción	Hoja de Datos	Revisión
AB-ES-ES-01	Ensamble	--	0
AB-ES-ES-02	Engrane	En Anexo C	0
AB-ES-ES-03	Conector	--	0
AB-ES-ES-04	Servomotor	En Anexo C	0
AB-ES-ES-05	Soporte	--	0

### **ENSAMBLE ARTICULACIÓN**

No. Dibujo	Descripción	Hoja de Datos	Revisión
AB-ES-ES-11	Ensamble	--	0
AB-ES-ES-12	Conector	--	0
AB-ES-ES-13	Sujetador	--	0
AB-ES-ES-14	EJE	--	0
AB-ES-ES-02	Engrane	En Anexo C	0

### **ESTRUCTURA DE LOS GAJOS**

No. Dibujo	Descripción	Hoja de Datos	Revisión
AB-ES-GA-01	Estructura Gajo A	--	0
AB-ES-GB-01	Estructura Gajo B	--	0
AB-ES-GC-01	Estructura Gajo C	--	0
AB-ES-GD-01	Estructura Gajo D	--	0
AB-ES-GE-01	Estructura Gajo E	--	0
AB-ES-GF-01	Estructura Gajo F	--	0
AB-ES-GG-01	Estructura Gajo G	--	0
AB-ES-GH-01	Estructura Gajo H	--	0



No.	PIEZA	No. PLANO
1	ENGRANE	AB-ES-ES-02
2	CONECTOR	AB-ES-ES-03
3	SERVOMOTOR	AB-ES-ES-04
4	SOPORTE	AB-ES-ES-05



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

## ENSAMBLE SERVOMOTOR

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN

0

FECHA

28-AGO-09

DIBUJÓ

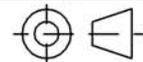
KML

REVISÓ

SCC

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA

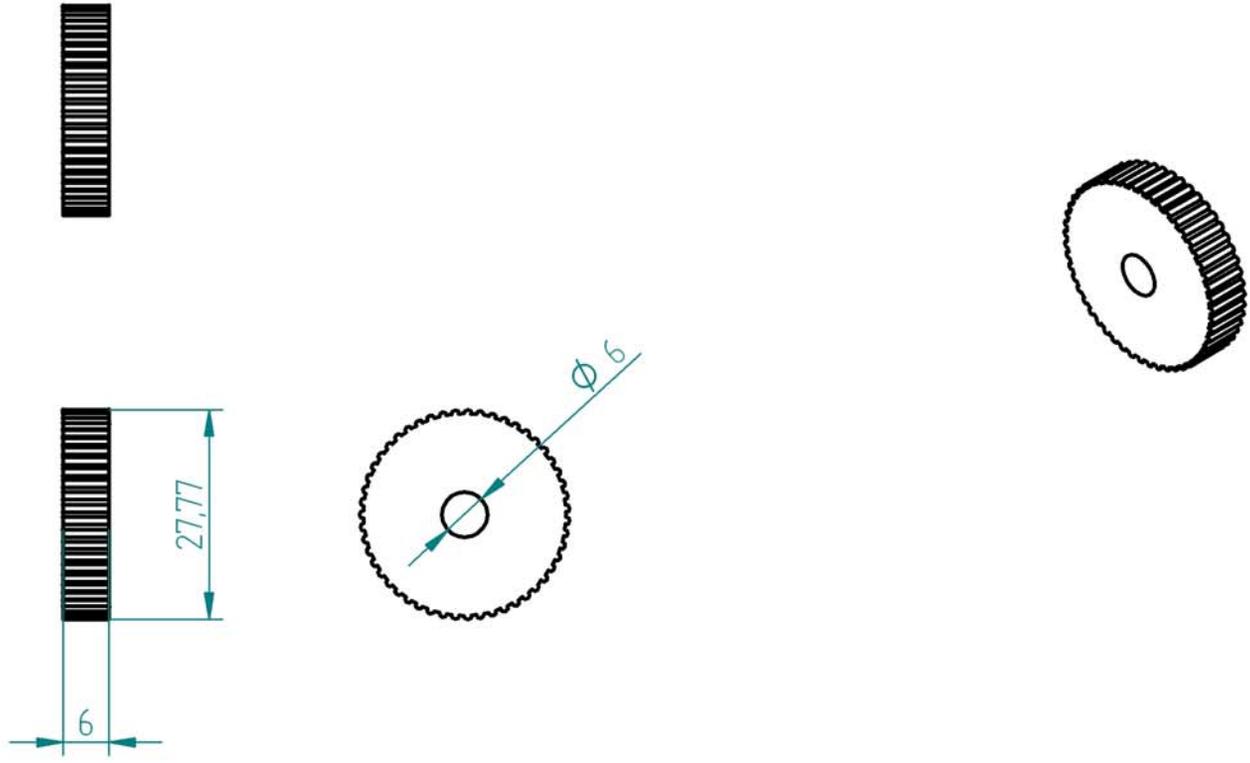


ESCALA:

1:1

UNIDADES:

[MM]



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:  
**ENGRANE DEL ENSAMBLE  
SERVOMOTOR**

Tema:  
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

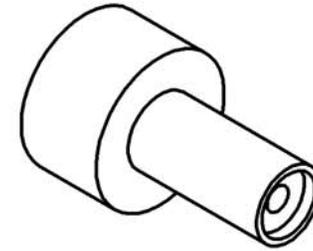
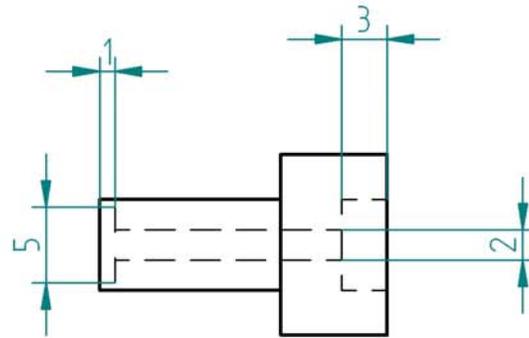
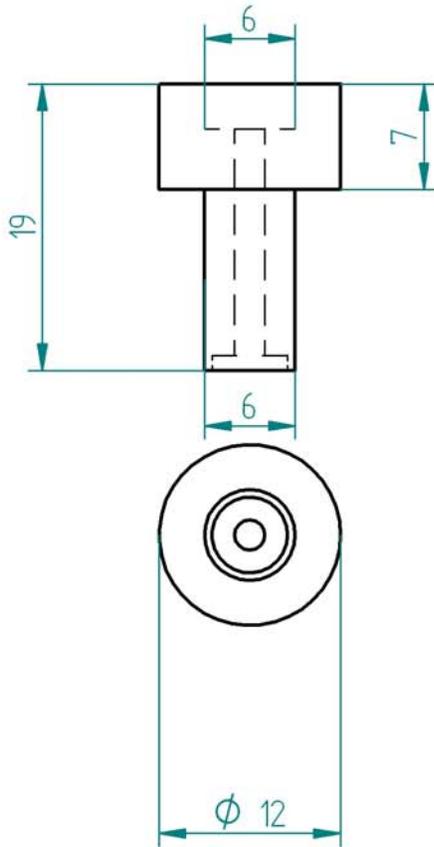
ESCALA: 1:1

UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

**CONECTOR DEL  
ENSAMBLE SERVOMOTOR**

TEMA:

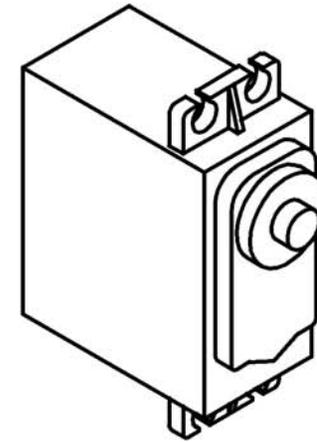
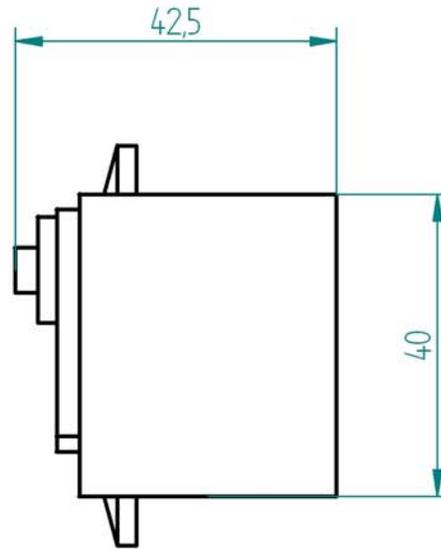
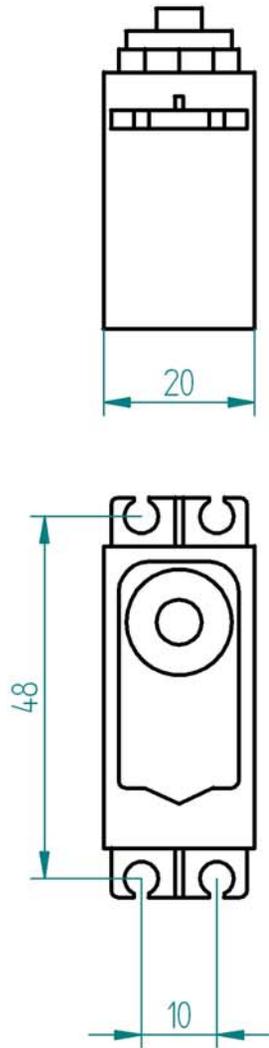
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

