

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA

DISEÑO Y DESARROLLO DE BRAZO ROBÓTICO

De Carlini, Máximo – LU: 135690

Ingeniería Electromecánica

Miglio, Mauro Esteban – LU: 1010183

Ingeniería Electromecánica

Tutor:

Zambrano, Daniel Alberto, UADE

Co-Tutor:

Garayalde, Damian Alejandro, UADE

Junio 22, 2015



**UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS EXACTAS**

Resumen

En el siguiente documento se desarrolla el análisis y el diseño que permite el armado de un brazo robótico seleccionador. El mismo será capaz de tomar una pieza, identificar su color y posicionarla en cajas separadas.

Se estudian distintas opciones de diseño de prototipos que determinan las decisiones y los resultados en el desarrollo final del producto. Se analizan distintos tipos de materiales, buscando generar un producto económico pero resistente y duradero. Se detalla el proceso de selección de servomotores, sensores y controladores teniendo en cuenta sus costos y capacidades técnicas. Esto permitirá que el lector de este documento sea capaz de reproducir nuestro trabajo, pudiendo también cambiar sus capacidades con otros sensores. La programación fue realizada en un código abierto anexado al trabajo, dejando al lector la capacidad de adaptar el brazo a sus necesidades. Por último, se detalla el desarrollo del modelo cinemático y las pruebas de movimiento.

El siguiente proyecto le aportará a la universidad un elemento de uso didáctico tanto para profesores como para alumnos en asignaturas como: programación avanzada, electrónica, programación y control de la producción, instrumentación y control y mecatrónica. También podrá ser utilizado para completar la unidad CIM que forma parte de los laboratorios con que cuenta la universidad.

Abstract

In the following document the analysis and design that allows assembling a coach develops robotic arm. The same will be able to take a piece, identify its color and position.

Options prototype design that determined the decisions and results in the final development of the product were studied. Different kinds of materials were analyzed, searching generate economic but strong and durable. The selection of actuators, sensors and controllers considering costs and technical capabilities outlined. This will allow the reader of this document is able to reproduce our work, also may change their capabilities through other sensors. The programming was done in an open source attached to the work, leaving the reader the ability to adapt to their needs arm. Finally, it is detailed the development of the kinematic model and evidence of movement.

The next project will bring an element to university didactic use for both teachers and students in subjects such as advanced programming, electronics, programming and production control, instrumentation and control and mechatronics. It may also be used to complete the CIM unit forming part of the laboratories available to the university.

PROYECTO FINAL DE INGENIERÍA	1
RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1 INTRODUCCIÓN	7
1.2 ANTECEDENTES	9
1.3 FASE DE DESARROLLO	10
<i>Gantt y diagrama de red</i>	<i>11</i>
1.4 EVALUACIÓN ESTRATÉGICA.....	12
1.5 EVALUACIÓN DE COSTOS	13
1.6 CARACTERÍSTICAS DEL BRAZO	13
<i>Criterios de selección de materiales</i>	<i>14</i>
CAPÍTULO 2: MATERIALES	15
2.1 SELECCIÓN DE MICROCONTROLADOR	15
2.2 DISEÑO DEL BRAZO.....	18
<i>Selección de materiales.....</i>	<i>18</i>
<i>Tamaños y medidas</i>	<i>18</i>
2.3 SELECCIÓN DE SERVOMOTORES	20
<i>Componentes principales.....</i>	<i>20</i>
<i>Modulación por ancho de pulso o PWM.....</i>	<i>21</i>
<i>Selección del servomotor</i>	<i>21</i>
<i>Torques requeridos:</i>	<i>22</i>
2.4 SENSOR DE COLORES	25
<i>Selección del sensor.....</i>	<i>25</i>
<i>Armado del sensor de colores.....</i>	<i>28</i>
<i>Calibrado del sensor.....</i>	<i>28</i>
2.5 SENSOR DE PRESENCIA DE PIEZA	31
<i>Pulsador normal abierto.....</i>	<i>31</i>
<i>Fin de carrera</i>	<i>31</i>
<i>Sensor IR.....</i>	<i>32</i>
<i>Transductor resistivo</i>	<i>32</i>
<i>Resultado.....</i>	<i>33</i>

<i>Calibración del sensor infrarrojo</i>	33
<i>Resultado</i>	34
CAPÍTULO 3: PROGRAMACIÓN	35
3.1 DIAGRAMA DE FLUJO	35
3.2 SECUENCIA DEL CÓDIGO	36
<i>Inicio del código</i>	36
<i>Función buscar pieza</i>	36
<i>Función “qué color es”</i>	36
<i>Disposición de la pieza</i>	36
<i>Color Rojo</i>	36
<i>Color Verde</i>	37
<i>Otros colores</i>	37
<i>Función “volver a origen”</i>	37
3.3 CONSIDERACIONES FUNDAMENTALES PARA EL DESARROLLO DEL CÓDIGO	37
CAPÍTULO 4: DESARROLLO DE PROTOTIPO	38
4.1 UTILIZACIÓN DE CORTADORA LÁSER	38
4.2 ARMADO DEL PROTOTIPO 1	39
<i>Correcciones y Aprendizaje</i>	40
4.3 ARMADO DEL PROTOTIPO 2	40
<i>Correcciones y Aprendizaje</i>	41
4.4 ARMADO DEL PROTOTIPO FINAL	42
CAPÍTULO 5: CABLEADO Y MONTAJE	43
5.1 CABLEADO EN LA ESTRUCTURA	43
<i>Consideraciones en el conexionado:</i>	45
CAPÍTULO 6: MODELO CINEMÁTICO	46
6.1 CINEMÁTICA DIRECTA	46
6.2 CINEMÁTICA INVERSA	47
<i>Clasificación de los métodos de resolución de la cinemática inversa</i>	48
<i>Métodos generales</i>	48
<i>Métodos particulares</i>	48
6.3 DESARROLLO DEL MODELO CINEMÁTICO MEDIANTE EL MÉTODO GEOMÉTRICO	49
<i>Modelo de cinemática inversa para un sistema de 2 GDL</i>	49
<i>Modelo de cinemática inversa para un sistema de 3 GDL</i>	53

<i>Modelo de cinemática inverso para un sistema de 4 GDL</i>	56
<i>Formulas finales del sistema cinemático</i>	59
<i>Consideraciones en la resolución del sistema cinemático inverso</i>	59
6.4 ESPACIO O ÁREA DE TRABAJO	60
6.5 ADAPTACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA A LA GEOMETRÍA DEL ROBOT.....	61
<i>Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_1</i>	62
<i>Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_2</i>	63
<i>Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_3</i>	64
<i>Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_4</i>	66
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS ESTÁTICO	69
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y PROPUESTAS PARA MEJORAS	72
8.1 CONCLUSIONES.....	72
8.2 PROPUESTAS DE MEJORAS.....	73
<i>Uso de la impresora 3D</i>	73
<i>Capacidad de detectar obstáculos dentro del área de trabajo</i>	73
<i>Capacidad de sensar otras características de la pieza aparte del color</i>	73
<i>Aumentar la capacidad de los servomotores</i>	73
<i>Aumentar los grados de libertad</i>	73
CAPÍTULO 9: REFERENCIAS	74
LIBROS CONSULTADOS	74
SITIOS WEB.....	74
<i>Sitios web consultados</i>	74
<i>Precios de los brazos robóticos</i>	74
ANEXOS	76
ANEXO I: DATASHEET ARDUINO ATMEGA 2560.....	76
ANEXO II: DATASHEET SERVOMOTORES	76
ANEXO III: DATASHEET SENSOR DE COLOR.....	76
ANEXO IV: PLANOS BRAZO.....	76
ANEXO V: INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA CORTADORA LÁSER	76
ANEXO VI: DIAGRAMA DE GANTT	76
ANEXO VII: ALGORITMO DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE PRESENCIA	76
ANEXO VIII: PROGRAMA ARDUINO	76
ANEXO IX: PROGRAMA DEL SENSOR	76

Capítulo 1: Introducción y objetivos

1.1 Introducción

Debido a la existencia de una sociedad y un mercado cada vez más exigente y competitivo, la industria se vio obligada a mantenerse en una constante carrera por el aumento en la producción y la reducción de tiempos y costos. Si bien la palabra “Robot” proviene del checo y fue usada por primera vez por el escritor Karel Capek en 1917 para referirse, en sus obras, a máquinas con forma humanoide, hoy día la robótica se ha convertido en una necesidad básica de toda industria que desee mantenerse competitiva. En 1956 el pionero de la robótica industrial, George Devol, patentó un manipulador programable que resultó ser el nacimiento del robot industrial. Mediante el uso de estos robots se fue mejorando tanto la productividad como la calidad y flexibilidad de los productos, desplazando la automatización industrial rígida, dominante en las primeras décadas del siglo XX.

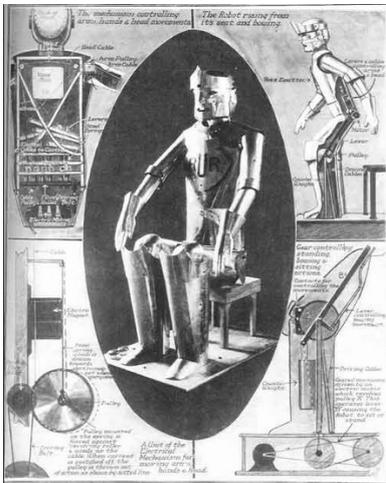


Figura 1.1.1. Robot creado por el escritor Karel Capek en 1917.

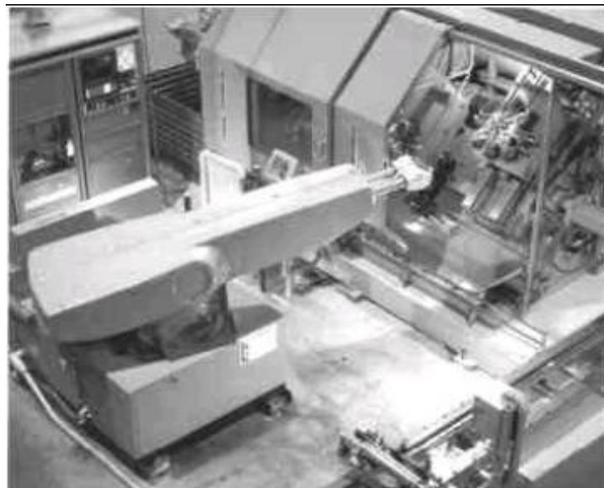


Figura 1.1.2. Devol- Engelberger fundan Unimation (1956). Primer robot industrial.

Si bien los robots pueden ser clasificados en distintos grupos, todos coinciden en su capacidad de llevar a cabo trabajos diferentes pudiendo tomar decisiones según la información procedente del exterior, utilizando el adecuado programa operativo. La estructura mecánica de un robot debe ser controlada para realizar tareas. Su control consiste en tres fases: la percepción, el procesamiento y la acción. Distintos sensores proveen al robot de información sobre el medio ambiente o sobre su propio estado. Esta información se procesa

para ser almacenada o transmitida, y para calcular las señales apropiadas a los actuadores que mueven la mecánica.

Los sistemas de control pueden tener diferentes niveles de autonomía:

- Robots Tele-operados: El ser humano tiene un control casi total sobre el movimiento del robot.
- Modo Operador de ayuda: Se le asignan al robot tareas de diferentes niveles y el robot calcula automáticamente la forma de alcanzarlas.
- Robots autónomos: Pueden ir por largos períodos de tiempo sin interacción humana.

Otra clasificación tiene en cuenta la interacción entre el control humano y los movimientos de la máquina:

- Tele-operación: El operario controla cada movimiento.
- Supervisión: El operario especifica movimientos generales o cambios de posición y la máquina calcula los movimientos específicos de sus actuadores.
- Autonomía a nivel de Grupo: El operador especifica sólo la tarea y el robot se autogestiona para completarlo.
- Autonomía completa: La máquina va a crear y completar todas sus tareas sin la intervención humana.

Si bien la robótica transformó a la industria, cada día se encuentra más cerca de nuestro entorno cotidiano. De esta forma, podemos encontrar robots en los hogares realizando tareas sencillas y repetitivas de las que estamos acostumbrados a hacer diariamente como cocinar, gestionar la luz y temperatura, limpiar, etc. Aquellos que estén preparados podrán además ver esta disciplina desde el punto de vista del diseño, la construcción y la programación de nuevos robots que podrán facilitar la vida de muchos ciudadanos. Trabajar con robots exige un conocimiento multidisciplinar. Desde la mecánica, la electrónica y la informática, hasta el conocimiento de sensores, motores y materiales. Así, nace la necesidad de educar a las siguientes generaciones en el uso y control de brazos robóticos. Debido a las dificultades en nuestro país para conseguir brazos didácticos, fáciles de armar y programar, se tomó la

decisión de crear este proyecto para darle a la universidad una herramienta sencilla y de bajo costo para educar a sus alumnos en la robótica.

1.2 Antecedentes

Al comenzar el proyecto se estudiaron otros brazos robóticos similares disponibles en el mercado. Estos diseños fueron de utilidad para comenzar el diseño del proyecto, buscando diferenciarnos en el costo y la versatilidad del brazo. En la tabla 1.2.1 se pueden observar distintas opciones encontradas en Estados Unidos.

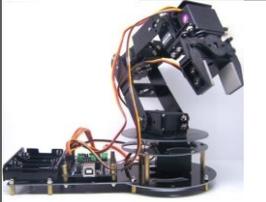
Modelo	Imagen	Comentarios	Grados de libertad	Precio
OWI Robotic Arm Edge		No programable	5GL	U\$S 42,76
Global Specialties R680 Banshi Robotic Arm		Programable Código libre	5GL	U\$S 169,15
Global Specialties R700 Silver Vector Robotic Arm		Programable Código libre	6GL	U\$S 335,75
Robotbase As-6DOF Aluminium Robotic Arm		Programable Código libre	6GL	U\$S 317,52
Gowe® 6 DOF Programmable Clamp Robot Arm Kit		Programable Software registrado	6GL	U\$S 699

Tabla 1.2.1 Brazos robóticos encontrados en EEUU.

Estos brazos tienen como inconveniente las dificultades a la hora de importar elementos del exterior, por lo que en la tabla 1.2.2 se pueden observar algunas opciones encontradas en el mercado argentino.

Modelo	Imagen	Comentarios	Grados de libertad	Precio
No especifica		Programable Software registrado	6GL	\$ 3050
Kitrobot		Programable Código libre	5GL	\$ 1750

Tabla 1.2.1 Brazos robóticos encontrados en Argentina.

1.3 Fase de desarrollo

En el desarrollo de este proyecto se integrarán múltiples disciplinas para el estudio de cada uno de los procedimientos de diseño y construcción de un brazo robótico. En el primer capítulo se detallarán los antecedentes y se realizará una evaluación estratégica y de costos del proyecto. En los siguientes capítulos se detallará todo lo referente a la selección de materiales describiendo varias opciones, definiendo los más convenientes. También se realizará el estudio cinemático, con el que se determinarán las variables y las ecuaciones de movimiento. Con estas ecuaciones se realizará la programación de la placa microcontroladora, el programa será de código abierto y quedará a disposición del lector. Por último se realizarán sucesivos prototipos hasta llegar al diseño más conveniente, al que se le montarán cada una de las partes y se le realizarán las pruebas correspondientes.

A continuación se detallan los diagramas de Gantt y de red utilizados para calcular los tiempos y necesidades del proyecto.

1.4 Evaluación estratégica

Se evaluarán las variables estratégicas del proyecto mediante las herramientas “4P y 5C” y “FODA” que se muestran en la tabla 1.4.1. y 1.4.2 respectivamente.

CONTEXTO MACROECONÓMICO 1. Restricciones a las importaciones 2. Inflación	PRODUCTO QUÉ ES LO QUE VENDO 1. Producto único 2. Reproducible de ser necesario 3. Económico	COMPETENCIA QUIÉNES Y CUÁNTO 1. Varias empresas 2. Precios altos 3. Mucho respaldo económico
PLAZA DISTRIBUCIÓN 1. Venta directa	CLIENTES 1. Universidades 2. Escuelas	PROMOCIÓN PUBLICIDAD 1. No será necesaria
COLABORADORES 1. Universidad Argentina de la Empresa 2. Profesores 3. Otros alumnos	PRECIO 1. Bajo costo	COMPANÍA 1. No será necesaria

Tabla 1.4.1 4P y 5C.