ESCALA: 2:1 UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
  
DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

# SERVOMOTOR

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCALA MÓVIL PARA INTERIORES

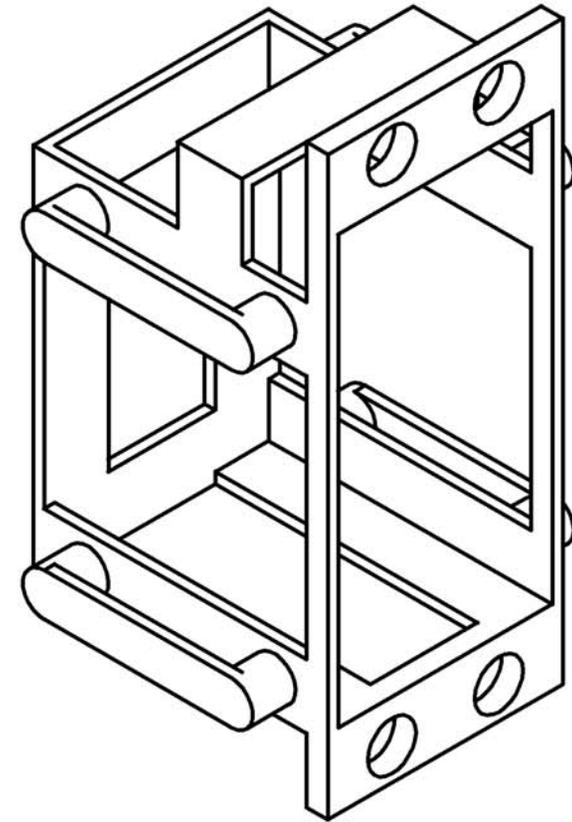
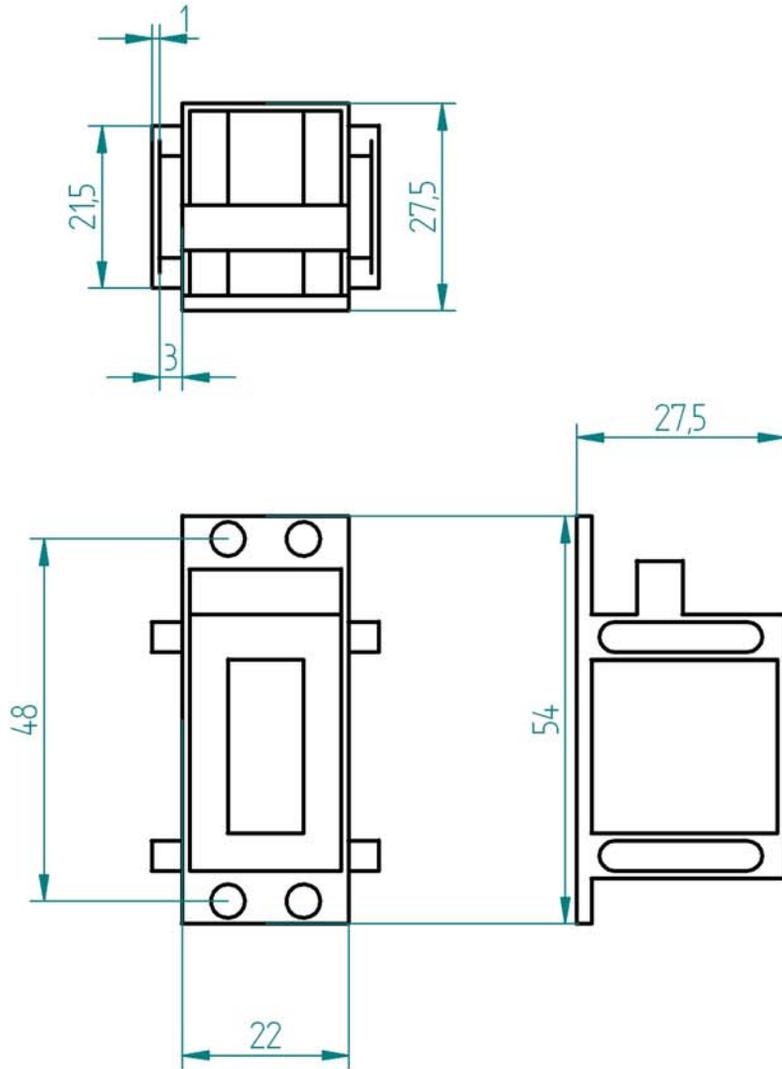
REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

ESCALA:	UNIDADES:
1:1	[MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
  
DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





2:1



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Título:

## SOPORTE PARA SERVOMOTOR

Tesis:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-Ago-09	KML	SCC

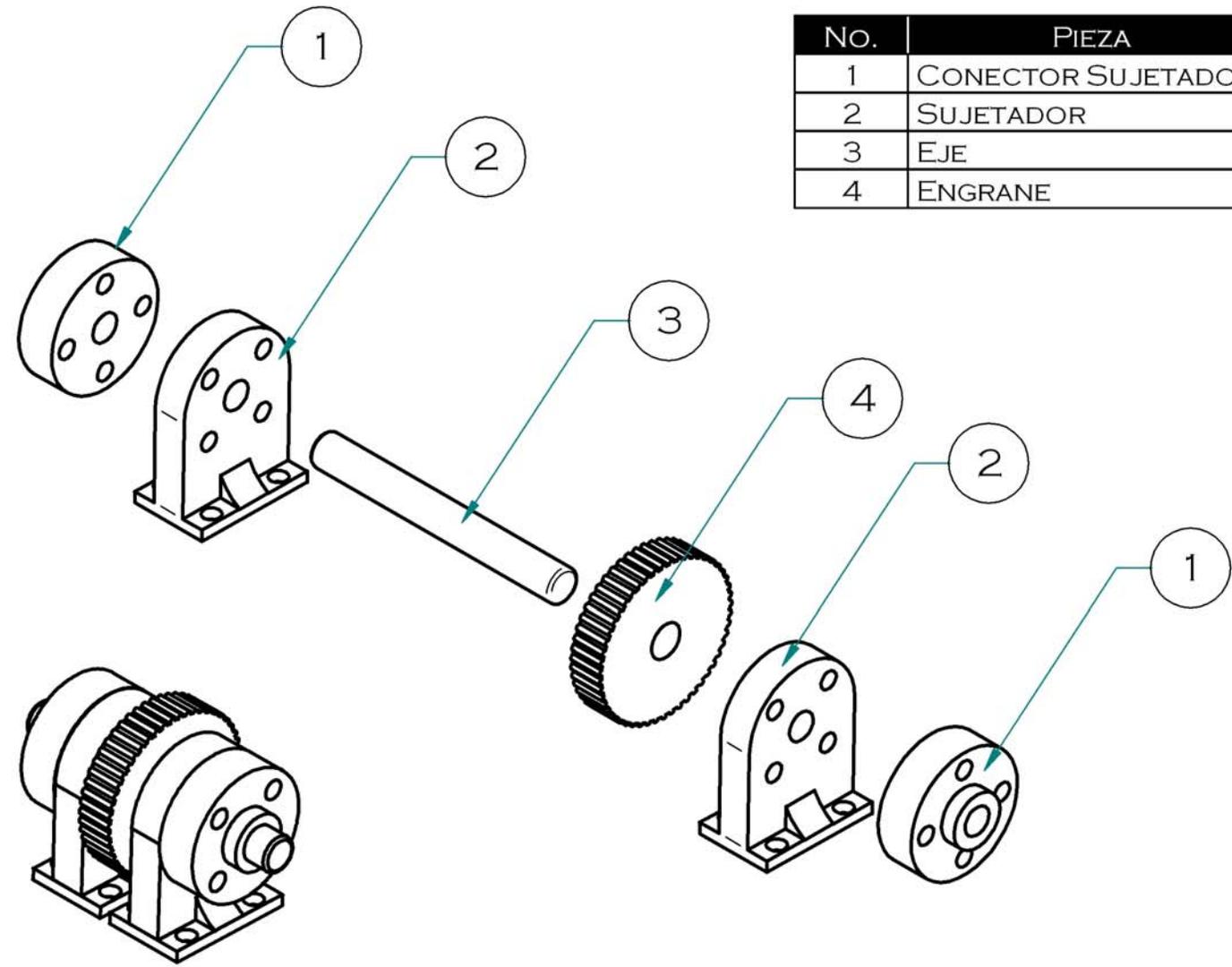
  

 	ESCALA: 1:1	UNIDADES: [MM]
---	----------------	-------------------

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





No.	PIEZA	No. PLANO
1	CONECTOR SUJETADOR	AB-ES-ES-12
2	SUJETADOR	AB-ES-ES-13
3	EJE	AB-ES-ES-14
4	ENGRANE	AB-ES-ES-02



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:  
**ENSAMBLE  
ARTICULACIÓN**

TEMA:  
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCU LTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

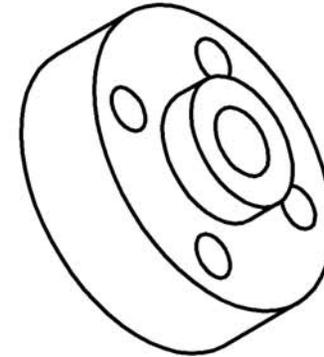
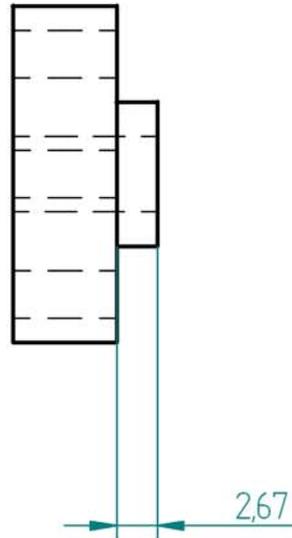
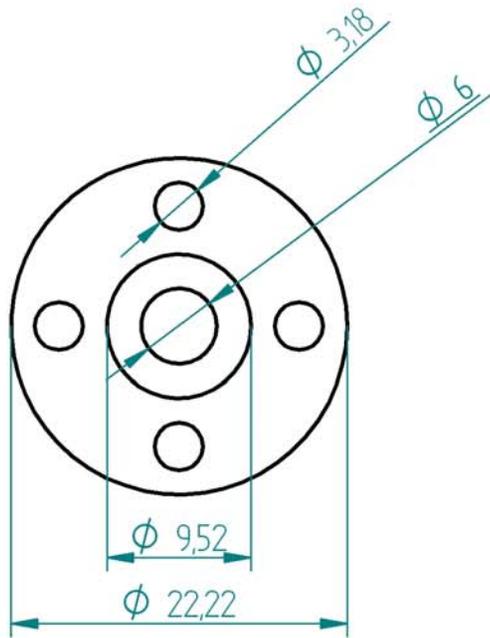
ESCALA: 1:1

UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Título:

## SUJETADOR CONECTOR

Tema:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCALERA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN

FECHA

DIBUJÓ

REVISÓ

0

28-Ago-09

KML

SCC



Escala:

2:1

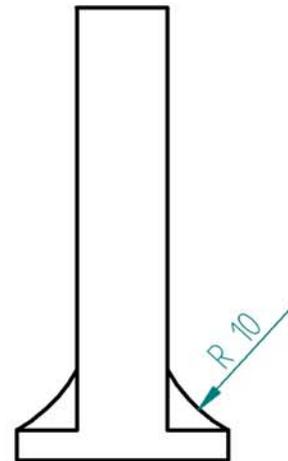
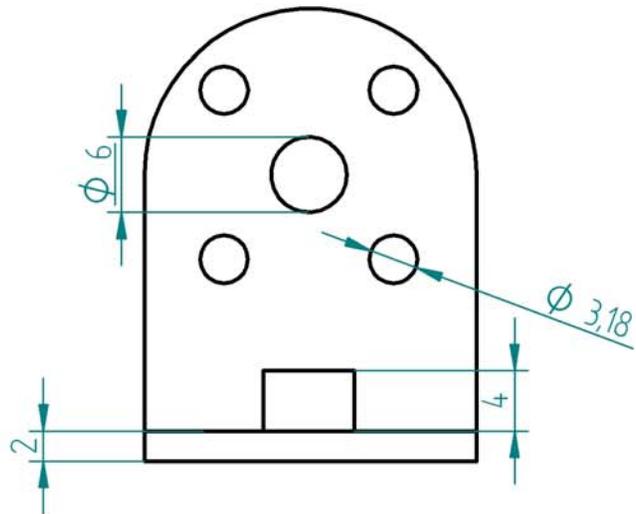
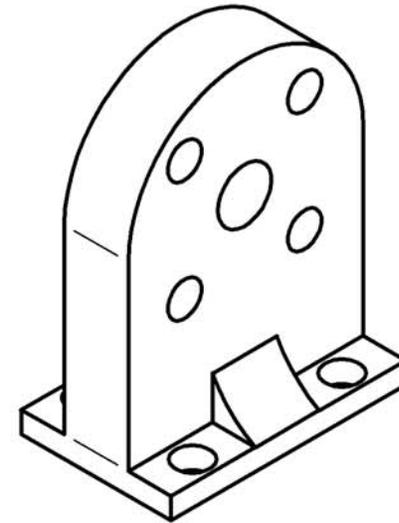
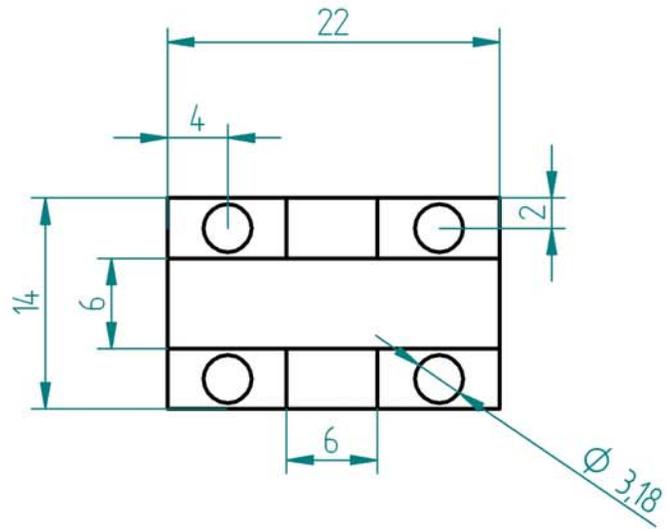
UNIDADES:

[MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

## CONECTOR ARTICULACIÓN

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN

0

FECHA

28-AGO-09

DIBUJÓ

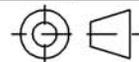
KML

REVISÓ

SCC

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA

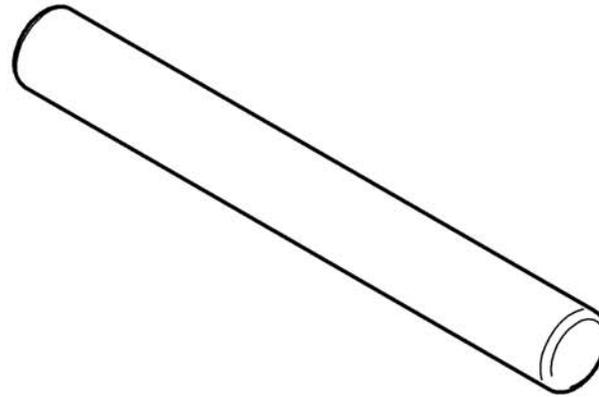
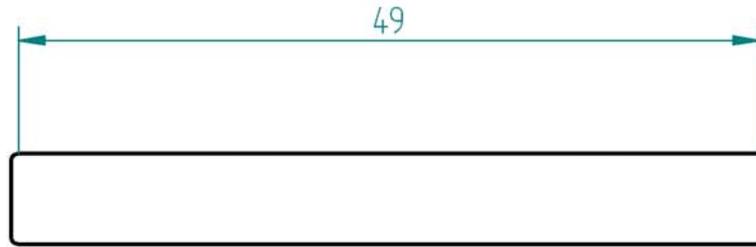


ESCALA:

2:1

UNIDADES:

[MM]



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

EJE ARTICULACIÓN

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCALERA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