INTERNAS			
EXTERNAS	FODA Acciones Estratégicas	Fortalezas 1. Herramientas a disposición en la universidad 2. Mucha información sobre el tema 3. Aplicación con varias materias de la carrera	Debilidades 1. Caja inicial 2. Plazos muy cortos 3. Sólo ingenieros
	Oportunidades 1. Poca disposición en el mercado 2. Precios muy altos en el mercado 3. Necesidad insatisfecha de la universidad	F1-O1: Que el brazo sea de fácil reproducción F2-O2: Reducir costos al mínimo	D1-O1: Subir precio D2-O3: Aumentar horas de trabajo D3-O3: Asesorarnos con profesores
	Amenazas 1. Restricciones a la importación 2. Aumento del dólar 3. Pocos proveedores 4. Costos elevados	F1-A3: Realizar piezas en la universidad F2-A2: Comprar MP con anticipación	D1-A2: Tomar préstamos D2-A1: Seleccionar materiales nacionales

Tabla 1.4.2 FODA.

1.5 Evaluación de costos

Para la evaluación de costos se realizará una base de costos sobre el Gantt presentado en la sección 1.2 debido a su tamaño, la misma se encontrará en el anexo VI.

Los gastos realizados para el armado del brazo son detallados a continuación en la tabla 1.5.1.

Designación y Especificación	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Importe Parcial (\$)
Servomotor “Hs-485hb”	3	\$ 340,00	\$ 1.020,00
Servomotor “Hs-645mg”	1	\$ 500,00	\$ 500,00
Servomotor “Sg90”	1	\$ 80,00	\$ 80,00
Microcontrolador “Atmega 2560”	1	\$ 420,00	\$ 420,00
Sensor “CNY70”	2	\$ 59,00	\$ 118,00
Madera MDF	4	\$ 50,00	\$ 200,00
Accesorios para el montaje	1	\$ 250,00	\$ 250,00
Electrónica complementaria	1	\$ 340,00	\$ 340,00
Total			\$ 2.928,00

Tabla 1.5.1 Gastos.

1.6 Características del brazo

El brazo robótico presenta 4 grados de libertad que son: base, hombro, codo, muñeca y mano como puede observarse en la figura 1.6.1. Se contará al efector final (la mano) como un grado más de libertad.

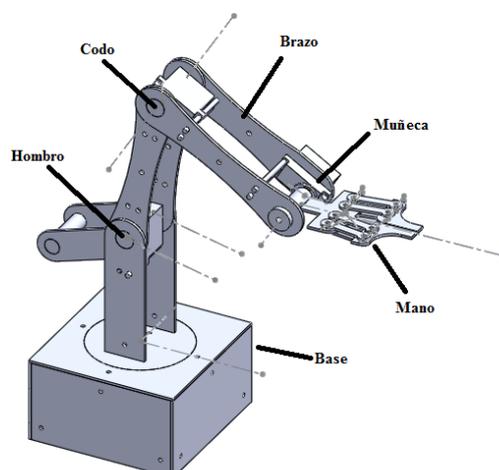


Figura 1.6.1 Esquema del brazo.

El movimiento del brazo se realizará de a un eslabón a la vez, en una secuencia la cual produzca un mínimo en el torque requerido para la mayoría de los servomotores. Se supondrá libre de obstáculos toda el área de trabajo del brazo, por lo que en su recorrido no detectará y/o esquivará objetos.

Una vez detectada la pieza, la misma no podrá ser movida hasta que el efector final la capture, esto le permitirá tomar piezas de geometrías muy pequeñas o de muy pequeño espesor y aun así poder procesarlas. El tamaño de las piezas no deberá superar el máximo grado de apertura de la pinza con un margen de tolerancia, caso contrario no podrá tomarla. El tamaño máximo de apertura de la pinza es 4,1 cm, con un margen de tolerancia de 0,8 cm. El peso de las piezas no deberá superar los 50 gramos ya que podría forzar a los servomotores a su punto máximo de trabajo y acortar su vida útil.

Criterios de selección de materiales

Se diseñó el brazo pensando en sus fines didácticos, por lo que en la selección de materiales se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- Los materiales deben ser accesibles y de bajo costo.
- Para la selección de los materiales se debe tener en cuenta que el brazo tendrá que ser fácil de construir y de ensamblar, liviano pero resistente.
- Se seleccionarán materiales nacionales, para facilitar la compra y reducir los tiempos.
- Se tendrá en cuenta el uso de la cortadora láser de la universidad. Por lo que se les dará prioridad a aquellos materiales que puedan ser cortados con la misma.

Capítulo 2: Materiales

2.1 Selección de microcontrolador

Para la selección del microcontrolador se estudió la oferta presente en el mercado en función de las prestaciones pretendidas. Como primer paso, se realizó un estudio de los componentes que serían integrados en el microcontrolador, el tipo de conexión y la cantidad de pines que necesitaría cada uno. Los mismos son enumerados en la tabla 2.1.1.

Elemento	Pines	Conexión
Servo-motor 1	1	Digital
Servo-motor 2	1	Digital
Servo-motor 3	1	Digital
Servo-motor 4	1	Digital
Servo-motor 5	1	Digital
Sensor de color	2	Analógica
Sensor de pieza	1	Analógica

Tabla 2.1.1 Tabla de elementos con cantidad de pines y tipo de conexión

A partir de este estudio se concluye que la placa microcontroladora deberá tener un mínimo de 3 pines analógicos y 5 digitales. Otro aspecto de gran importancia es la memoria interna del microcontrolador, también conocida como “flash memory”, ya que en ella se cargará el código de programación necesario para poder ejecutar todas las operaciones que le darán movilidad al brazo robótico. Si bien no se pudo realizar un cálculo preciso de la memoria total que se necesita, se consultó en foros y páginas de Internet relacionados con el tema, y con ayuda del co-tutor, se llegó a la conclusión de que una memoria de 7kb en adelante sería la más adecuada para no correr riesgos inherentes a este campo. Por último, se estudio la capacidad de procesamiento del microcontrolador. Donde se encontró que este aspecto no presentaría mucho inconveniente, debido a que para el proyecto a realizar sería suficiente con 8 bits o más.

Teniendo ya definidos estos aspectos, se presentan en el mercado diversos tipos de microcontroladores que cumplen con los requisitos mínimos. Cabe aclarar que el microcontrolador necesita adicionalmente un grabador, es decir, la unidad que trasfiere el código de programación de un computador al microcontrolador propiamente dicho, lo que no

sólo insume un costo mayor, sino que la disponibilidad del mismo, también debería ser sin tiempos de espera. Esto le dio cierta ventaja estratégica a aquellas placas que ya poseían integrado el grabador.

En la tabla 2.1.2 se presentan las opciones disponibles con sus principales características y el precio de venta. Algunas de las opciones ya vienen con el grabador integrado junto al microcontrolador en una sola plaqueta, al resto se les ha de agregar el costo extra de la unidad de grabación, la cual se encuentra entre \$390 y \$680.

Marca	Modelo	Procesador	Memoria programable (kb)	Numero de entradas/salidas	Con Grabador	precio (\$)
Microchip	Pic12f629-i/p	8 bits	1.75	8	No	37
Microchip	PIC16F1704	8 bits	7	14	No	50
Microchip	Pic16f84a	8 bits	7	18	No	63
Microchip	PIC18F452	8bits	32	40	No	134
Microchip	PIC16F610	8 bits	3.5	14	No	39
Microchip	PIC16F1847	8 bits	14	18	No	73
Arduino	UNO	8 bits	32	28	Si	280
Arduino	Nano	8 bits	16	30	Si	235,00
Arduino	Atmega 2560	8 bits	256	54	Si	420,00
Siemens	S7-200	16 bits	24	183	Si	3800,00

Tabla 2.1.2 Tabla de microcontroladores.

Teniendo en cuenta los criterios de selección de materiales nombrados en el capítulo anterior y la posibilidad de darle uso con fines didácticos, ya sea para su ampliación o modificación en cualquier sentido, se ha seleccionado el microcontrolador con el mayor número de entradas analógicas y digitales a un precio económicamente aceptable. El microcontrolador seleccionado es el Atmega 2560, perteneciente a la placa Arduino Mega, la cual tiene incluido el grabador, necesitando realizar una sola compra el lugar de dos.

En la figura 2.1.1 se presenta la placa Arduino Atmega 2560 se podrá encontrar también el “Datasheet” de la misma adjunto en el anexo I.



Figura 2.1.1 Placa Arduino Atmega 2560.

En la figura 2.1.2 podremos ver una representación esquemática del microcontrolador Atmega 2560, en la misma se podrán identificar los distintos pines de entradas y salidas.

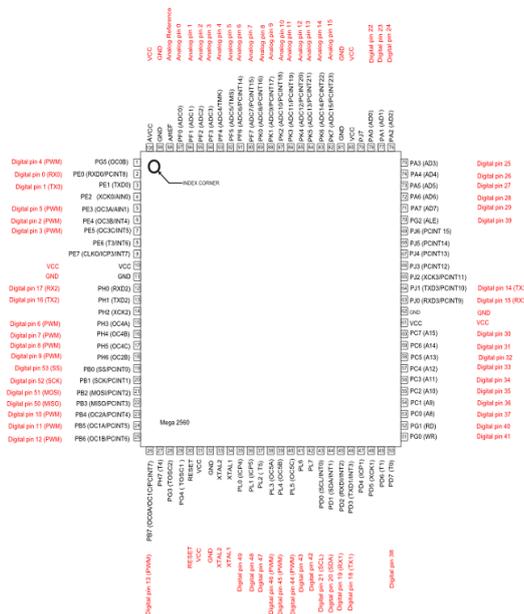


Figura 2.1.2 Esquema de Placa Arduino Mega 2560.

2.2 Diseño del brazo

Selección de materiales

Entre los materiales pensados para el armado se decidió enfocar en cuatro, debido a que son los más usados dentro de este tipo de proyectos. En la tabla 2.2.1 se puede observar estas opciones con la densidad y un ponderado resultado de la investigación.

Elementos	Densidad media	Aislación eléctrica	Resistencia al impacto	Resistencia a la intemperie	Maquinabilidad
Madera MDF	770 kg/m ³	Buena	Buena	Baja	Muy buena
Chapa de acero galvanizada	7850 kg/m ³	Conductor	Muy Alta	Buena	Buena
Acrílico	1180 kg/m ³	Muy buena	Buena	Alta	Muy buena
Aluminio	2700 kg/m ³	Conductor	Alta	Alta	Buena

Tabla 2.2.1 Tabla de materiales seleccionados.

A partir de la tabla 2.2.1 se decidió en primer lugar quitar las opciones de aluminio y chapa de acero por su alta densidad y su elevado costo. Si bien el acrílico resulto tener muy buenas cualidades siguiendo los criterios enumerados en la introducción se decidió realizar el proyecto en madera MDF por su fácil acceso y su menor costo.

Tamaños y medidas

Una vez seleccionado el material se decidió, para facilitar su construcción, hacer uso del cortador láser de la universidad, cuyas especificaciones se encuentran adjuntas en el anexo V. Para poder hacer un buen uso del mismo se tuvo que tener en cuenta las limitaciones que posee. Entre estas, se encuentran el tipo de material a cortar, el espesor y el tamaño de las piezas ya que la chapa a cortar tiene que entrar dentro del cortador láser. La maquina corta MDF con facilidad por lo que esta limitación no es un problema. En cuanto al espesor, el profesional a cargo, recomendó no usar chapas mayores a los 5mm. La chapa tampoco podría ser mayor a 30x60cm, por lo que ninguna pieza debía superar ese tamaño.

Para las medidas de las piezas también se tuvieron en cuenta su posible implementación con la CIM (centro integral de mecanizado) que se encuentra a disposición en la universidad y se buscó que fuesen valores fáciles de medir y contrastar en los cálculos. Los mismos a su vez fueron probados y cambiados en varias ocasiones según se podrá observar en el capítulo “Desarrollo de prototipo”.

A partir de lo antes nombrado y tal como se observa en la figura 2.2.1 se decidió realizar el brazo mayormente con piezas planas de 2.5mm de espesor unidas mediante tornillos.



Figura 2.2.1 Brazo robótico.

Para la separación de los brazos se tuvo en cuenta el ancho de los servomotores, ya que se buscó que los mismos estén dentro de la estructura para mejorar el centro de gravedad del brazo. También se decidió montarlo sobre una caja donde se pondrán las placas microcontroladoras y las conexiones.

Todo el diseño se realizó en “SolidWorks”, lo que facilitó el modelado y el estudio de cada pieza gracias a su versatilidad y simpleza de uso. También se aprovechó para realizar los planos de cada pieza, adjuntos en el anexo IV.

2.3 Selección de servomotores

Los servomotores son motores de corriente continua, cuya posición angular puede ser definida y controlada de manera precisa por medio de un microcontrolador en su estructura interna. El mismo, transforma el ancho del pulso de una señal eléctrica en una variación angular determinada, como se explicará más adelante. Según el servomotor, la posición angular puede variar entre 0° y 180° o entre 0° y 90°. Los servomotores poseen tres terminales, los mismos corresponden al positivo y negativo y un terminal por el que se envía la señal de control del motor.

Componentes principales

- Motor de corriente continua: Transforma la energía eléctrica en energía mecánica permitiendo un movimiento rotacional sobre su eje. El sentido de giro dependerá de la polaridad aplicada.
- Engranajes de reducción: Su función es convertir parte de la velocidad de giro del motor en torque.
- Circuito de control: Controla la posición de giro, utilizando los anchos de los pulsos que corresponderán a tiempos medidos en milisegundos.

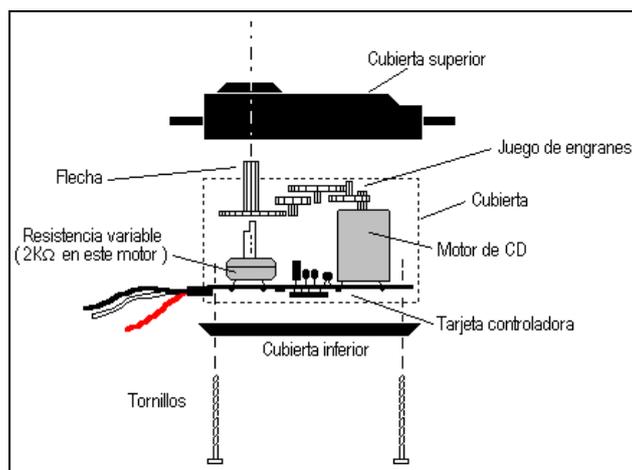


Figura 2.3.1 Estructura interna de un servomotor de CC.

Según la duración de los pulsos antes nombrados, se obtendrán diferentes ángulos. Cabe mencionar que el control se realiza mediante la modulación por ancho de pulso, el cual se vera a continuación. Para la verificación, dentro del sistema de control, se utiliza un potenciómetro que supervisa el ángulo real del servomotor. Cuando el eje llega a su ángulo de destino, el motor se detiene y el potenciómetro verifica si el ángulo es correcto, de no ser así, el mismo seguirá hasta llegar al correcto.

Modulación por ancho de pulso o PWM

La modulación por ancho de pulso o PWM “Pulse Width Modulation” emula una señal analógica a partir de una señal digital. Esto permite que mediante una señal digital se pueda, por ejemplo, variar la velocidad de giro de un motor, variar la intensidad con la que emite luz un led, o en el caso de los servomotores transmitir los grados de giro.

Este tipo de señal emite en la salida una serie de pulsos, que se podrán variar en duración, con una frecuencia constante de aproximadamente 490Hz, dependiendo del fabricante. Esto permitirá que la tensión promedio, sea directamente proporcional a la duración de éstos, dentro del rango de nuestro período. Es decir, cuanto más juntos estén los pulsos de +5v, mayor será la tensión promedio de la salida, y cuanto más distantes sean, menor será dicha tensión.

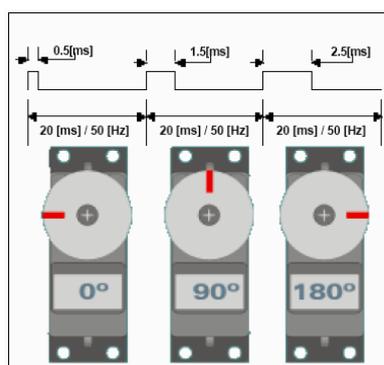


Figura 2.3.2 Duración del ancho de pulso.