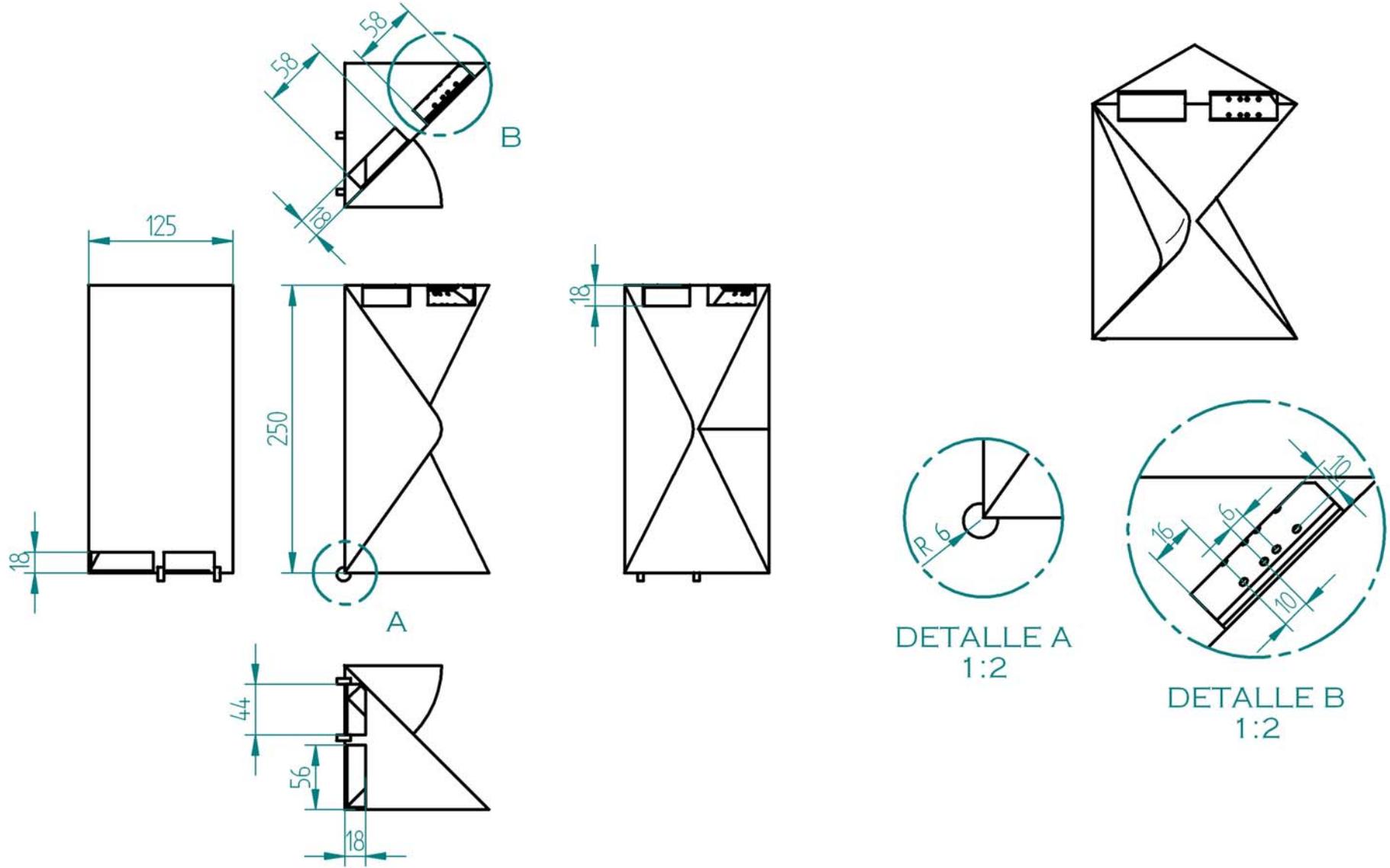
ESCALA: 2:1

UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





DETALLE A  
1:2

DETALLE B  
1:2



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

ESTRUCTURA GAJO A

TEMA:

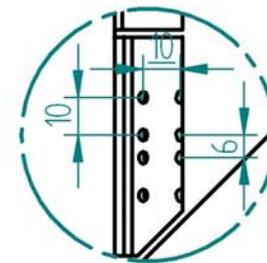
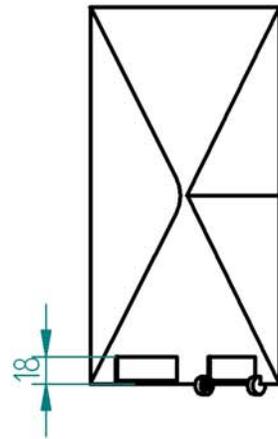
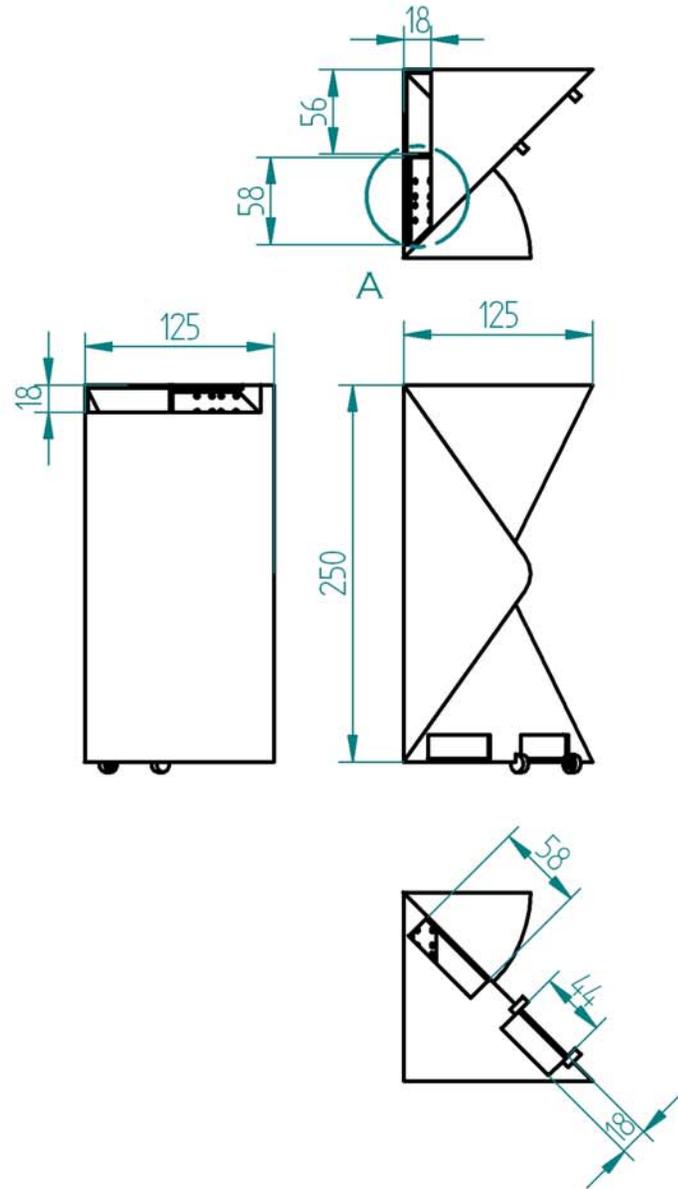
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCALERA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-Ago-09	KML	SCC

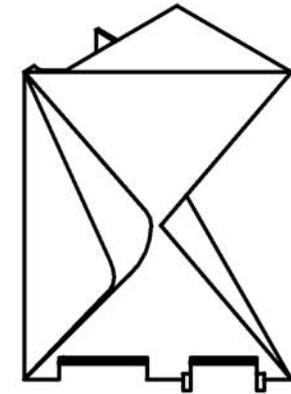
ESCALA: 1:5 UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





DETALLE A  
1:2



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

ESTRUCTURA GAJO B

FECHA:

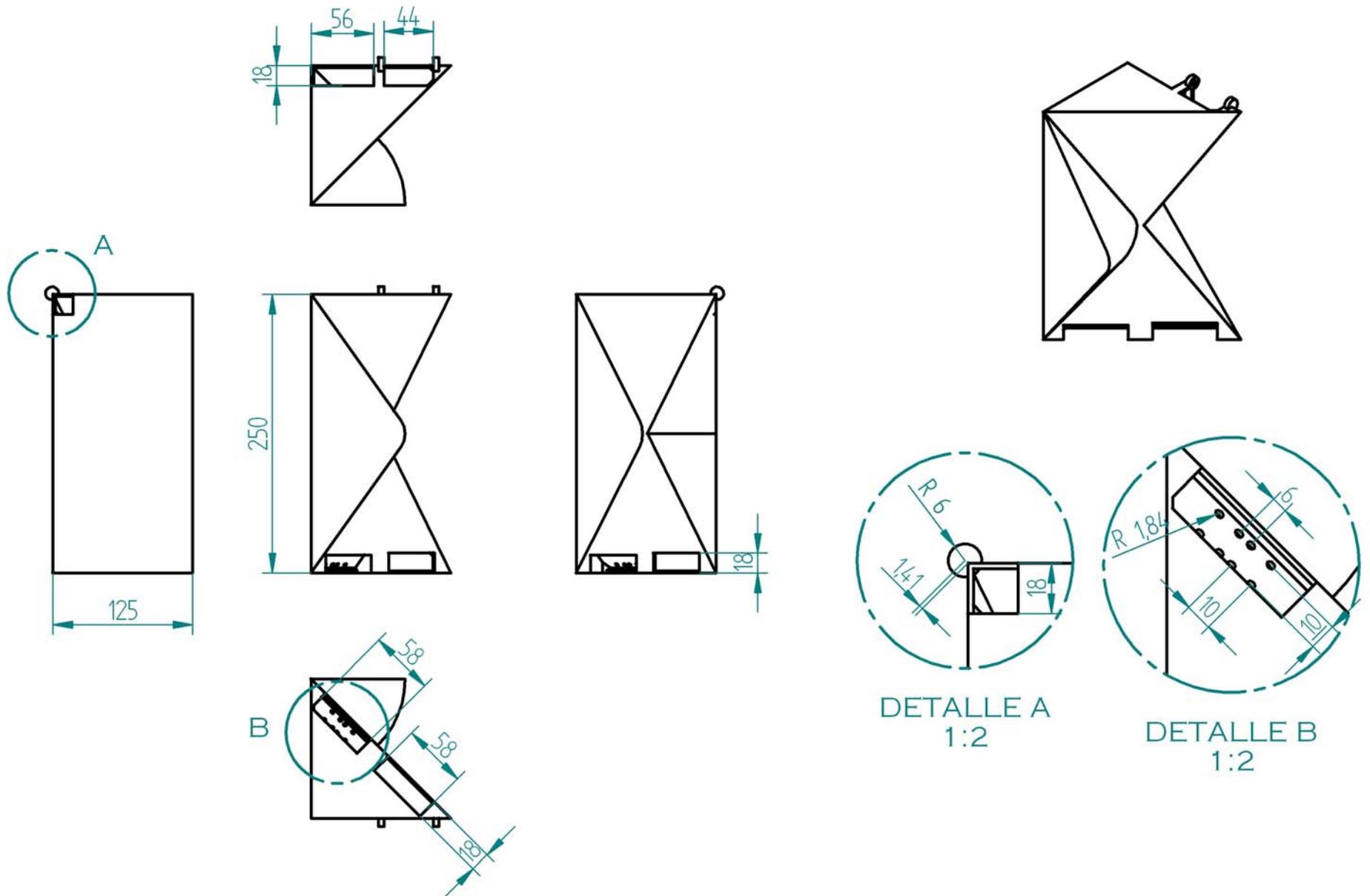
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-Ago-09	KML	SCC