Selección del servomotor

Como fue explicado, el servomotor transformará la velocidad de giro en torque, esta es la principal característica que se deberá tener en cuenta al momento de la

elección. En la figura 2.3.3 se podrá observar la posición de los cinco torques requeridos que a su vez corresponden con los cinco servomotores a seleccionar.

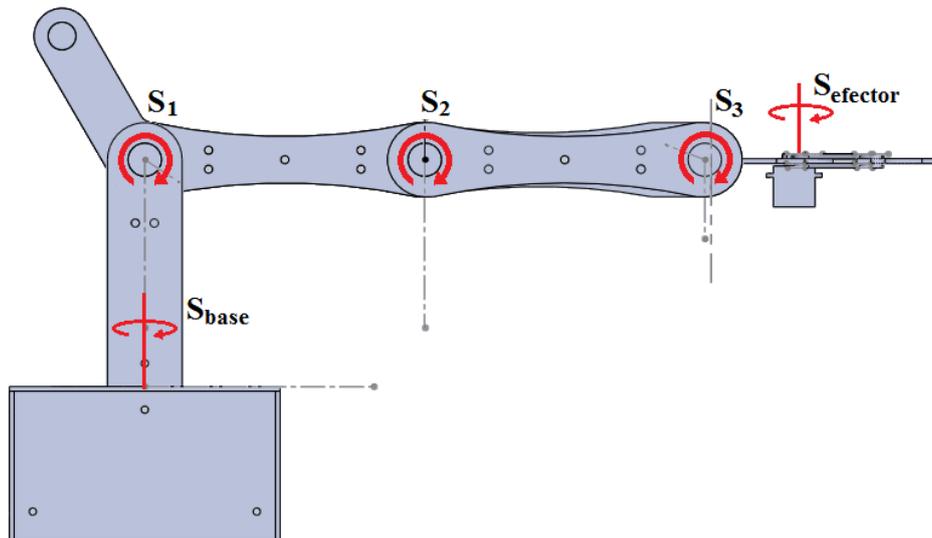


Figura 2.3.3 Torques requeridos.

Para la selección de los servomotores 1, 2 y 3 se tomarán los requerimientos de torque estudiados en el análisis estático en el capítulo 7. El servomotor que corresponde a la base no posee un torque aparente debido a que el esfuerzo al que esta sometido es perpendicular al giro. Sin embargo, este servomotor será sometido por el torque generado por las fuerzas de rozamiento internas que dependerán del peso total del brazo. Dado que este torque no es significativo, para abaratar costos se decidió utilizar los mismos servomotores que fueron calculados para los servomotores 2 y 3. En el caso del servomotor para el efector se necesitará un torque bajo, ya que no realizara demasiada fuerza, por lo que para su selección se tendrá en cuenta su costo y su peso.

Torques requeridos:

- Torque S_1 : 7,34 kgxcm
- Torque S_2 : 3,6 kgxcm
- Torque S_3 : 0,73 kgxcm

En las tablas que se encuentran a continuación se pueden observar los relevamientos del mercado encontrados para los tres torques requeridos y para el cierre del efector.

Marca	Modelo	Torque (kgxcm)	Peso (gr)	Disponibilidad	Precio (\$)
Team Associated	29126	7,8	49	SI	680
Hitec	Hs-805	24,7	152	SI	899
JRPropo	NES-791	6,5	52	NO	495
Hitec	Hs-645mg	9,6	55	SI	500
Futaba	BLS 252	12,6	58	SI	1498
Mugen	MG 996R	15	55	NO	475
Hitec	Hs-7954sh	24	66	SI	1570

Tabla 2.3.2 Tabla de torque para S1.

Marca	Modelo	Torque (kgxcm)	Peso (gr)	Disponibilidad	Precio (\$)
Turnigy	S3317	3	29	NO	195
Hitec	Hs-485hb	6	45	SI	340
Turnigy	S3317B	2,5	27	NO	170
Futaba	S148	2,4	45	SI	255
Futaba	BLS251	3,8	59,5	SI	1500
KDS	N290	2	11,4	SI	280
Futaba	3003	3	45	SI	245
HK	15138	4,3	39	SI	180

Tabla 2.3.3 Tabla de torque para S2.

Marca	Modelo	Torque (kgxcm)	Peso (gr)	Disponibilidad	Precio (\$)
HKS	9650	3,8	29	NO	195
Turnigy	S3317	3	26	SI	195
Hitec	Hs-485hb	6	45	SI	340
HK	15138	3,8	38	NO	172

Tabla 2.3.4 Tabla de torque para S3.

Marca	Modelo	Torque (kgxcm)	Peso (gr)	Disponibilidad	Precio (\$)
Turnigy	TG9X	1,7	9	SI	95
Turnigy	TG9E	1,5	9	SI	99
Turnigy	Tgy50090M	2	9	SI	225
Tower pro	Sg90	1,5	9	SI	80
RC timer	RC4G	0,8	4,4	SI	120

Tabla 2.3.5 Tabla de torque para el efector.

Para la selección de los servomotores además de los criterios enumerados en la introducción se tendrán en cuenta las siguientes variables:

- El ángulo máximo de giro deberá ser de 180°.
- Se priorizarán los servomotores de mayor torque.
- Deberán tenerse en cuenta pequeñas discrepancias que podrían surgir en el microcontrolador en caso de que los servomotores fueran de distintas marcas.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se decide seleccionar los servomotores de la marca Hitec para el movimiento de los eslabones y la base. Serán tres unidades del modelo “Hs-485hb” y una unidad del modelo “Hs-645mg”. En cuanto al efector, se seleccionará el micro-servo de la marca Tower-pro modelo “Sg90”, ya que posee la mejor relación torque-precio. En las siguientes figuras se pueden observar los servomotores seleccionados.

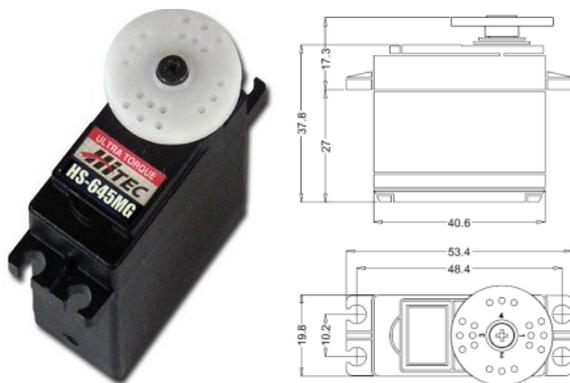


Figura 2.3.4 Figura del servo Hs-645mg.

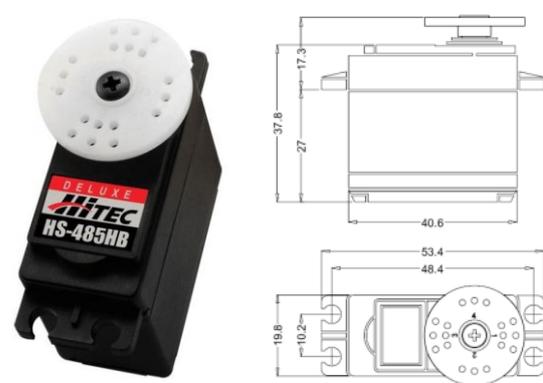


Figura 2.3.5 Figura del servo Hs-485hb.



Figura 2.3.6 Figura del micro servo Sg90.

2.4 Sensor de colores

Selección del sensor

A continuación se detallan las distintas variantes que se encontraron en el mercado. La primera opción se basa en un circuito en el cual se utiliza un Led RGB como emisor y un fotodiodo como receptor. El Led RGB iluminará la superficie del objeto que se desea identificar, en el que se medirá la intensidad que la superficie refleja para cada uno de los colores (rojo y verde), luego el receptor lo transformará en un impulso eléctrico, que se usará como patrón para determinar el color del objeto en cuestión. A continuación en la figura 2.4.1 se puede observar la conexión resultante.

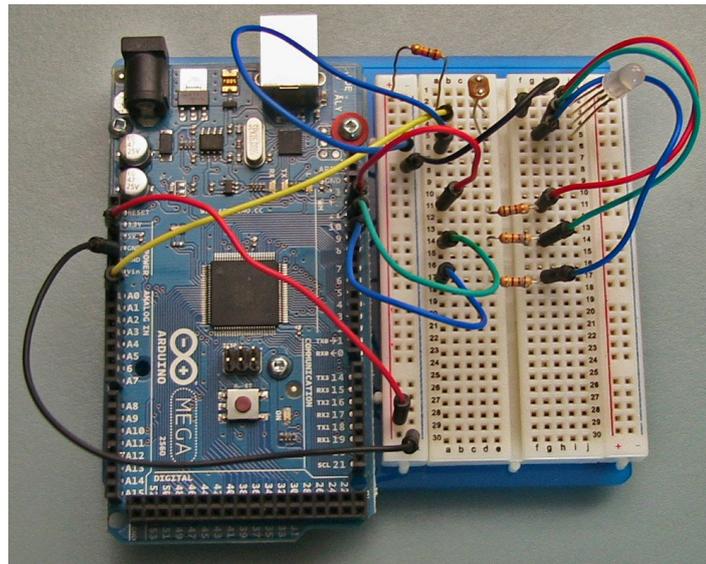


Figura 2.4.1 Conexión Led RGB - Fotodiodo.

La segunda opción se basa en un emisor infrarrojo con un transistor-receptor unidos en un sólo integrado, en el cual, la reflexión del objeto y la detección del rayo reflejado por el receptor, producirán que el transistor se ponga en conducción en mayor o menor medida, según sea la longitud de onda que incida en la base del transistor. El integrado utilizado sería el CNY70 mostrado en la figura 2.4.2. En la figura 2.4.3 podremos observar el esquema de conexión.

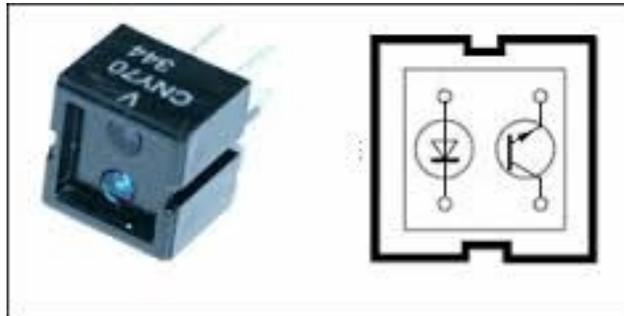


Figura 2.4.2 Integrado CNY70.

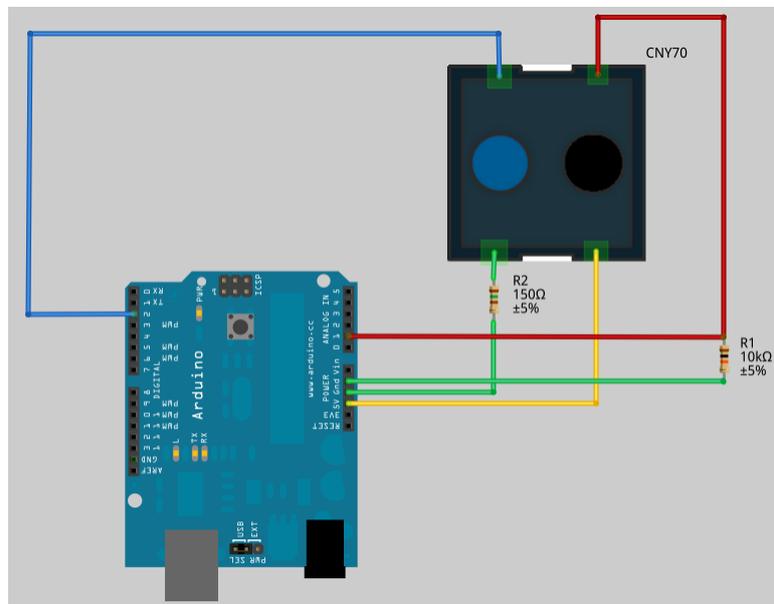


Figura 2.4.3 Esquema de conexión del CNY70.

La tercera opción es una versión más sofisticada de la primera, la cual, como se observa en la figura 2.4.4, en un único módulo integrado TCS3200d tendríamos los Leds RGB como emisor y un fotodiodo como receptor.



Figura 2.4.4 Integrado TCS3200d.

A partir de estas tres opciones se realizó la tabla 2.4.1 con las ventajas y desventajas de cada una para la selección de la más adecuada para nuestro proyecto.

Opción	Ventajas	Desventajas
Circuito Led-fotodiodo	<ul style="list-style-type: none"> • Costo (aprox. \$35), es sin duda la opción más económica. • Posee una buena precisión para la detección de colores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita un elevado número de pines. • Mayor consumo energético. • La posición del receptor debe ser muy precisa para no tener interferencias en las mediciones.
Integrado CNY70	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una buena precisión a corta distancia. • Menor número de pines utilizados. • La posición del receptor con respecto al emisor no es un inconveniente, pues ya vienen acoplados. • Ocupa poco espacio. 	<ul style="list-style-type: none"> • La distancia puede interferir en la exactitud de la medición. • Costo ligeramente más elevado que la primera opción, siendo el mismo de \$59.
Integrado TCS3200d	<ul style="list-style-type: none"> • Lectura mucho más exacta. • Ocupa poco espacio. • Puede detectar una gran gama de colores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es la opción de mayor costo, el mismo es de \$596. • Gran número de pines utilizados.

Tabla 2.4.1 Tabla con ventajas y desventajas de las distintas opciones.

Conociendo las ventajas y desventajas de cada opción y teniendo en cuenta que las tres poseen una buena precisión, se decidió primero descartar la última (Integrado TCS3200d) por su gran costo. Dado que no hay una diferencia significativa entre las otras dos en lo respecto al costo, se decidió seleccionar la segunda (Integrado CNY70) ya que es más pequeña y fácil de instalar, además de que usa menor cantidad de pines de nuestro microcontrolador.

Armado del sensor de colores

Una vez seleccionado el integrado, se prosiguió con el armado del circuito que requirió una resistencia de $1K\Omega$ y una resistencia de $10k\Omega$ y se conectó la salida del sensor a un pin analógico del Arduino. Finalmente como se puede observar en la figura 2.4.5 se conectó la alimentación, la cual será alimentada a través del Arduino en el pin correspondiente a 5 Volts.

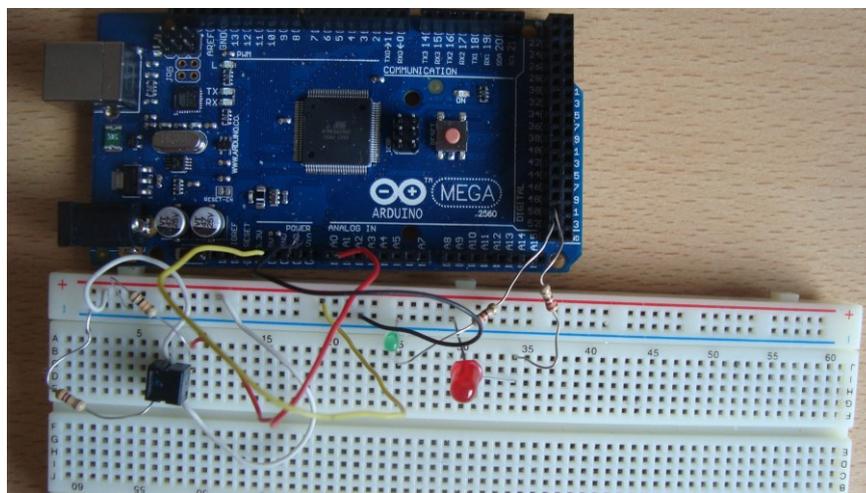


Figura 2.4.5 Circuito de conexión de integrado a la placa Arduino.

Calibrado del sensor

En este paso se procede a tomar muestras de distintas tonalidades de color rojo y verde para determinar el valor de voltaje que envía el transistor, las mediciones fueron realizadas mediante un programa escrito en el software de código abierto “Arduino 1.6.3” que se encuentra anexo IX del proyecto.

Este programa permite transformar el valor de la lectura analógica, que va de 0 a 1023 a un valor de voltaje comprendido entre 0 y 5 Volts. En la tabla 2.4.2 se pueden observar los voltajes obtenidos de un total de 20 muestras de distintas tonalidades elegidas al azar de rojo y verde. También podremos observar la dispersión de estos valores en las figuras 2.4.6 y 2.4.7.