ESCALA: 1:5 UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





DETALLE A  
1:2

DETALLE B  
1:2



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

# ESTRUCTURA GAJO C

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCALERA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC



ESCALA:

1:5

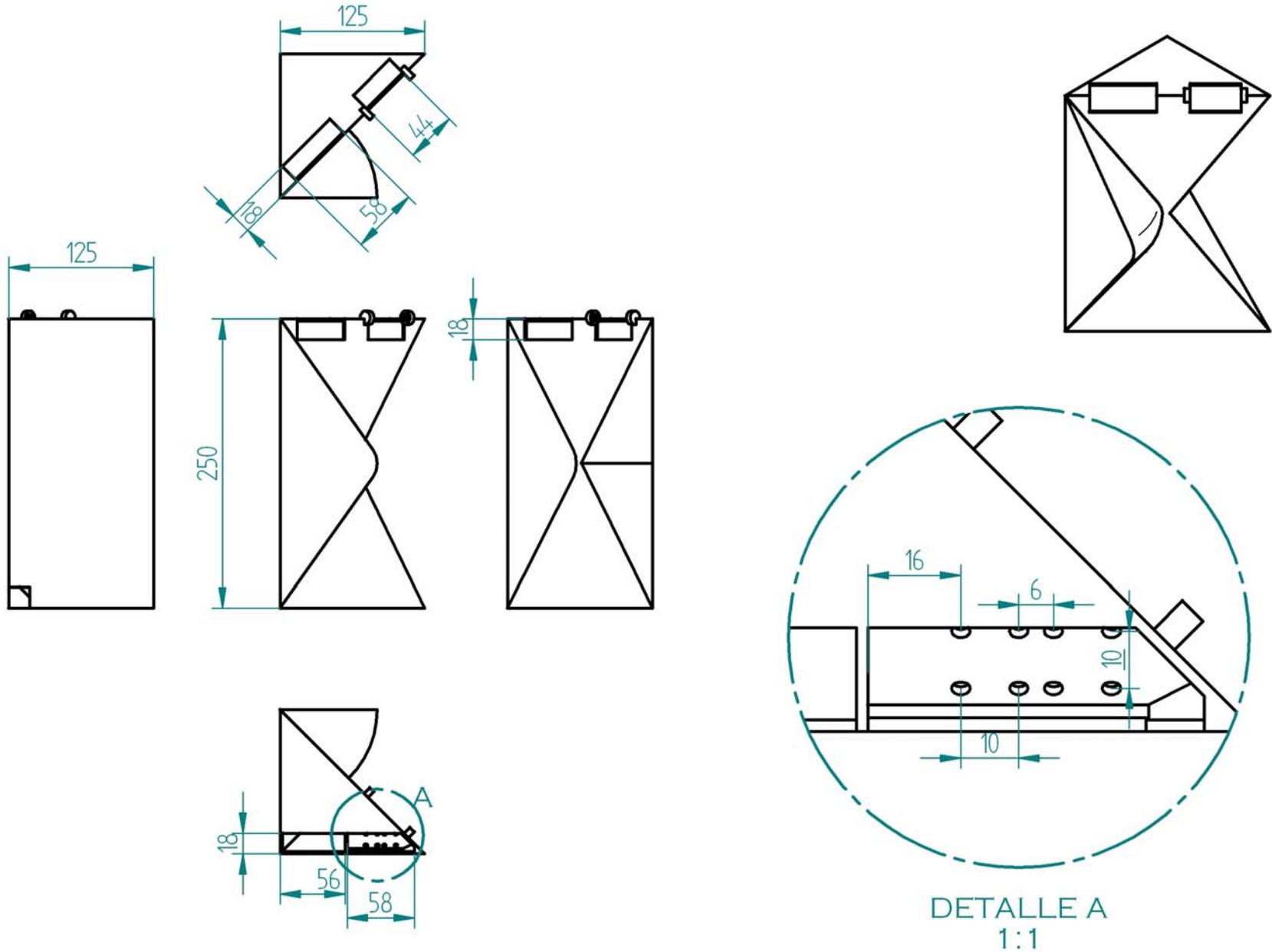
UNIDADES:

[MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

ESTRUCTURA GAJO D

TEMA:

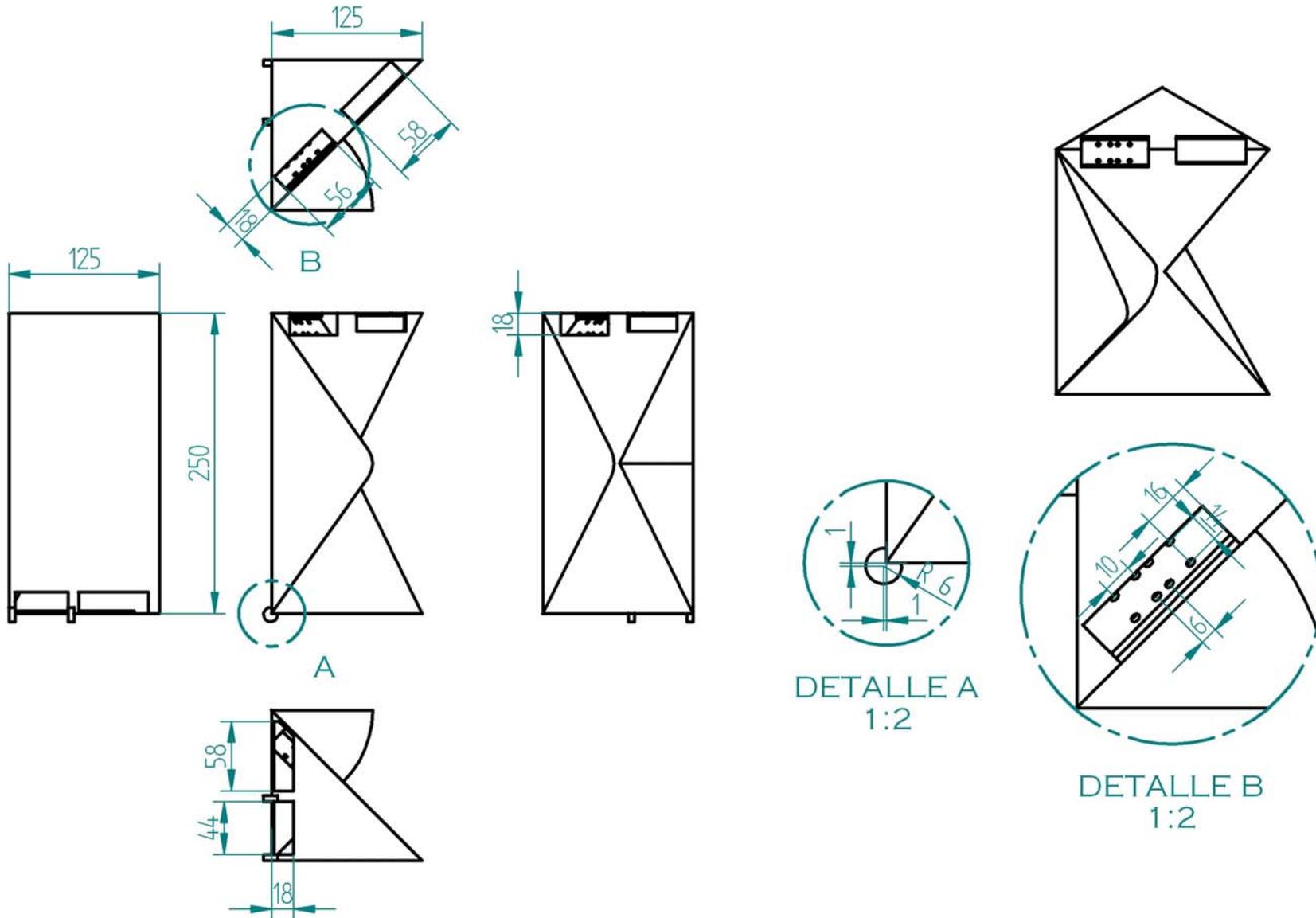
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-Ago-09	KML	SCC

ESCALA: 1:5 UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





DETALLE A  
1:2

DETALLE B  
1:2



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:  
**ESTRUCTURA GAJO E**

TEMA:  
DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCU LTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