Muestra	Color	Voltaje		Muestra	Color	Voltaje
1	Verde	0,76		21	Rojo	1,72
2	Verde	0,97		22	Rojo	2,54
3	Verde	0,52		23	Rojo	1,87
4	Verde	1,21		24	Rojo	1,69
5	Verde	1,54		25	Rojo	2,94
6	Verde	0,46		26	Rojo	2,14
7	Verde	1,62		27	Rojo	1,83
8	Verde	1,19		28	Rojo	3,08
9	Verde	1,27		29	Rojo	3,26
10	Verde	1,57		30	Rojo	3,52
11	Verde	0,49		31	Rojo	3,63
12	Verde	0,74		32	Rojo	1,97
13	Verde	1,43		33	Rojo	1,85
14	Verde	1,39		34	Rojo	2,35
15	Verde	0,53		35	Rojo	2,59
16	Verde	0,98		36	Rojo	3,42
17	Verde	0,63		37	Rojo	3,51
18	Verde	1,33		38	Rojo	3,07
19	Verde	1,63		39	Rojo	2,77
20	Verde	1,26		40	Rojo	3,16

Tabla 2.4.2 Tabla de voltajes medidos en 40 muestras.

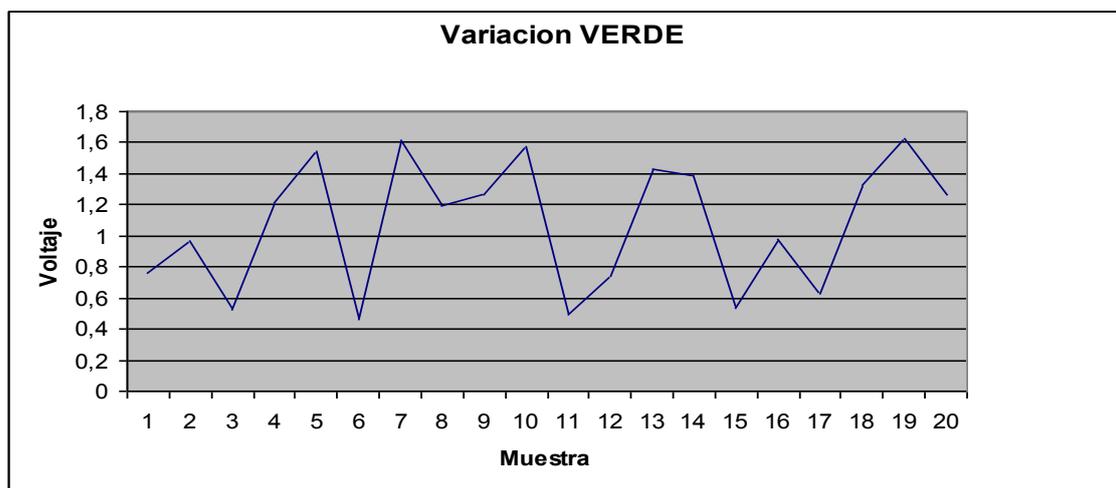


Figura 2.4.6 Variación de voltajes de las muestras con color verde.

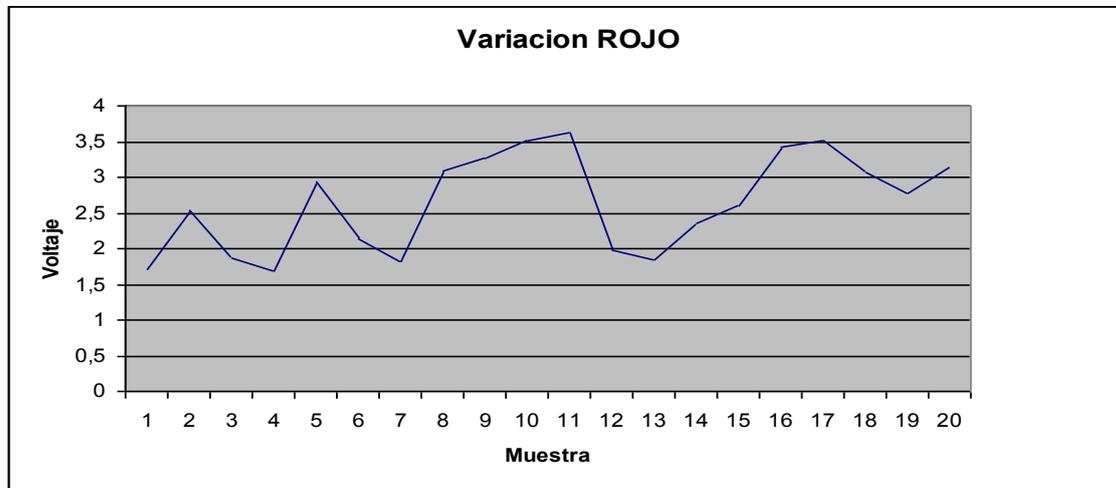


Figura 2.4.7 Variación de voltajes de las muestras con color rojo.

De los valores observados se tomaron el mínimo y el máximo de cada color. De esta forma se logró asegurar el rango de aceptación de cada uno. Los mismos podrán ser observados en la tabla 2.4.3.

	Mínimo	Máximo
Verde	0,46	1,63
Rojo	1,69	3,63

Tabla 2.4.3 Tabla de valores mínimos y máximos tomados de las muestras.

Además se tendrá en cuenta la luz ambiente, ya que afecta principalmente al valor mínimo del color rojo, por lo que se decide tomar como mínimo un valor inmediatamente superior al máximo del color verde. En la tabla 2.4.4 se observan los valores tomados.

	Mínimo	Máximo
Verde	0,46	1,63
Rojo	1,63	3,63

Tabla 2.4.4 Tabla de valores mínimos y máximos tomados.

2.5 Sensor de presencia de pieza

El sensor de presencia de pieza, será el encargado de iniciar la secuencia de programación descrita en el capítulo 3. En este capítulo se estudiarán las alternativas con sus ventajas y desventajas siguiendo los criterios nombrados en la introducción.

Pulsador normal abierto

En la figura 2.5.1 se observa el pulsador normal abierto. Su principal ventaja es su reducido tamaño, montaje y gran efectividad. En contrapartida esta opción no es útil para piezas de peso reducido, ya que no podrán vencer la fuerza del resorte y por consiguiente activar el pulsador.



Figura 2.5.1 Pulsador normal abierto.

Fin de carrera

En la figura 2.5.2 se observa el fin de carrera. Esta alternativa es una modificación de la anterior, con la diferencia de que contiene una fina lámina de acero que permite, mediante palanca, ser pulsado con pesos más reducidos. Su desventaja al igual que la opción anterior es para con las piezas de pesos menores a los 80 gramos, en donde no llega a activar el pulsador.



Figura 2.5.2 Fin de carrera.

Sensor IR

En la figura 2.5.3 se observa el sensor IR. Consta de un sensor infrarrojo y de un fotoreceptor, cuando un objeto tape por completo al sensor en cuestión, el fotoreceptor brindará una señal analógica de una magnitud, la cual corresponderá con la existencia de una pieza, activando así el brazo. Como contrapartida se encuentra la calibración del mismo, debido a que una luz muy intensa sobre el sensor podría activar el brazo.

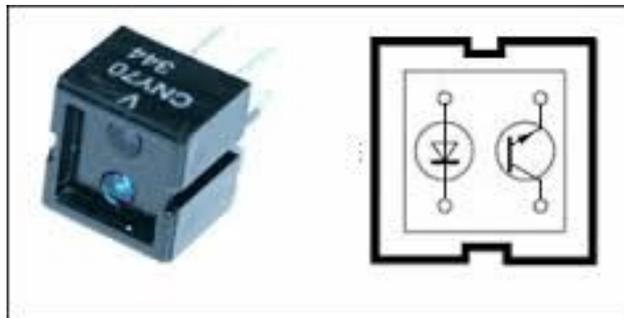


Figura 2.5.3 Sensor IR.

Transductor resistivo

En la figura 2.5.4 se observa el transductor resistivo. Su funcionamiento se basa en la variación de una resistencia eléctrica interna, según sea la presión aplicada sobre la misma. Estos transductores son muy confiables, no obstante, para pesos reducidos prácticamente no hay alteración en la resistencia eléctrica.



Figura 2.5.4 Transductor resistivo.

Resultado

Habiendo analizado todas las opciones disponibles, se decidió optar por el sensor infrarrojo, ya que se ahorran los problemas referidos a la masa en de la pieza, se deberá realizar una correcta calibración del mismo para evitar la mayor cantidad de perturbaciones lumínicas que podrían existir en el ambiente, para evitar activaciones erróneas.

Calibración del sensor infrarrojo

Para la calibración del sensor infrarrojo se armo el circuito de la figura 2.5.5 donde se conectó el microcontrolador, para probarlo y realizar las distintas mediciones que nos darían los valores buscados.

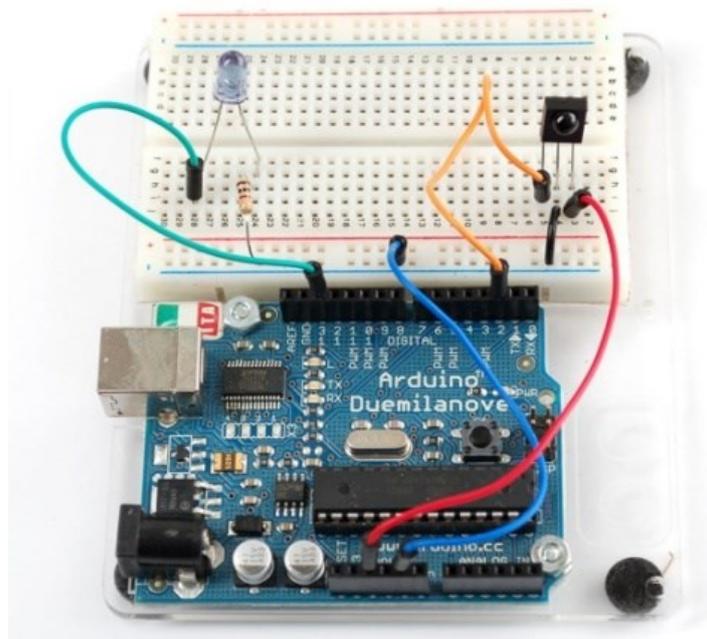


Figura 2.5.5 Conexión del sensor IR.

Los valores se leerán analógicamente para tomar un rango mucho más amplio (de 0 a 1023), lo que reducirá el margen de error. A continuación, en la tabla 2.5.1 se observan medidas tomadas sin ningún tipo de interrupción entre el emisor y el receptor, aumentando progresivamente el grado lumínicos (GLA, GLB, GLC, GLD y GLE respectivamente).

Muestra	GLA	GLB	GLC	GLD	GLE
1	5	7	11	17	108
2	5	7	12	16	113
3	6	7	10	18	115
4	6	8	9	17	140
5	6	7	10	17	150
6	5	9	10	16	132
7	6	7	12	15	147
8	6	7	9	18	109
9	5	7	11	18	141
10	6	8	10	17	138

Tabla 2.5.1 Medidas de distintos grados lumínicos.

En la tabla 2.5.2 se puede observar los valores con una interrupción entre el emisor y el receptor. Estos valores analogicos resultan ser mayores.

Muestra	Valor
1	198
2	372
3	231
4	493
5	398
6	268
7	349
8	437
9	362
10	452

Tabla 2.5.2 Valores con una interrupción entre el emisor y el receptor.

Resultado

Se tomará el menor valor sentido que corresponde con la muestra 1 de la tabla 2.5.2. Éste servirá para corroborar la existencia de piezas, ya que cualquier valor por encima del mismo, indicará con gran seguridad que habrá efectivamente una pieza para tomar y valores por debajo de estos indicarán que no lo hay o que existirá una alteración debido a un foco lumínico intenso. El algoritmo de calibración se podrá encontrar en el anexo VII.

Capítulo 3: Programación

La programación del brazo robótico será realizada mediante el software de código abierto “Arduino 1.6.3”. El código se encuentra en el anexo VIII, mientras que en este capítulo se detallará la secuencia de programación.

3.1 Diagrama de flujo

En la figura 3.1.1 se puede observar el diagrama de flujo del programa desarrollado.

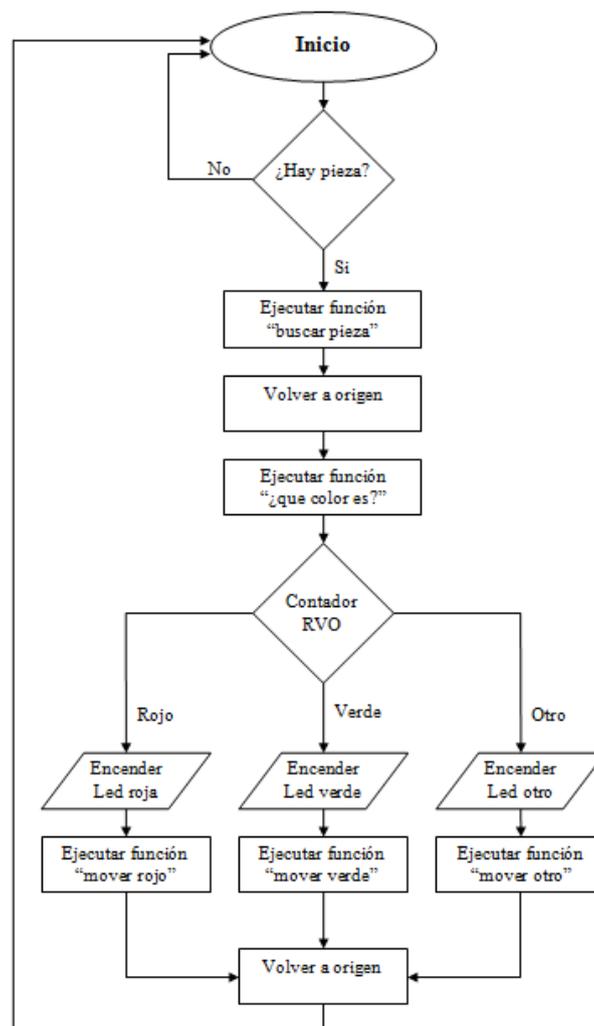


Figura 3.1.1 Diagrama de flujo del programa.

3.2 Secuencia del código

Inicio del código

Como se puede observar en el diagrama de flujo en la figura 3.1.1 el brazo comenzará en una posición inicial determinada en el código como “posición de origen”. El brazo recibirá la señal de un sensor que detectará que se encuentra una pieza para identificar.

Función buscar pieza

Una vez detectada la presencia de una pieza el brazo se moverá a la posición determinada por el código en coordenadas X,Y,Z, determinando el ángulo de cada servomotor para tal fin, mediante el procedimiento descrito en el capítulo 6 “Modelo cinemático”. Una vez en la posición “buscar pieza” la pinza tomará la pieza y la moverá a la “posición de origen” antes nombrada.

Función “qué color es”

Luego de alcanzada la posición de origen se ejecutará la función “qué color es”, la cual devolverá un valor que corresponderá con el color censado, pudiendo ser de color rojo, verde o ninguno de los dos anteriores.

Disposición de la pieza

Según el color que fuese detectado se tomarán tres caminos que corresponderán a “Rojo”, “Verde” y “Otro”.

Color Rojo

Si el color detectado fuese rojo, se procederá a mandar una señal para que el operador pueda ver el resultado del sensor mediante el encendido de un Led, en este caso de color rojo. Posteriormente se ejecutará la función “mover rojo”, la cual tomará las coordenadas X,Y,Z deseadas, dentro del área de trabajo, en donde se ubicará la pieza.

Color Verde

Si el color detectado fuese verde, se procederá a mandar una señal para que el operador pueda ver el resultado del sensor mediante el encendido de un Led de color verde. Posteriormente se ejecutará la función “mover verde”, que tomará las coordenadas X,Y,Z deseadas para la posición final de las piezas verdes, dentro del área de trabajo y ubicará la pieza en esa posición.

Otros colores

De no ser de color verde o roja el código identificará a la pieza como “otro” y le avisará al operario mediante un Led amarillo. Posteriormente se ejecutará la función “mover otro”, que tomará las coordenadas X,Y,Z deseadas para la posición final de estas piezas, dentro del área de trabajo y las ubicará en esa posición.

Función “volver a origen”

Una vez posicionada la pieza en su lugar, mediante la función “volver al origen” se posicionará el brazo en su estado de inicio para comenzar nuevamente con la secuencia determinada.

3.3 Consideraciones fundamentales para el desarrollo del código

- Todas las posiciones dentro del código se encuentran en coordenadas cartesianas.
- Las posiciones podrán ser modificadas en el código, cambiando los valores de X,Y,Z siempre que estos se encuentren dentro del área de trabajo previsto en el capítulo 6.
- El brazo alcanzará la posición deseada calculando mediante el desarrollo de la cinemática inversa, que se encuentra en el capítulo 6, el ángulo deseado para cada servomotor.
- Se podrá controlar la velocidad de los servomotores.

Capítulo 4: Desarrollo de prototipo

Para la corroboración de los cálculos y el adecuado diseño del trabajo es de gran importancia la creación de un prototipo. El mismo será de gran ayuda para verificar las medidas y realizar correcciones a partir de distintos errores de diseño.

Para el armado de los prototipos se decidió utilizar madera MDF. Para el cortado de la madera se utilizó el cortador láser de la universidad. Por lo que a continuación se detallará una pequeña explicación de su utilización, realizada a partir de los conocimientos adquiridos durante el “Curso Teórico - Práctico de Mecanizado Láser” dirigido por el Ingeniero Damián Garayalde.

4.1 Utilización de cortadora láser

En la universidad se encuentra a disposición un cortador láser “Versa Laser VLS 3.50” como se muestra en la figura 4.1.1.

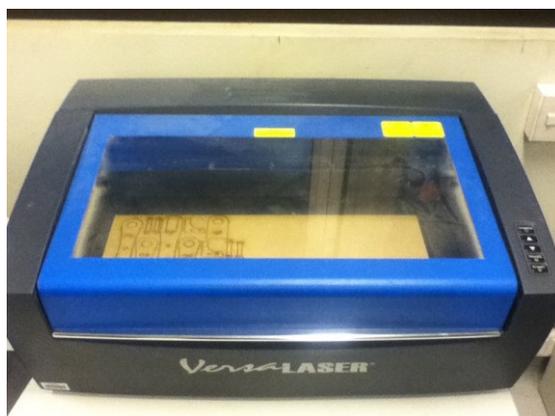


Figura 4.1.1 Versa Laser VLS 3.50.

El cortador se encuentra conectado a una PC donde se cargan los dibujos de las piezas a realizar en escala 1:1 y en formato “.dxf”. Estos dibujos se abren con el programa “CorelDraw”. En este programa se eliminan los rótulos y las cotas del dibujo, dejando únicamente el contorno a cortar, como puede observarse en la figura 4.1.2, tomada de los apuntes del curso.

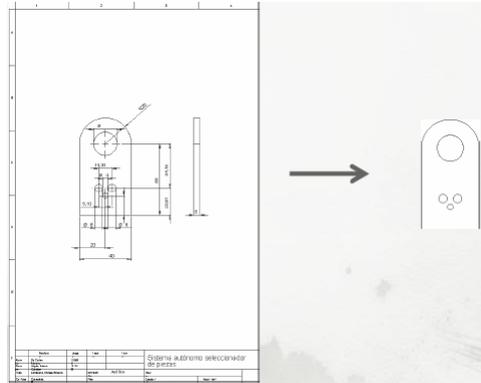


Figura 4.1.2 Eliminación de cotas y rótulos.

Las líneas se configuran para pertenecer a un único trazo continuo del tipo “hairline” de color “rojo” y la hoja se configura de 60x30cm, que corresponde al tamaño máximo del cortador láser. Una vez realizadas todas las configuraciones se pone “imprimir” y se abre el software de la impresora (en este caso “VLS3.50”). Se realiza la última corroboración de las medidas y la posición de cada pieza y se presiona el botón “play” en verde.

4.2 Armado del prototipo 1

Para el prototipo 1 se realizó el diseño en “SolidWorks” y se procedió a cortar las piezas, como se podrá observar en la figura 4.2.1.



Figura 4.2.1 Corte realizado de las piezas.

Luego se procedió a la separación de cada pieza y el armado del brazo, como puede observarse en la figura 4.2.2.

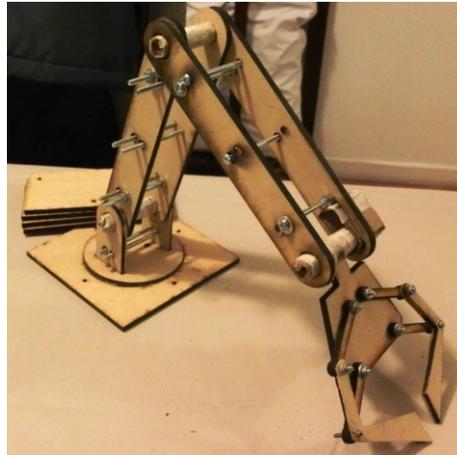


Figura 4.2.2 Armado del prototipo 1.

Correcciones y Aprendizaje

A partir del prototipo 1 se pudieron confirmar las medidas para el montaje de cada servomotor y se encontraron correctas. Sin embargo, se descubrió que las piezas eran demasiado largas y pesadas, por lo que se decidió modificar el largo de separación de los servos de 20cm a 15cm. También se redujo el espesor de las piezas de 5mm a 2.5mm, lo que produjo una reducción muy importante en el peso de las mismas, y se cambió la forma de algunas de las piezas también con el fin de reducir el peso. Por último se rediseño la forma de la mano, reduciendo su peso y mejorando el movimiento de las pinzas.

Esta reducción en el peso y largo total de las piezas nos permitirá disminuir fuertemente los torques requeridos para el movimiento, pudiendo de esta forma utilizar servomotores más pequeños, reduciendo significativamente los costos.

4.3 Armado del prototipo 2

Para el prototipo 2 se realizó nuevamente el diseño en “SolidWorks” como puede observarse en la figura 4.3.1, luego se exportaron las piezas a “CorelDraw” como puede observarse en la figura 4.3.2.

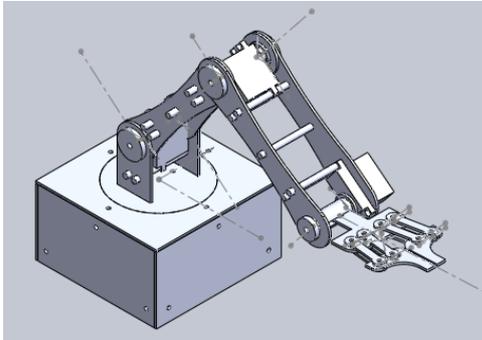


Figura 4.3.1 Prototipo 2 en “SolidWorks”.

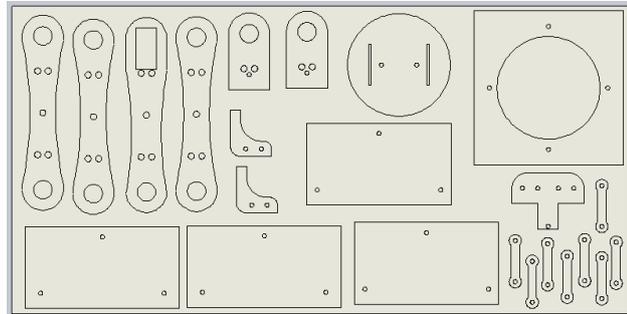


Figura 4.3.2 Prototipo 2 en “CorelDraw”.

Por último se procedió a cortar las piezas, como se podrá observar en las figuras 4.3.3 y 4.3.4.

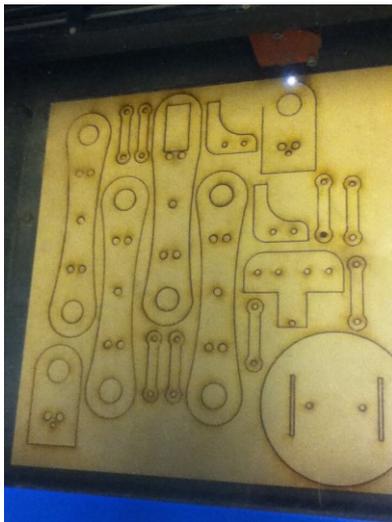


Figura 4.3.3 Cortado del Prototipo.



Figura 4.3.4 Cortado del Prototipo.

Correcciones y Aprendizaje

En el segundo prototipo se confirmó el diseño de la mano y de los brazos, que mejoraron la versatilidad y el peso del brazo. Sin embargo, aún cuando los estudios de torque realizados teóricamente coincidían con la práctica, los servomotores seleccionados se encontraron sobre esforzados y recalentaban. Para evitar un deterioro se tomo la decisión de realizar un tercer prototipo con un contrapeso que mejore el rendimiento de los mismos.

4.4 Armado del prototipo final

Para el tercer prototipo y último, se tomaron en cuenta todos los inconvenientes encontrados en los prototipos 1 y 2 y se realizó un nuevo diseño. También se realizaron cambios en la mano, generando piezas con el engranaje incluido, mejorando así el rendimiento del servomotor del efector. Se agregó un contrapeso, que mejoró considerablemente el rendimiento de los servomotores, como puede observarse en las figuras 4.4.1. y 4.4.2.

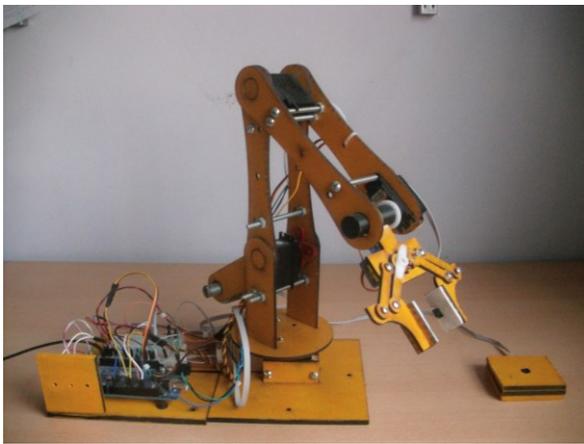


Figura 4.4.1 Prototipo final.

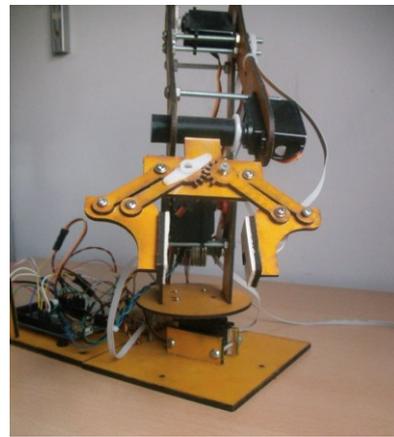


Figura 4.4.2 Prototipo final.

El prototipo fue nuevamente modificado mediante “SolidWorks” y cortado utilizando la cortadora láser de la universidad. Se tomará a este prototipo como brazo final para todos los cálculos e imágenes que se encuentran en este documento.

Capítulo 5: Cableado y montaje

5.1 Cableado en la estructura

En este capítulo se mostrará un diagrama con todas las conexiones que posee el microcontrolador y para esto se ha utilizado un software gratuito llamado Fritzing versión 0.9.2b. La imagen 5.1.1 corresponde con el diagrama eléctrico y muestra las conexiones con el procesador. Por otro lado en la imagen 5.1.2 se podrá observar el conexionado entero del microcontrolador, en un aspecto más real.

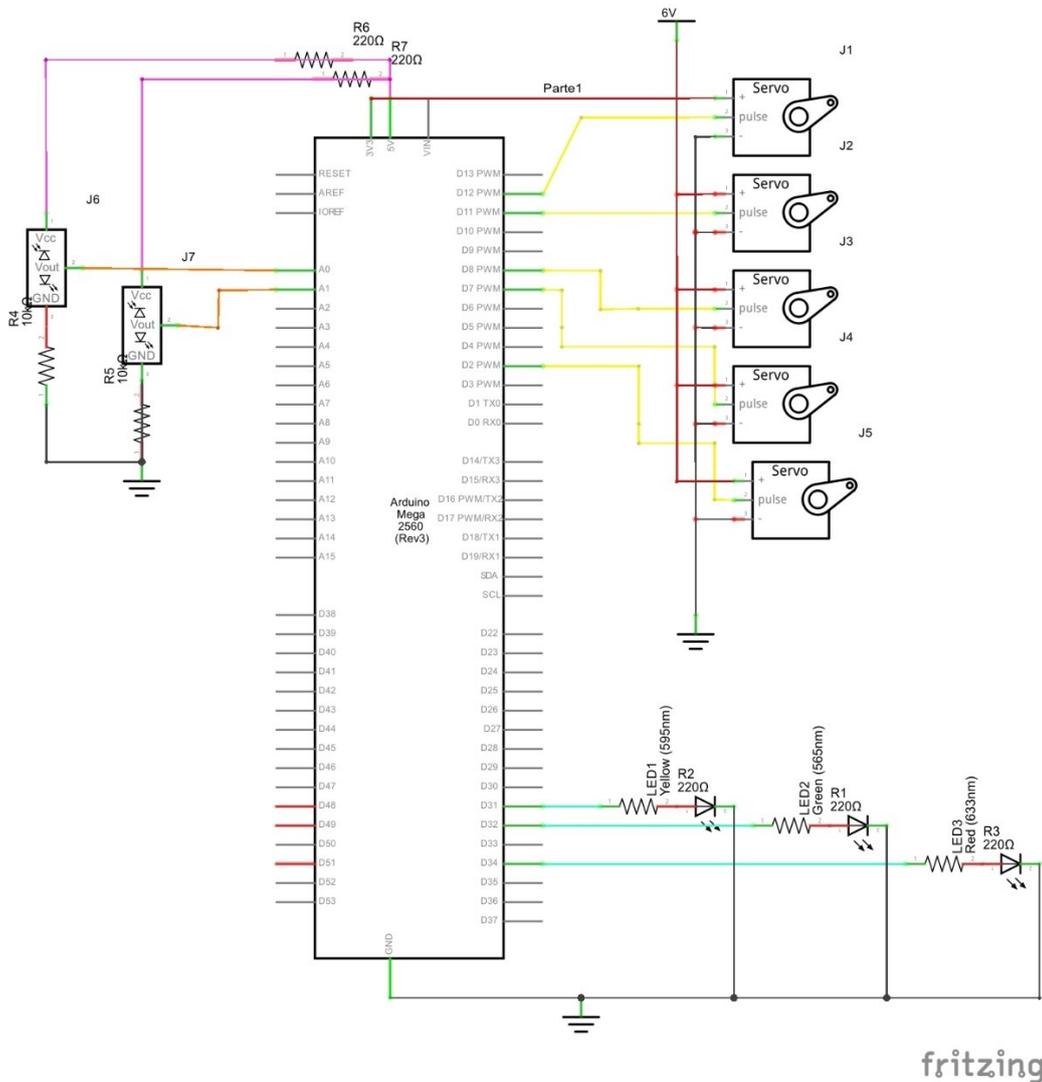


Figura 5.1.1 Diagrama eléctrico.