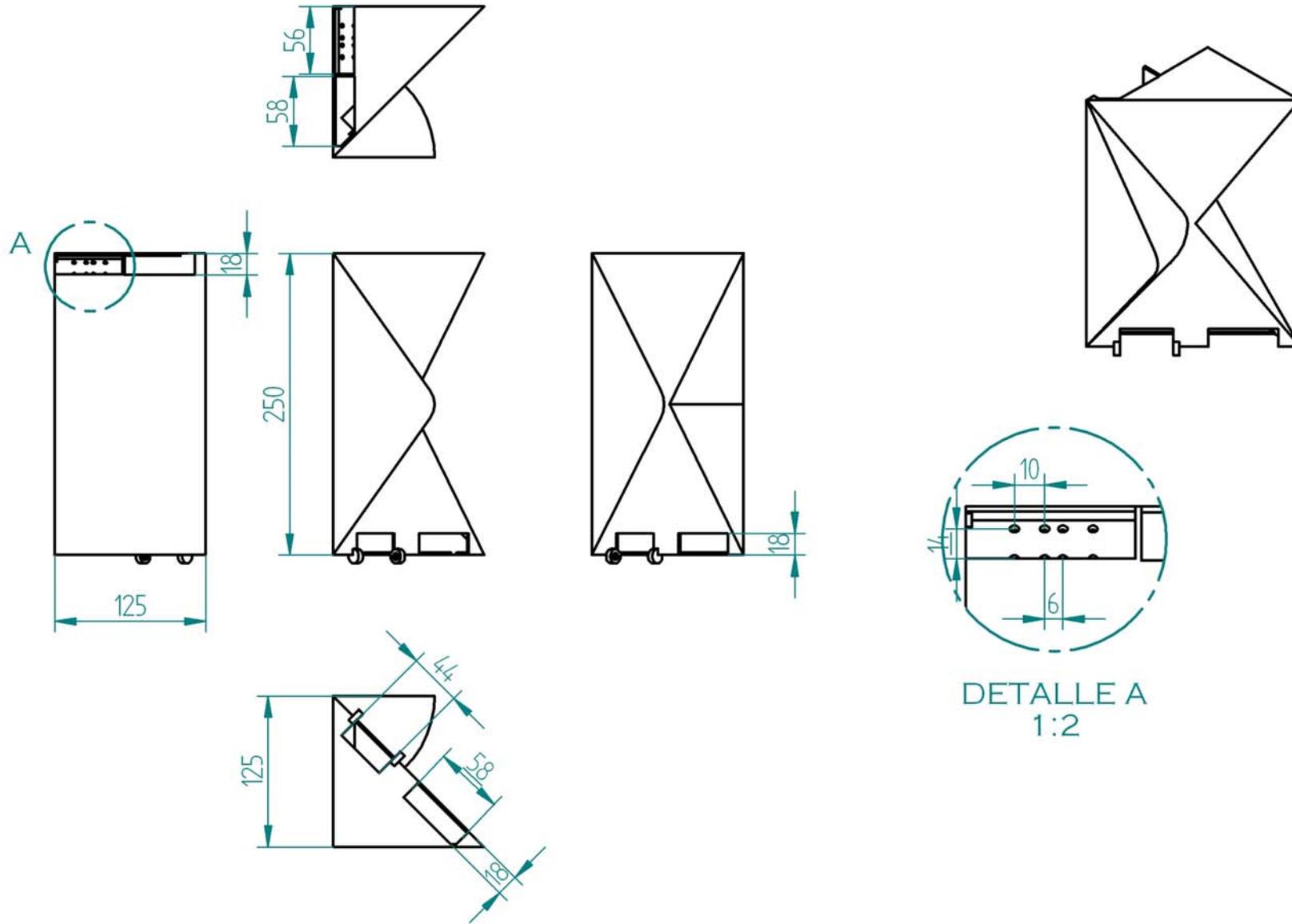
ESCALA:  
1:5

UNIDADES:  
[MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

# ESTRUCTURA GAJO F

TESIS:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUPTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN

0

FECHA

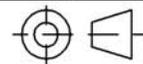
28-Ago-09

DIBUJÓ

KML

REVISÓ

SCC



ESCALA:

1:5

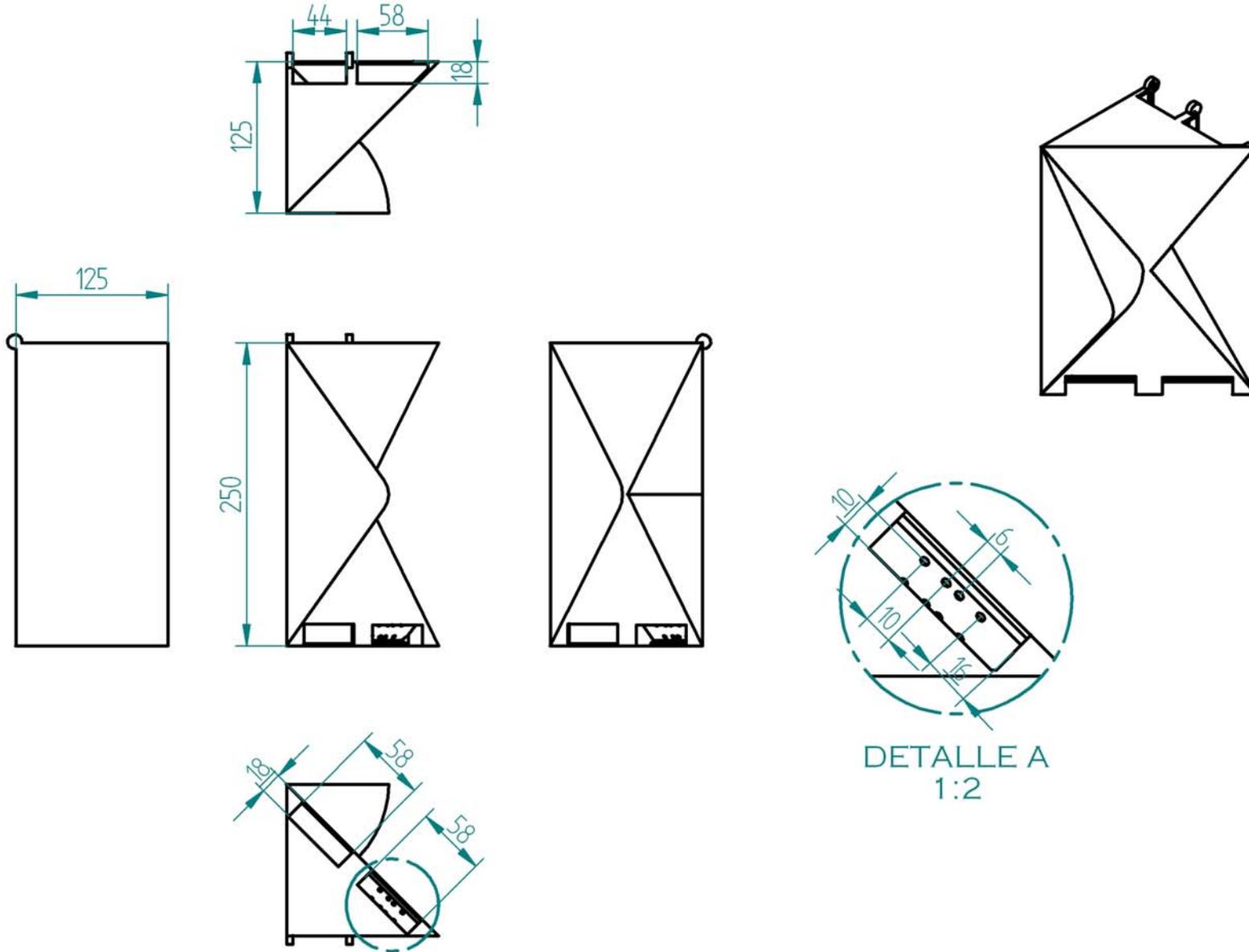
UNIDADES:

[MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





A



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

ESTRUCTURA GAJO G

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCUULTURA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN

FECHA

DIBUJÓ

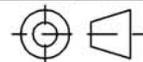
REVISÓ

0

28-AGO-09

KML

SCC



ESCALA:

1:5

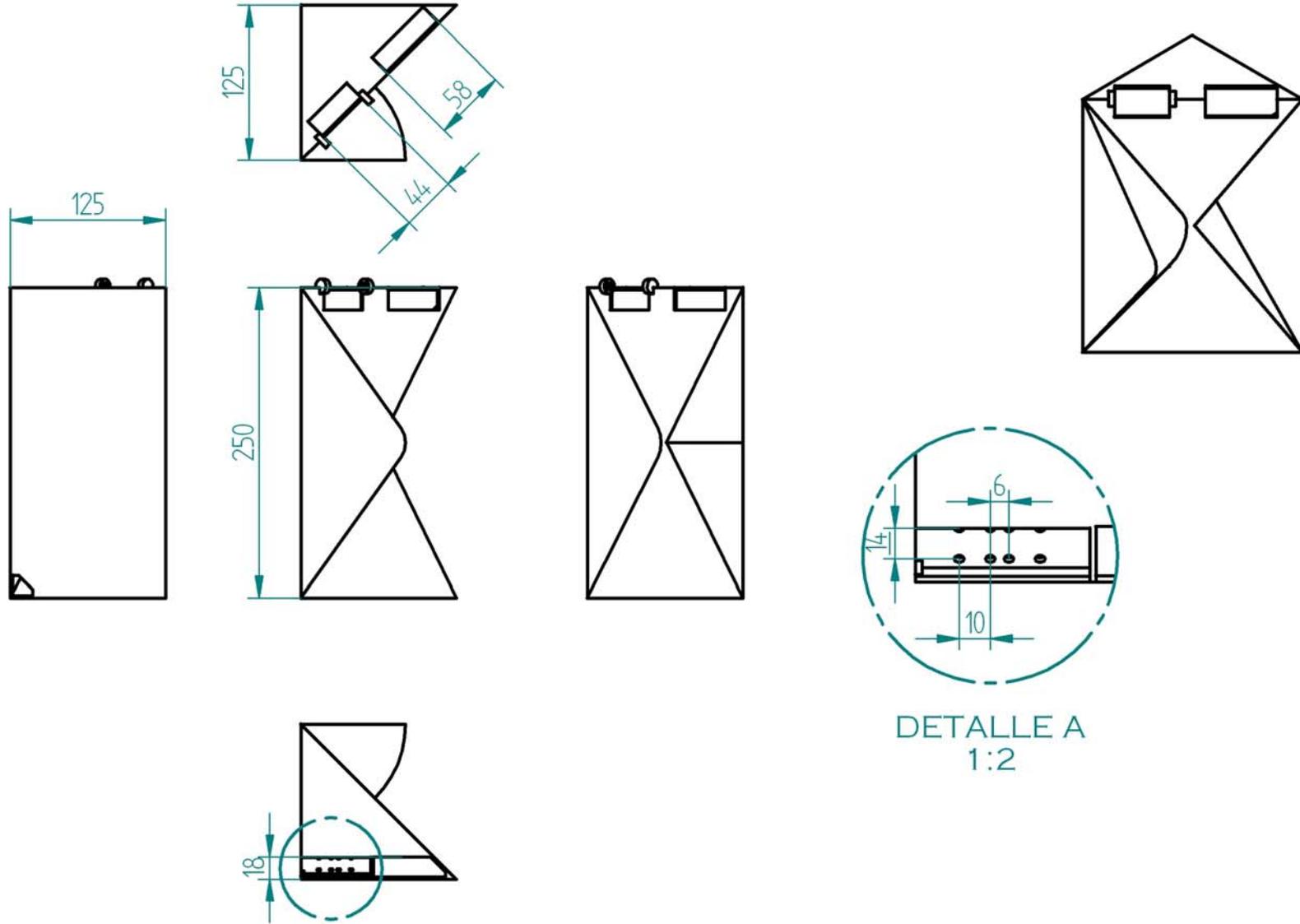
UNIDADES:

[MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA

DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA





A

DETALLE A  
1:2



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

TÍTULO:

ESTRUCTURA GAJO H

TEMA:

DISEÑO DE AUTOMATIZACIÓN DE  
ESCALERA MÓVIL PARA INTERIORES

REVISIÓN	FECHA	DIBUJÓ	REVISÓ
0	28-AGO-09	KML	SCC

ESCALA: 1:5

UNIDADES: [MM]

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
  
DEPARTAMENTO  
DE MECATRÓNICA



## **Anexo C: Hojas de Datos**

### **- SERVOMOTOR**

**Marca: HI-TEC**

**Modelo: HSR5990TG**

### **- ENGRANE**

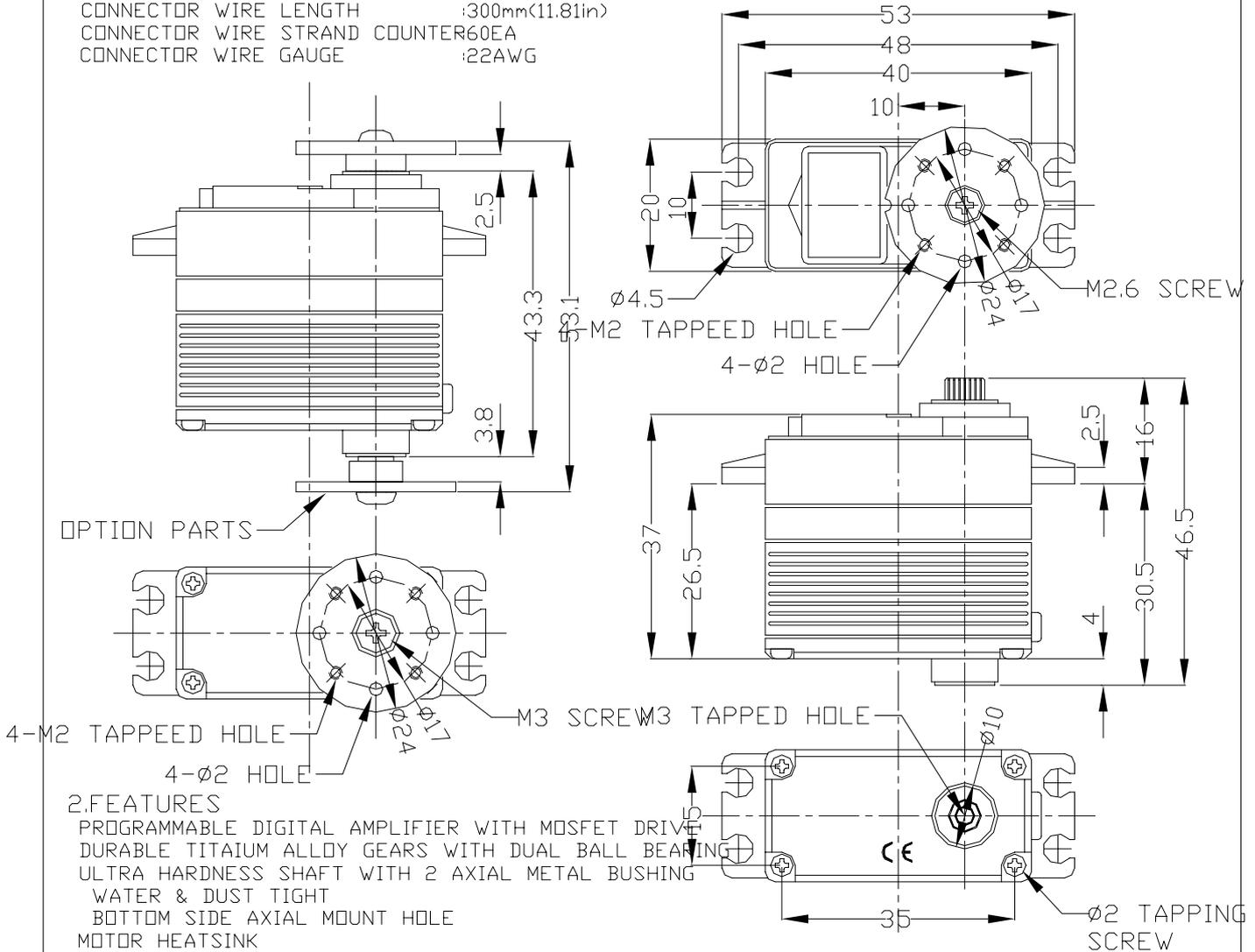
**Marca: HPC Gears**

**Modelo: G0.5-53**

# GENERAL SPECIFICATION OF HSR-5990TG CORELESS DIGITAL ROBOT SERVO

## 1. TECHNICAL VALUE

CONTROL SYSTEM	: +PULSE WIDTH CONTROL 1500usec NEUTRAL	
OPERATING VOLTAGE RANGE	: 6.0V TO 7.4V	
OPERATING TEMPERATURE RANGE	: -20°C TO +60°C (-4°F TO +140°F)	
TEST VOLTAGE	: AT 6.0V	AT 7.4V
OPERATING SPEED	: 0.17sec/60° AT NO LOAD	0.14sec/60° AT NO LOAD
STALL TORQUE	: 24.0kg.cm(333.29oz.in)	30.0kg.cm(416.61oz.in)
STANDING TORQUE	: 31.2kg.cm(433.27oz.in)/5° HOLDDOUT	39.0kg.cm(541.59oz.in)/5° HOLDDOUT
IDLE CURRENT	: 8mA AT STOPPED	10mA AT STOPPED
RUNNING CURRENT	: 300mA/NO LOAD RUNNING	380mA/NO LOAD RUNNING
STALL CURRENT	: 4200mA	5200mA
DEAD BAND WIDTH	: 2usec	2usec
OPERATING TRAVEL	: 90±1°/ONE SIDE PULSE TRAVELING 400usec	
DIRECTION	: CLOCK WISE/PULSE TRAVELING 1500 TO 1900usec	
MOTOR TYPE	: CORELESS METAL BRUSH	
POTENTIOMETER TYPE	: 6 SLIDER/INDIRECT DRIVE	
AMPLIFIER TYPE	: DIGITAL AMPLIFIER WITH MOSFET DRIVE	
DIMENSIONS	: 40x20x37mm(1.57x0.78x1.45in)	
WEIGHT	: 68g(2.39oz)	
BALL BEARING	: DUAL/MR106	
GEAR MATERIAL	: 1 METAL-KARBONITE & 3 TITANIUM GEARS	
HORN GEAR SPLINE	: 24 SEGMENTS/φ5.76	
SPLINED HORNS	: REGULAR METAL: R-MD	
CONNECTOR WIRE LENGTH	: 300mm(11.81in)	
CONNECTOR WIRE STRAND COUNTER	60EA	
CONNECTOR WIRE GAUGE	: 22AWG	



## 2. FEATURES

- PROGRAMMABLE DIGITAL AMPLIFIER WITH MOSFET DRIVE
- DURABLE TITANIUM ALLOY GEARS WITH DUAL BALL BEARING
- ULTRA HARDNESS SHAFT WITH 2 AXIAL METAL BUSHING
- WATER & DUST TIGHT
- BOTTOM SIDE AXIAL MOUNT HOLE
- MOTOR HEATSINK

## 3. APPLICATIONS

ROBOTS

# Spur Gears

## Materials

Standard duty

STD : Steel 214M15/045M10

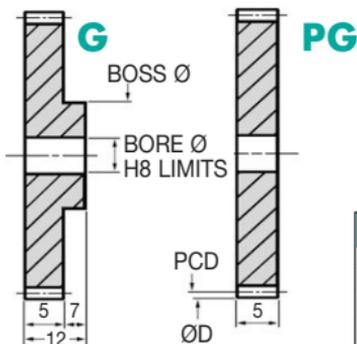
ALTERNATIVE : Brass, Tufnol or Delrin

**0.5 MOD**

20° P.A.