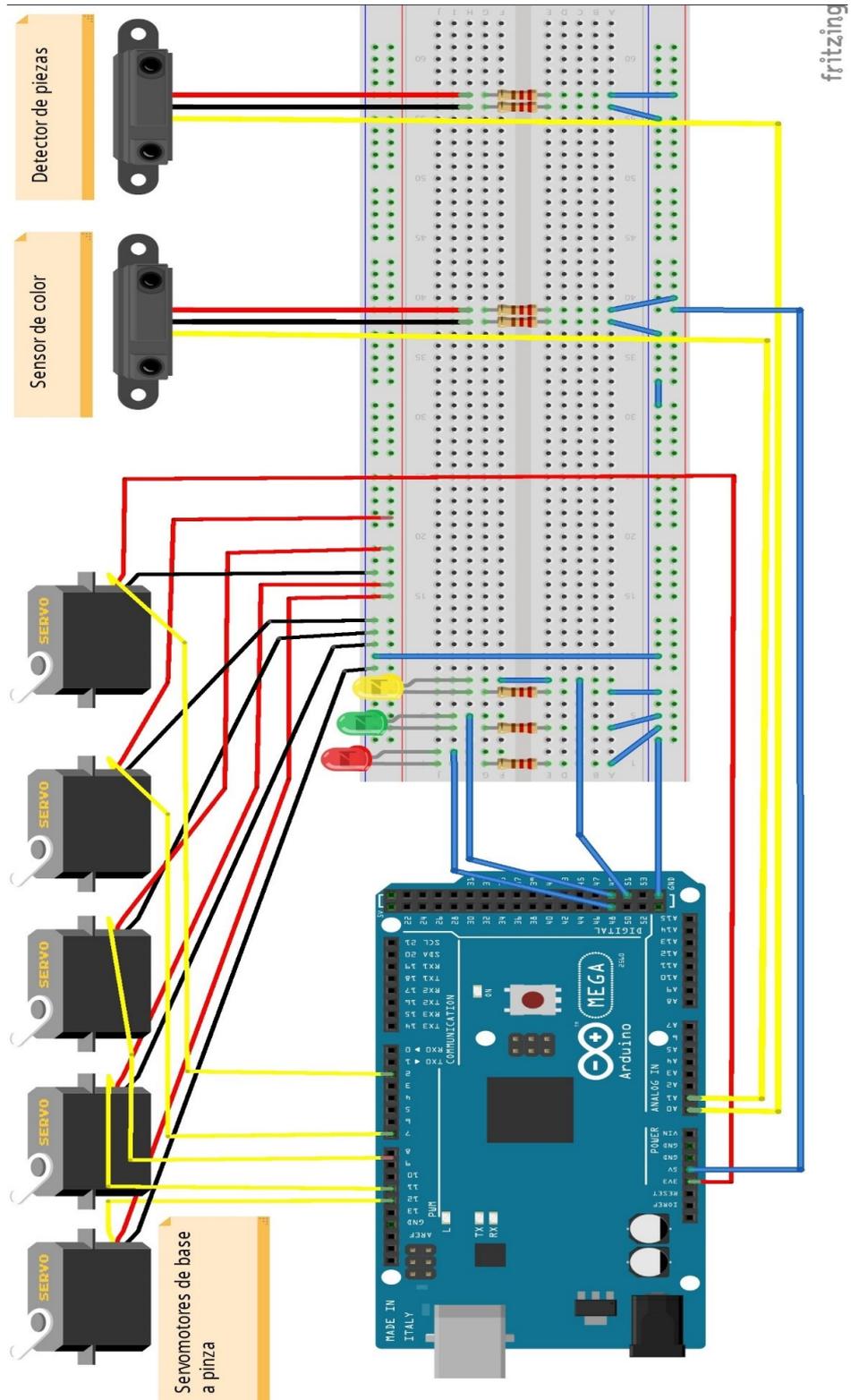


Figura 5.1.1 Esquema de conexionado.

Consideraciones en el conexionado:

- Para todos los servomotores, menos el del efector final, su alimentación es independiente al del microcontrolador, ya que requieren una intensidad de corriente mucho más elevada que el microcontrolador puede otorgar, la misma deberá ser de 6 Volt VCC con 1.8 Ampere de corriente.
- Para el servomotor del efector final, su alimentación no es independiente del microcontrolador, como el resto de los servomotores, sino que se alimenta directamente de él.
- Existe una tierra común, que conecta el polo negativo del microcontrolador al polo negativo de la alimentación externa. Esto es necesario para que no existan problemas en el normal funcionamiento del microcontrolador.

Capítulo 6: Modelo Cinemático

6.1 Cinemática directa

Se definirá a la cinemática directa, como aquella técnica empleada para calcular la posición y orientación de una cadena cinemática a partir de sus componentes fijas y sus transformaciones. De esta forma, se podrá obtener la posición final de un sistema conociendo los valores de las coordenadas articulares representados en los ángulos que tienen cada uno de los eslabones que componen dicha cadena cinemática. En la figura 6.1.1 se muestra la posición final de una cadena cinemática dados los desplazamientos angulares conocidos.

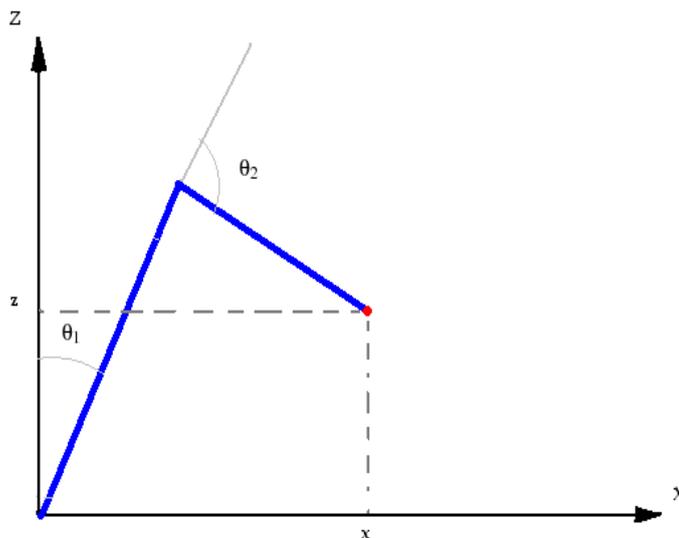


Figura 6.1.1 Cadena cinemática.

El planteo es válido para conocer las coordenadas de un punto, en principio desconocidos, con valores angulares conocidos. Si bien este no será el método utilizado, es importante aclarar su existencia ya que el método de “cinemática inversa” descrito a continuación nace de la transformación de los parámetros estudiados en la cinemática directa.

6.2 Cinemática inversa

Teniendo en cuenta las características del brazo robótico, es fundamental abordar la cinemática inversa para entender su funcionamiento. Se define cinemática inversa a aquella técnica que permite obtener todos los conjuntos posibles de ángulos articulares que dan solución a una ecuación, dada la posición y orientación del efector final. Como se observa en la figura 6.2.1, si quisiera moverse un efector final que forma parte de un conjunto mecánico con un determinado número de articulaciones móviles desde un punto A hasta un punto específico B, será necesaria la cinemática inversa para determinar como ha de moverse cada articulación para llegar a su destino.

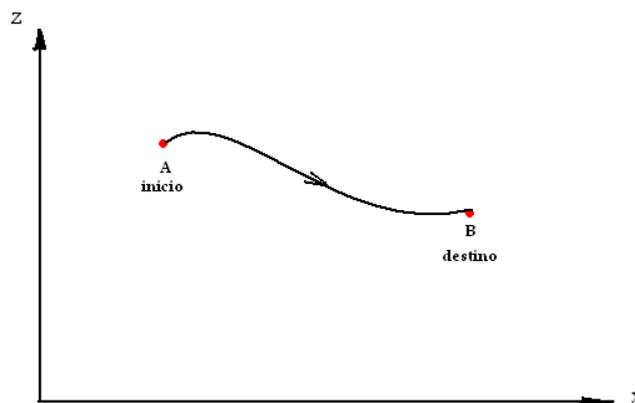


Figura 6.2.1 Movimiento del efector final.

Este concepto no es exclusivo de los sistemas mecánicos, como los robots, sino que es algo que el ser humano realiza de manera rutinaria miles de veces al día. A modo de ejemplo, si una persona esta sentada en una mesa y debe tomar con su mano un objeto y sujetarlo, hay una serie de cálculos que el cerebro realiza de manera instantánea para llevar a cabo esa acción. Lo que para el ser humano es una reacción intuitiva, en un sistema mecánico debe ser calculado y programado con anticipación.

Clasificación de los métodos de resolución de la cinemática inversa

Métodos generales

Estos métodos se basan en el uso de matrices y cálculos de transformaciones homogéneas, en los cuales se trata de obtener el modelo cinemático inverso del mecanismo a partir de su modelo directo, es decir, el uso de la cinemática directa.

Ventajas:

- Se pueden aplicar a cualquier mecanismo.

Desventajas:

- Requieren un elevado coste computacional.
- Se usan frecuentemente para mecanismos de 6 GDL.
- Multiplicidad de soluciones.

Métodos particulares

Son métodos que dan soluciones específicas de acuerdo a la estructura del mecanismo. El método particular más utilizado es el conocido como método geométrico. Este método se aplica mediante el uso de la geometría y la trigonometría, la cual depende de la propia geometría estructural del mecanismo.

Ventajas:

- Menor costo computacional.
- Sencillos para mecanismos con menos de 6 GDL.
- Las múltiples soluciones pueden ser acotadas, según el criterio.

Desventajas:

- Dan soluciones particulares, no genéricas, para cada mecanismo.

Teniendo en cuenta estos factores, la estructura del robot y los grados de libertad que tendrá, se utilizara el método geométrico que a continuación se implementará.

6.3 Desarrollo del modelo cinemático mediante el método geométrico

Para el desarrollo del brazo robótico se tendrán cinco articulaciones móviles, de las cuales se tomarán cuatro para el cálculo cinemático y se le agregará luego el efector final. Se desarrollarán los modelos cinemáticos inversos de manera progresiva, hasta llegar al modelo final. En la figura 6.3.1 se puede observar las distintas articulaciones del brazo robótico.

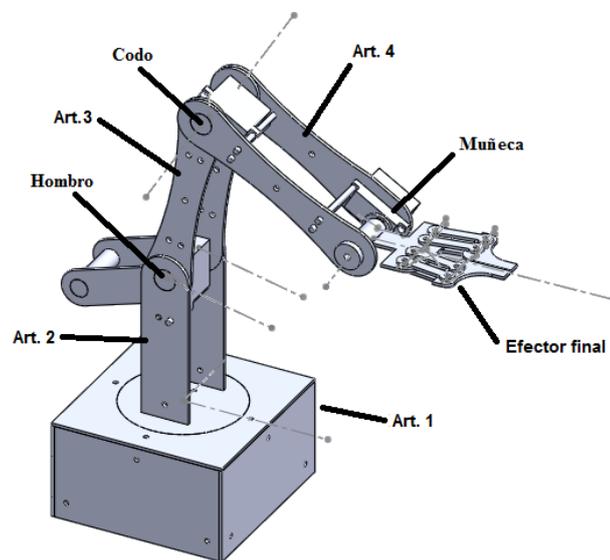


Figura 6.3.1 Esquema del brazo robótico y sus articulaciones.

Modelo de cinemática inversa para un sistema de 2 GDL

Se comenzará resolviendo un sistema de dos grados de libertad que solo podrá tomar posiciones en un mismo plano, tal como se observa en la figura 6.3.2.

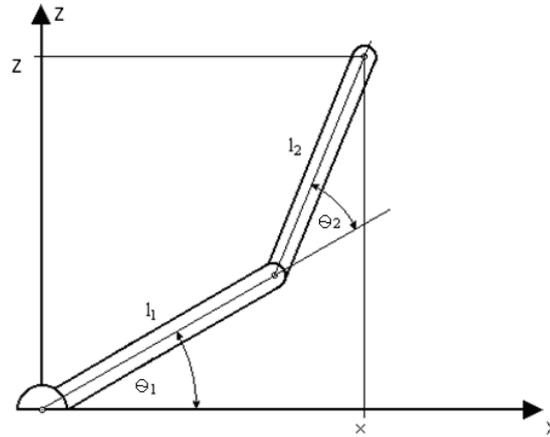


Figura 6.3.2 Sistema de 2 GDL.

Utilizando los métodos geométricos, se buscarán expresiones en las que podamos despejar los ángulos θ_1 y θ_2 , para saber que ángulos deberá tomar el sistema para ir hasta un punto deseado, dadas las longitudes de cada eslabón. Si se une con una línea recta imaginaria el origen de coordenadas del sistema con el efector final, se formará un triángulo como se observa en la figura 6.3.3. de lados l_1 , l_2 y C .

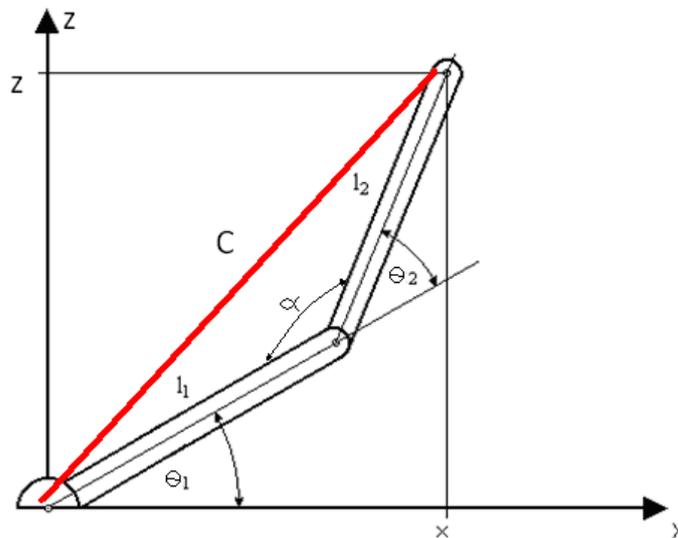


Figura 6.3.3 Esquema del triángulo de lados C-l1-l2.

Sobre el triángulo de la figura 6.3.3 se podrá aplicar el teorema del coseno, expresándolo de la siguiente forma:

- $C^2 = L1^2 + L2^2 - 2.L1.L2.cos(\alpha)$ (1)

Por otro lado, la longitud del tramo C puede ser expresada como:

- $C^2 = x^2 + z^2$ (2)

También se sabrá que:

- $\cos(\alpha) = \cos(180 - \theta_2) = \cos(180) \cdot \cos(\theta_2) + \sin(180) \cdot \sin(\theta_2)$ (3)

- $\cos(\alpha) = -\cos(\theta_2)$ (4)

Si se sustituye al $\cos(\theta_2)$ por $\cos(\alpha)$ en (1), tenemos:

- $x^2 + z^2 = L1^2 + L2^2 - 2 \cdot L1 \cdot L2 \cdot (-\cos(\theta_2))$ (5)

- $x^2 + z^2 = L1^2 + L2^2 + 2 \cdot L1 \cdot L2 \cdot \cos(\theta_2)$ (6)

Se despeja de aquí $\cos(\theta_2)$:

- $\cos(\theta_2) = \frac{x^2 + z^2 - L1^2 - L2^2}{2L1L2}$ (7)

Se sabrá también que el seno de θ_2 :

- $\sin(\theta_2) = \pm \sqrt{1 - (\cos\theta_2)^2}$ (8)

De esta expresión se podrá despejar el ángulo θ_2 como:

- $\theta_2 = \tan^{-1} \left(\pm \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_2}}{\cos \theta_2} \right)$ (9)

Esta será la solución al problema de cinemática inversa para el ángulo θ_2 , en donde puede observarse que presenta dos posibles soluciones, las cuales corresponderán a codo arriba o codo abajo según sea positivo o negativo, como puede observarse en la figura 6.3.4.

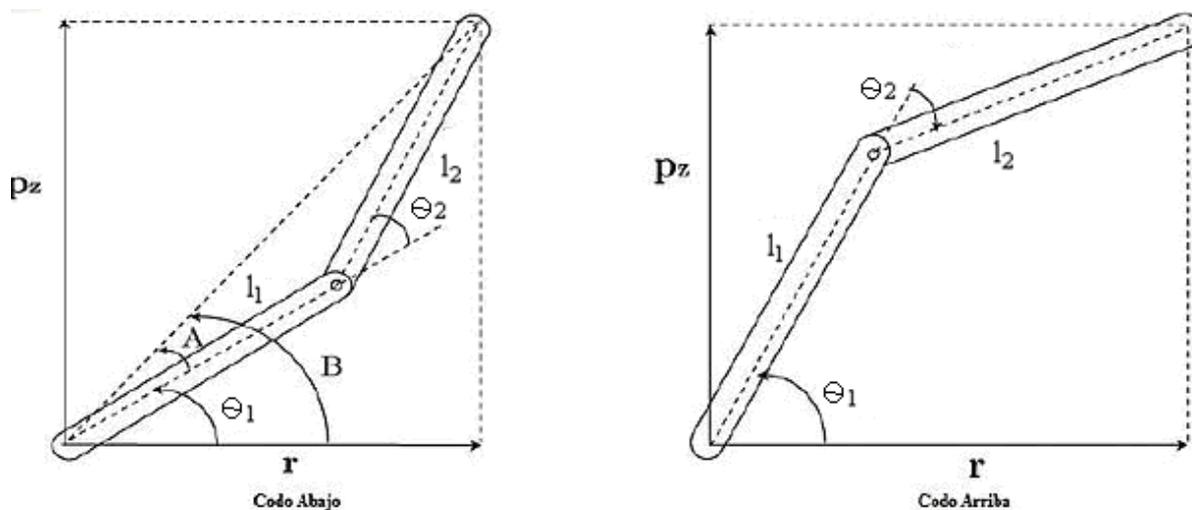


Figura 6.3.4 Posiciones que podrá adoptar θ_2

Para el cálculo de θ_1 , se definirán los ángulos, “ ϵ ” que es el ángulo que forma la recta C con el eslabón de longitud $L1$ y “ β ”, que es el ángulo que forma la recta C con el eje X, como se puede observar en la figura 6.3.5.

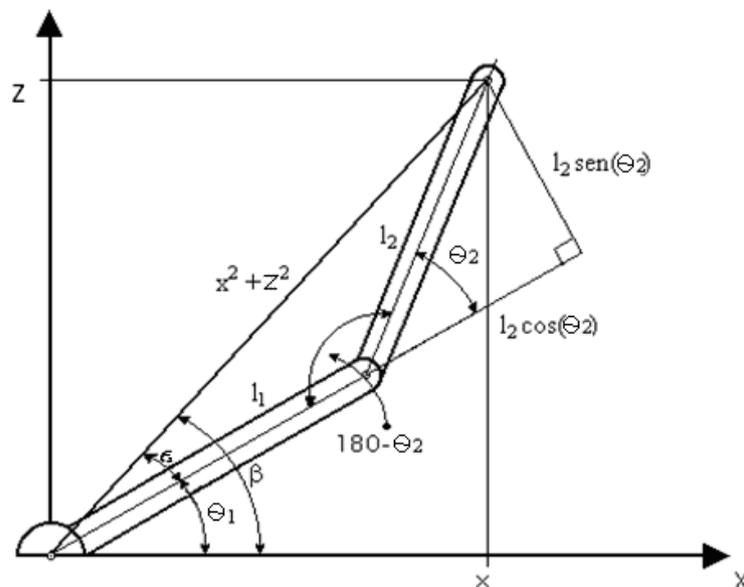


Figura 6.3.5 Esquema con ángulos ϵ y β .

Se podrá despejar las tangentes de dichos ángulos obteniendo lo siguiente:

- $tg\beta = \frac{z}{x} \Rightarrow \beta = tg^{-1}\left(\frac{z}{x}\right)$ (10)

- $tg(\epsilon) = \frac{l_2 \cdot \sin(\theta_2)}{l_1 + l_2 \cdot \cos(\theta_2)}$ (11)

Por otro lado, tendremos:

$$\bullet \quad \beta = \theta_1 + \varepsilon \tag{12}$$

Si se reemplazan las expresiones (10) y (11) en (12) y se despeja θ_1 , quedará:

$$\bullet \quad \theta_1 = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) - \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{L_2 \cdot \sin(\theta_2)}{L_1 + L_2 \cdot \cos(\theta_2)}\right) \tag{13}$$

Finalmente se obtendrá la expresión para θ_1 , se debe observar que en ambas fórmulas el término del $\cos(\theta_2)$ como el del $\sin(\theta_2)$ deberán ser reemplazados quedando finalmente una expresión en la cual los ángulos finales quedarán expresados en función de las coordenadas de destino y las longitudes de los eslabones como se observa en las ecuaciones (14) y (15).

$$\theta_1 = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{z}{x}\right) - \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{L_2 \cdot \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x^2 + z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right)^2}}{L_1 + L_2 \cdot \frac{x^2 + z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}}\right) \tag{14}$$

$$\theta_2 = \operatorname{tg}^{-1}\left(\pm \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{x^2 + z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}\right)^2}{\frac{x^2 + z^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2}}}\right) \tag{15}$$

Hasta acá se ha resuelto la cinemática inversa de un sistema mecánico con 2 GDL, teniendo la coordenadas X y Z, siendo las mismas coordenadas de destino, se indicara cuál debe ser la posición angular de cada uno de los eslabones para llegar a dicho punto.

Modelo de cinemática inversa para un sistema de 3 GDL

Al sistema ya determinado de dos grados de libertad, se le agregará la posibilidad de girar en el espacio, por lo que se obtendrá otra coordenada de destino posible, en este caso “Y” como se observa en la figura 6.3.6.

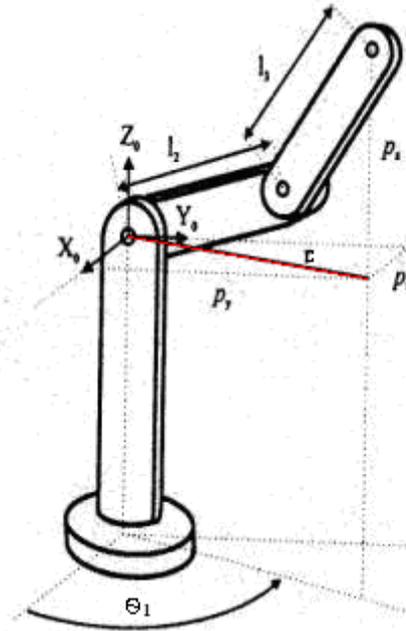


Figura 6.3.6 Esquema de mecanismo con 3 GDL.

En este caso, se representara como θ_1 al ángulo que se forma entre el plano “Y” con el plano “X”, θ_2 el ángulo formado por un nuevo plano ortogonal a los planos “X” e “Y”, respecto al primer eslabón y θ_3 , el ángulo formado entre el primer y segundo eslabón, en el nuevo plano formado a causa de θ_1 .

Para θ_1 se tendrá:

$$\bullet \theta_1 = \text{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (16)$$

Por otro lado, los eslabones se encontrarán en el mismo plano que el que se forma a causa de θ_1 , por lo que se podrá volver a aplicar el teorema del coseno, quedando muy similar al de 2 GDL:

$$\bullet C^2 + z^2 = L1^2 + L2^2 + 2.L1.L2.\cos(\theta_3) \quad (17)$$

También se podrá observar que:

$$\bullet C^2 = x^2 + y^2 \quad (18)$$

Si ahora se reemplaza (18) en la expresión (17) y despejamos en función de $\cos(\theta_3)$:

$$\bullet \cos(\theta_3) = \frac{x^2 + y^2 + z^2 - L1^2 - L2^2}{2.L1.L2} \quad (19)$$

También se podrá expresar en función del $\cos(\theta_3)$:

- $\sin(\theta_3) = \pm\sqrt{1 - (\cos(\theta_3))^2}$ (20)

Finalmente, se expresará en función de θ_3 :

- $\theta_3 = \text{tg}^{-1}\left(\pm\frac{\sqrt{1-\cos(\theta_3)^2}}{\cos\theta_3}\right)$ (21)

Observando la figura 6.3.7, se podrá adaptar al análisis realizado para el cálculo de θ_2 en un sistema de 3GDL.

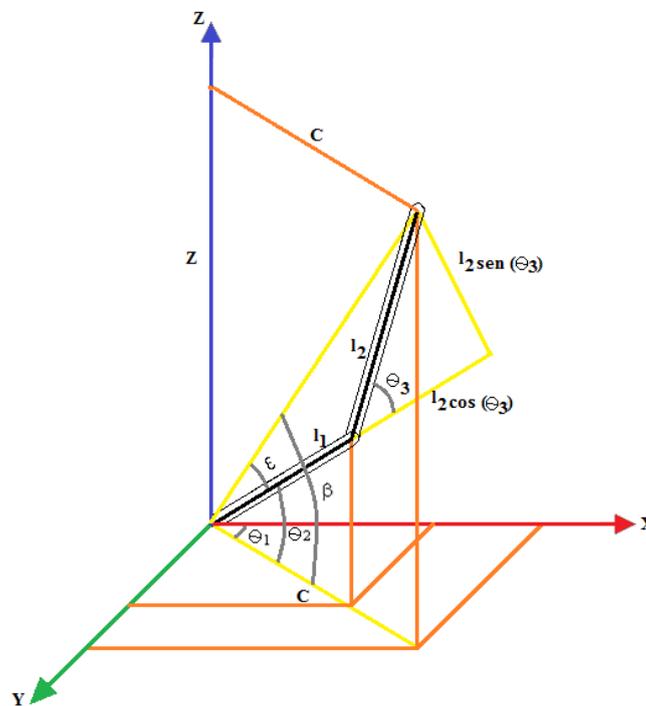


Figura 6.3.7 Esquema de ángulos ϵ y β .

- $\beta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{c}\right)$ (24)

- $\beta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{\pm\sqrt{x^2+y^2}}\right)$ (23)

- $\epsilon = \text{tg}^{-1}\left(\frac{l_2 \cdot \sin(\theta_3)}{l_1 + l_2 \cos(\theta_3)}\right)$ (24)

En este caso el valor de C que representa la hipotenusa entre los ejes “X” e “Y”, también será θ_2 como la diferencia entre β y ϵ :

- $\beta = \theta_2 + \epsilon$ (25)

- $\theta_2 = \beta - \epsilon$ (26)

$$\theta_2 = \text{tg}^{-1}\left(\frac{z}{\pm\sqrt{x^2+y^2}}\right) - \text{tg}^{-1}\left(\frac{L_2\sin(\theta_3)}{L_1+L_2\cos(\theta_3)}\right) \quad (27)$$

Modelo de cinemática inverso para un sistema de 4 GDL

Se agregará al sistema cinemático un nuevo grado de libertad, que consta de un eslabón que corresponde con la pinza, agregando otra articulación. Esta articulación presenta la característica de moverse en un mismo plano generado a un ángulo, a determinar por el usuario, con respecto a la base. Esto permite trabajar en un determinado ángulo de ataque y facilitar el estudio cinemático. A continuación en la figura 6.3.8. se detallarán las partes del sistema cinemático.

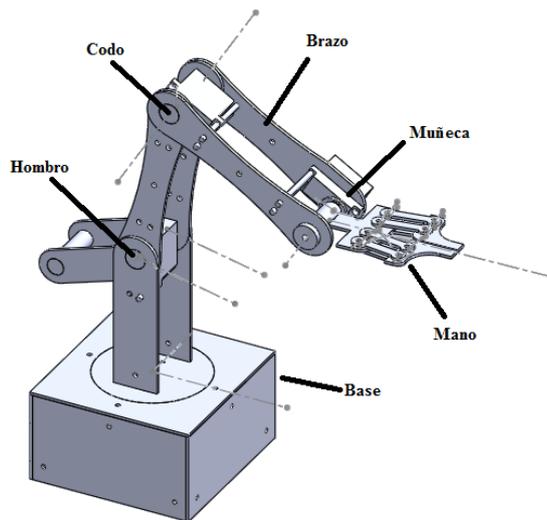


Figura 6.3.8 Imagen del brazo robótico diseñado.

El ángulo de ataque corresponderá al ángulo entre la base y la pinza y será llamado ϕ . Este ángulo podrá ser determinado por el usuario, reduciendo de esta forma el sistema a uno de tres grados de libertad como el ya calculado. Las formulas obtenidas nos darán la configuración angular que el sistema deberá adoptar para conseguir llegar a un destino deseado en las coordenadas “X”, “Y” y “Z” correspondiente a la articulación de la muñeca. Al agregar la pinza al sistema, las coordenadas finales alcanzadas por el robot no coincidirán con los valores destino ingresados. Esta discrepancia será proporcional al ángulo ϕ y a la longitud de la pinza. Debido a que estos valores permanecerán constantes en todo el ciclo operativo del robot, se podrá calcular la diferencia entre las coordenadas entregadas por

el sistema de ecuaciones y las coordenadas destino del verdadero punto alcanzado y expresarlo en una ecuación matemática. En la figura 6.3.9 se podrá observar la proyección del punto destino deseado en el plano “X-Y” mientras que en la figura 6.3.10 se expresará en el plano “X-Z” y se observará ángulo φ formado.

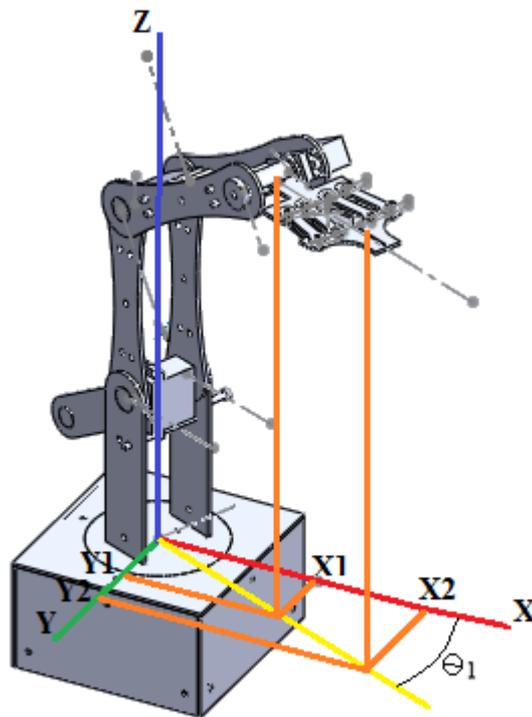


Figura 6.3.9 Proyección del punto destino deseado en el plano “X-Y”.

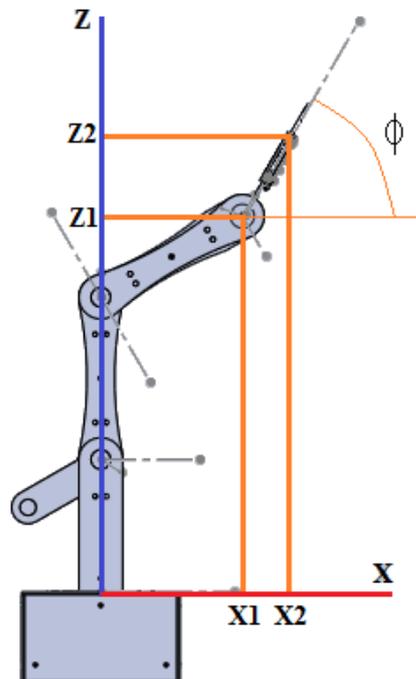


Figura 6.3.10 Proyección del punto destino deseado en el plano “X-Z” y determinación del ángulo ϕ .

A partir de las figuras 6.3.9 y 6.3.10 se podrán obtener las siguientes ecuaciones:

- $x' = x - L_p \cos \theta_1$ (28)

- $y' = y - L_p \sin(\theta_1)$ (29)

- $z' = z - L_p \sin(\phi)$ (30)

En donde L_p es la longitud de la pinza. A estas ecuaciones se les tendrá que agregar el efecto generado por el ángulo ϕ en L_p como se puede observar en la figura 6.3.10, por lo tanto:

- $x' = x - L_p \cos(\phi) \cos(\theta_1)$ (31)

- $y' = y - L_p \cos(\phi) \sin(\theta_1)$ (32)

- $z' = z - L_p \sin(\phi)$ (33)

Estas nuevas coordenadas X' , Y' y Z' son las que se introducirán en las fórmulas de nuestro sistema cinemático para alcanzar la posición destino seleccionada.

Formulas finales del sistema cinemático

A modo de resumen se presentan las formulas que se utilizarán para la programación del brazo robótico en el orden que serán ingresadas.

- $\theta_1 = tg^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$ (16)

- $x' = x - Lp.cos(\phi).cos(\theta_1)$ (31)

- $y' = y - Lp.cos(\phi).sin(\theta_1)$ (32)

- $z' = z - Lp.sin(\phi)$ (33)

- $\theta_2 = tg^{-1}\left(\frac{z}{\pm\sqrt{x^2+y^2}}\right) - tg^{-1}\left(\frac{L2sin(\theta_3)}{L1+L2cos(\theta_3)}\right)$ (27)

- $\theta_3 = tg^{-1}\left(\pm\frac{\sqrt{1-cos(\theta_3)^2}}{cos\theta_3}\right)$ (21)

Consideraciones en la resolución del sistema cinemático inverso

A partir del conjunto de ecuaciones obtenido, podremos encontrar un determinado número de resultados que las satisfagan permitiendo llegar al punto destino deseado. La variación en las múltiples soluciones corresponde a codo arriba o codo abajo, en este caso se tomaran aquellas soluciones que den como resultado una posición codo arriba, las principales razones son las siguientes:

- Mejor posición para tomar la pieza.
- Menor torque requerido, logrando no sólo un menor desgaste sino también evitando una sobrecarga en los servomotores.

6.4 Espacio o área de trabajo

El espacio o área de trabajo de un robot está definido por el grupo de puntos que pueden ser alcanzados por su efector-final. Este es el espacio en el cual el mecanismo puede trabajar por lo que aquellos puntos que se encuentren por fuera serán excluidos dentro del cálculo cinemático inverso.

En la figura 6.4.1, se detalla el área de trabajo en el plano XZ realizado mediante el programa MatLab. Se muestra de esta forma mediante un conjunto de puntos, aquellos lugares que dada la geometría del brazo serán alcanzables. Se podrá apreciar que un conjunto de estos puntos alcanzables poseen coordenadas negativas, por lo que puede tomar valores que estén por debajo del cero de referencia e incluso algunos valores que están por debajo del suelo donde se apoya.