SPECIAL TEETH : between 10 - 250

TORQUE CHECK 50 teeth x 1000 rpm variations at back	214M15 303S21 TORQUE Nm. K.W.	214M15 Cse/HD 1.850 0.194	Brass 0.195 0.021	Tufnol 0.156 0.016
--	--	------------------------------------	-------------------------	--------------------------



### DISCOUNTS

	List Price
1 - 5	
6 - 19	- 12%
20 - 39	- 25%
40 - 59	- 33%
60 - 99	- 37%
100 - 200	- 42%

Popular sizes in stock.

Any two part numbers of this pitch will run together.

PART NUMBER	TEETH	PCD (mm)	ØD (mm)	BOSS Ø (mm)	BORE Ø (mm)	WEIGHT (kg)		PRICE EACH 1-5	
						G	PG	G	PG
G0.5-10	10	5.50	6.50	6.50	3	0.0020	0.0006	£8.19	£6.85
G0.5-11	11	6.00	7.00	7.00	3	0.0025	0.0008	£8.20	£6.86
G0.5-12	12	6.00	7.00	7.00	3	0.0025	0.0008	£8.23	£6.88
G0.5-13	13	6.50	7.50	7.50	3	0.0030	0.0010	£8.33	£7.00
G0.5-14	14	7.00	8.00	8.00	3	0.0035	0.0012	£8.42	£7.17
G0.5-15	15	7.50	8.50	8.50	3	0.0037	0.0014	£8.53	£7.26
G0.5-16	16	8.00	9.00	8.50	4	0.0038	0.0014	£8.66	£7.46
G0.5-17	17	8.50	9.50	8.50	4	0.0041	0.0017	£8.74	£7.58
G0.5-18	18	9.00	10.00	8.50	4	0.0043	0.0020	£8.79	£7.70
G0.5-19	19	9.50	10.50	8.50	4	0.0046	0.0022	£8.89	£7.78
G0.5-20	20	10.00	11.00	8.50	4	0.0049	0.0025	£9.06	£7.84
G0.5-21	21	10.50	11.50	8.50	4	0.0052	0.0028	£9.15	£7.90
G0.5-22	22	11.00	12.00	8.50	4	0.0055	0.0032	£9.27	£7.96
G0.5-23	23	11.50	12.50	8.50	4	0.0059	0.0035	£9.38	£8.02
G0.5-24	24	12.00	13.00	10.00	5	0.0067	0.0036	£9.49	£8.05
G0.5-25	25	12.50	13.50	10.00	5	0.0071	0.0039	£9.59	£8.10
G0.5-26	26	13.00	14.00	10.00	5	0.0075	0.0043	£9.73	£8.18
G0.5-27	27	13.50	14.50	10.00	5	0.0079	0.0047	£9.83	£8.23
G0.5-28	28	14.00	15.00	10.00	5	0.0083	0.0051	£9.93	£8.26
G0.5-29	29	14.50	15.50	10.00	5	0.0087	0.0056	£9.99	£8.28
G0.5-30	30	15.00	16.00	10.00	5	0.0092	0.0060	£10.03	£8.34
G0.5-31	31	15.50	16.50	10.00	5	0.0096	0.0065	£10.15	£8.42
G0.5-32	32	16.00	17.00	10.00	5	0.0101	0.0069	£10.27	£8.47

Spur Gears Steel - Standard MOD 0.5



PART NUMBER	TEETH	PCD (mm)	ØD (mm)	BOSS Ø (mm)	BORE Ø (mm)	WEIGHT (kg)		PRICE EACH 1-5	
						G	PG	G	PG
G0.5-33	33	16.50	17.50	10	5	0.0106	0.0074	£10.37	£8.56
G0.5-34	34	17.00	18.00	10	5	0.0111	0.0079	£10.48	£8.66
G0.5-35	35	17.50	18.50	10	5	0.0116	0.0085	£10.62	£8.74
G0.5-36	36	18.00	19.00	10	5	0.0121	0.0090	£10.73	£8.79
G0.5-37	37	18.50	19.50	10	5	0.0127	0.0095	£10.84	£8.85
G0.5-38	38	19.00	20.00	10	5	0.0133	0.0101	£10.94	£8.95
G0.5-39	39	19.50	20.50	10	5	0.0138	0.0107	£11.06	£9.06
G0.5-40	40	20.00	21.00	10	5	0.0144	0.0113	£11.18	£9.12
G0.5-41	41	20.50	21.50	10	5	0.0150	0.0119	£11.29	£9.17
G0.5-42	42	21.00	22.00	10	5	0.0157	0.0125	£11.38	£9.27
G0.5-43	43	21.50	22.50	10	5	0.0163	0.0131	£11.52	£9.33
G0.5-44	44	22.00	23.00	10	5	0.0169	0.0138	£11.61	£9.43
G0.5-45	45	22.50	23.50	10	5	0.0176	0.0145	£11.73	£9.49
G0.5-46	46	23.00	24.00	10	5	0.0183	0.0151	£11.85	£9.58
G0.5-47	47	23.50	24.50	10	5	0.0190	0.0158	£11.95	£9.64
G0.5-48	48	24.00	25.00	10	5	0.0197	0.0166	£12.19	£9.75
G0.5-49	49	24.50	25.50	10	5	0.0204	0.0173	£12.24	£9.80
G0.5-50	50	25.00	26.00	12	6	0.0222	0.0177	£12.32	£9.88
G0.5-51	51	25.50	26.50	12	6	0.0230	0.0185	£12.42	£9.97
G0.5-52	52	26.00	27.00	12	6	0.0238	0.0192	£12.50	£10.07
G0.5-53	53	26.50	27.50	12	6	0.0246	0.0200	£12.58	£10.15
G0.5-54	54	27.00	28.00	12	6	0.0254	0.0208	£12.64	£10.26
G0.5-55	55	27.50	28.50	12	6	0.0262	0.0216	£12.76	£10.32
G0.5-56	56	28.00	29.00	12	6	0.0270	0.0225	£12.82	£10.46
G0.5-57	57	28.50	29.50	12	6	0.0279	0.0233	£12.89	£10.52
G0.5-58	58	29.00	30.00	12	6	0.0287	0.0242	£13.02	£10.62
G0.5-59	59	29.50	30.50	12	6	0.0296	0.0251	£13.08	£10.73
G0.5-60	60	30.00	31.00	12	6	0.0305	0.0260	£13.16	£10.80
G0.5-61	61	30.50	31.50	12	6	0.0314	0.0269	£13.23	£10.89
G0.5-62	62	31.00	32.00	12	6	0.0323	0.0278	£13.32	£10.99
G0.5-63	63	31.50	32.50	12	6	0.0333	0.0287	£13.42	£11.07
G0.5-64	64	32.00	33.00	12	6	0.0342	0.0297	£13.51	£11.18
G0.5-65	65	32.50	33.50	12	6	0.0352	0.0307	£13.61	£11.28
G0.5-68	68	34.00	35.00	12	6	0.0382	0.0337	£13.70	£11.32
G0.5-70	70	35.00	36.00	12	6	0.0403	0.0357	£13.85	£11.43
G0.5-72	72	36.00	37.00	12	6	0.0424	0.0379	£13.98	£11.54
G0.5-75	75	37.50	38.50	12	6	0.0457	0.0412	£14.09	£11.59
G0.5-77	77	38.50	39.50	12	6	0.0480	0.0435	£14.27	£11.62
G0.5-80	80	40.00	41.00	12	6	0.0515	0.0470	£14.40	£11.69
G0.5-84	84	42.00	43.00	12	6	0.0565	0.0519	£14.52	£11.82
G0.5-86	86	43.00	44.00	12	6	0.0590	0.0545	£14.68	£11.85
G0.5-88	88	44.00	45.00	12	6	0.0616	0.0571	£14.79	£11.92
G0.5-90	90	45.00	46.00	12	6	0.0643	0.0598	£14.95	£11.98
G0.5-96	96	48.00	49.00	12	6	0.0727	0.0682	£15.11	£12.32
G0.5-100	100	50.00	51.00	12	6	0.0786	0.0740	£15.17	£13.08
G0.5-120	120	60.00	61.00	18	6	0.1116	0.1071	£18.38	£16.50
G0.5-140	140	70.00	71.00	18	6	0.1507	0.1462	£21.96	£19.76
G0.5-150	150	75.00	76.00	18	6	0.1725	0.1679	£23.91	£21.85
G0.5-180	180	90.00	91.00	20	8	0.2469	0.2423	£27.00	£24.33
G0.5-200	200	100.00	101.00	20	8	0.3040	0.2994	£29.47	£26.53
G0.5-220	220	110.00	111.00	20	10	0.3671	0.3625	£32.14	£28.98
G0.5-250	250	125.00	126.00	20	10	0.4730	0.4684	£35.35	£31.89

Gears with a greater number of teeth than listed are subject to different face widths, boss and bore. Please consult Technical for sizes.