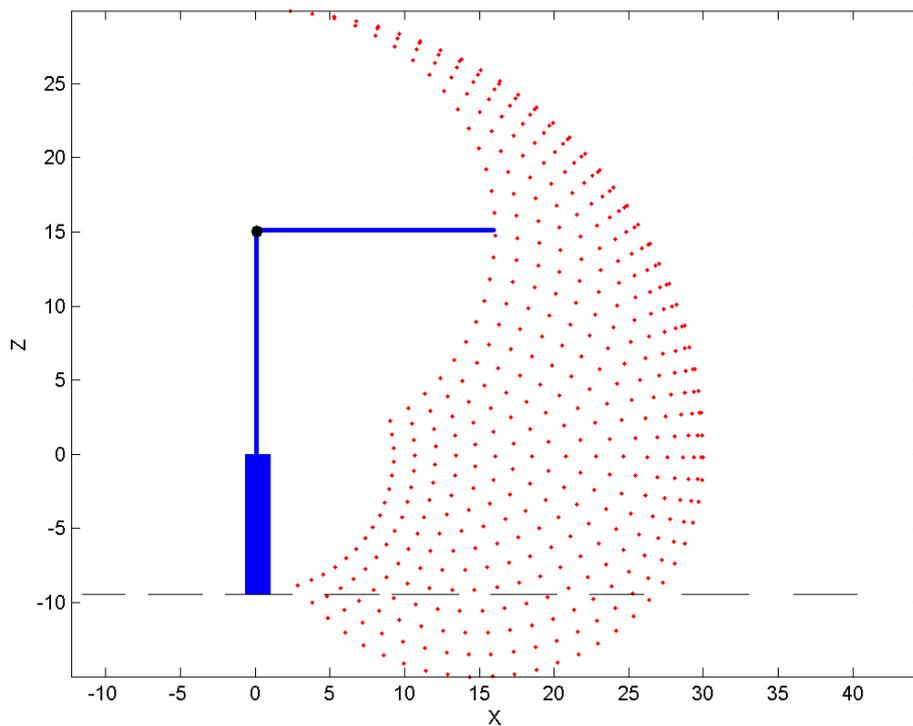


Figura 6.4.1 Área de trabajo en ejes XZ.

Al rotar el brazo variando θ_1 , se podrá observar que el área de trabajo definido en la figura 6.4.1 se mantendrá constante para todos los planos perpendiculares a este ángulo. En la figura 6.4.2 se podrá observar el área de trabajo en el plano YZ.

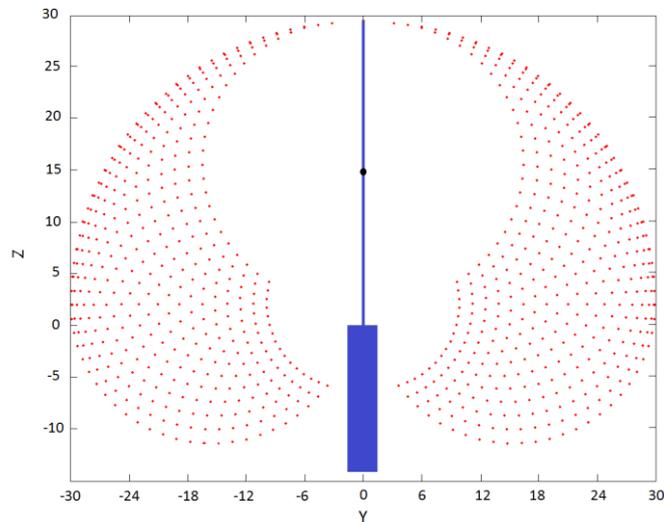


Figura 6.4.2 Área de trabajo en ejes YZ.

6.5 Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot

Una vez obtenidas las ecuaciones necesarias para permitir el movimiento de un punto inicial a un punto final, debemos unirlas con la geometría del robot, para esto es necesario determinar la posición inicial que tendrá y la ubicación del sistema de coordenadas principal esquematizada en la figura 6.5.1.

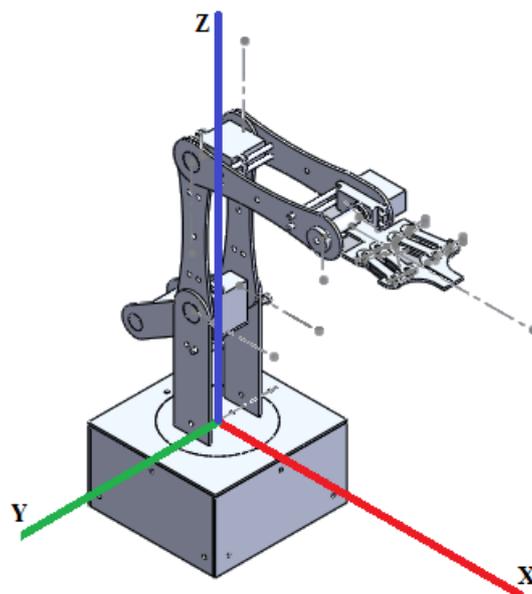


Figura 6.5.1 Ubicación del sistema de coordenadas en el brazo robótico.

En la figura 6.5.2 se indicó la posición de cada uno de los servomotores incluyendo los sentidos de giro de cada uno de ellos.

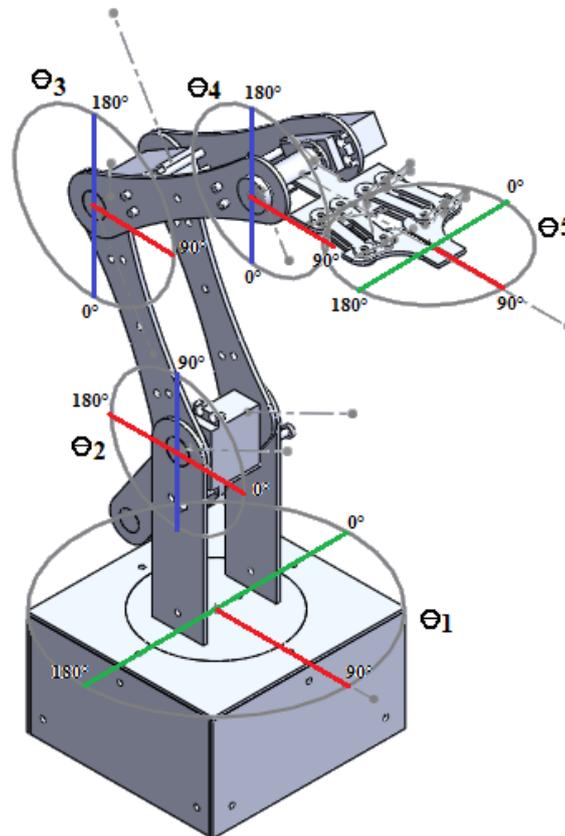


Figura 6.5.2 Posición de cada servomotor incluyendo sus sentidos de giro.

La posición inicial de los servomotores al ser energizados es 90° , es decir, la mitad de su recorrido angular, motivo por el cual fue seleccionada la posición inicial mostrada en la figura 6.5.1, para facilitar los cálculos.

Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_1

Para el desplazamiento de θ_1 , se deberá tener en cuenta las coordenadas destino “X” e “Y” ingresadas, como se observa en la fórmula (16) correspondiente al cálculo de dicho ángulo. Así mismo, será determinante el signo que tenga la coordenada “Y” destino ingresada, ya que la misma corresponderá a un cuadrante si es positivo o a otro cuadrante si es negativo, esto se puede ver gráficamente en la figura 6.5.3.

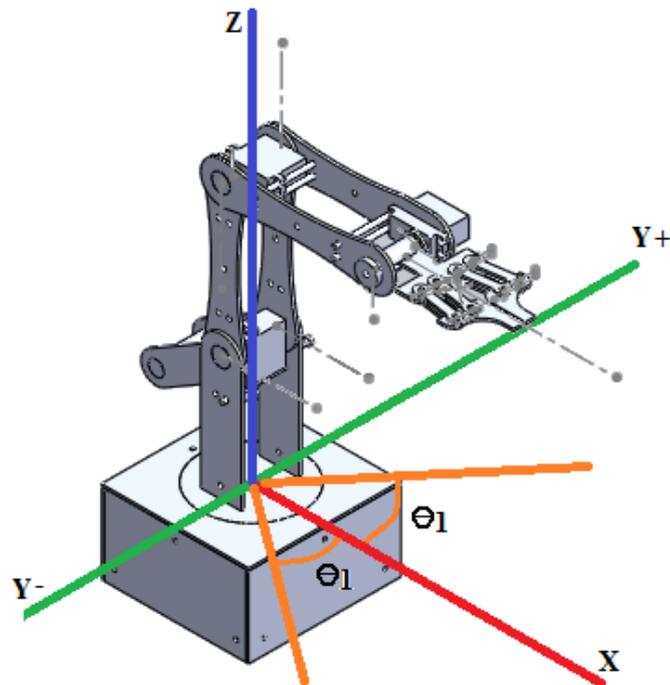


Figura 6.5.3 Valores de θ_1 según el signo de “Y”.

Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_2

Habiendo definido el área de trabajo del robot, hay que hacer notar que θ_2 no tomará valores mayores a 90° y estando el servomotor formando un ángulo recto con el eslabón anterior, la posición resultante en la cinemática inversa, será el ángulo que el servomotor deberá tomar. En la figura 6.5.4 se observan los límites de θ_2 y las distintas posiciones que podría tomar.

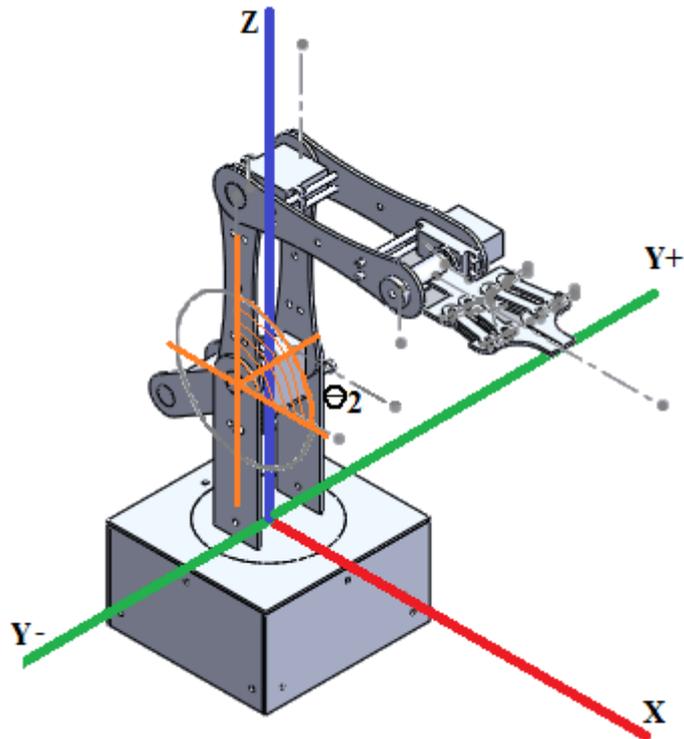


Figura 6.5.4 Límites de θ_2 .

Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_3

Para el caso de θ_3 , el valor angular obtenido de la cinemática inversa, deberá ser cuidadosamente analizado, ya que esta articulación puede circular en ambos sentidos, como puede verse en la figura 6.5.2. Lo que definirá en un principio el sentido de giro de esta articulación será la posición de “X” y “Z” destino, para “X” destino se comparará con la hipotenusa formada entre los eslabones L_2 y L_3+L_4 , esto se puede ver más claramente en la figura 6.5.5.

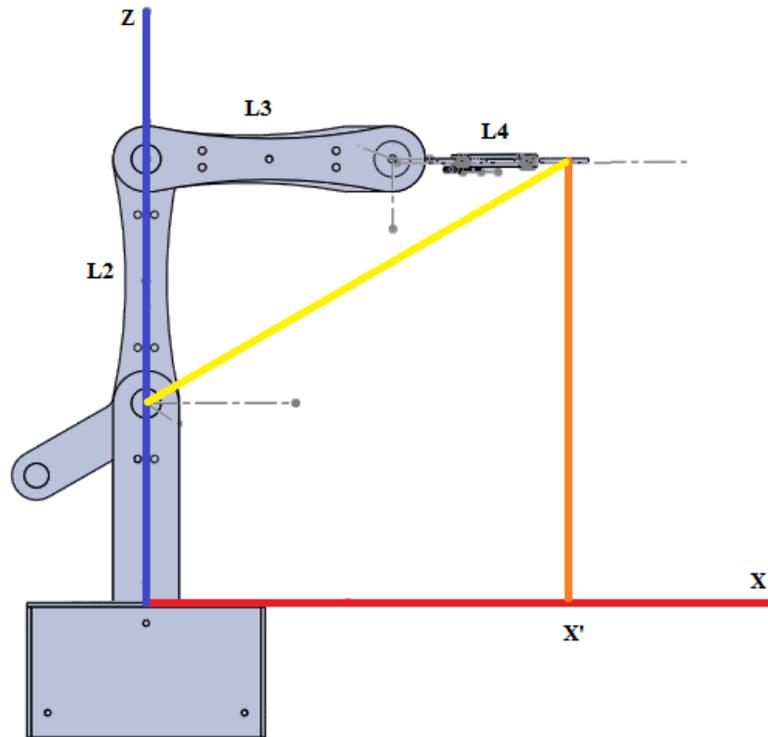


Figura 6.5.5 Hipotenusa entre L2 y L3+L4.

Si la posición “X” destino es menor que la hipotenusa se determinará el sentido de giro horario y si es mayor que la hipotenusa, girará en sentido antihorario, como se observa en las figuras 6.5.6 y 6.5.7.

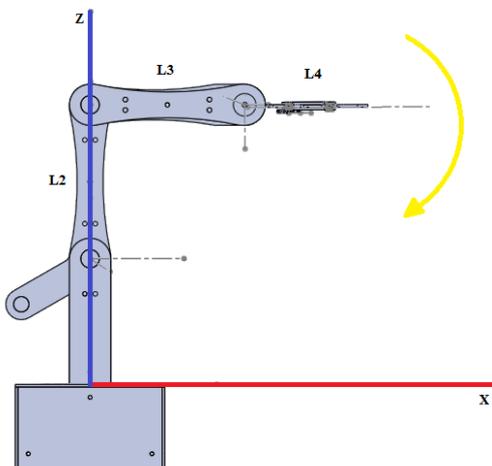


Figura 6.5.6 Sentido de giro horario.

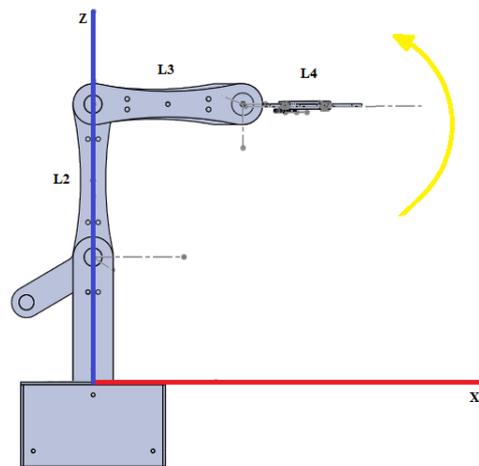


Figura 6.5.7 Sentido de giro antihorario.

Si se observa como varía la posición de θ_3 según el valor de “Z” destino se notará que cuando “Z” destino es menor a la longitud “L2”, el eslabón también girará en sentido horario mientras que en cualquier otro caso será en sentido antihorario. De esta forma, habrá tres razones que permitirán el desplazamiento de θ_3 en sentido antihorario:

- La posición “X” destino mayor al valor de la hipotenusa.
- La posición “Z” destino mayor al valor del eslabón L2.
- Ambos casos.

En cuanto a la posición inicial del brazo, en una posición angular de 90° , si el sentido de giro es antihorario, el eslabón deberá incrementar su posición angular en θ_3 , por lo tanto:

$$\bullet \theta_3 \text{ final} = 90 + \theta_3 \quad (34)$$

Por el contrario, si el sentido de giro es horario, el eslabón deberá disminuir su posición angular hasta el valor θ_3 :

$$\bullet \theta_3 \text{ final} = 90 - (90 - \theta_3) \quad (35)$$

Adaptación de la cinemática inversa a la geometría del robot para θ_4

Para poder adaptar los cálculos de la cinemática inversa en θ_4 , se debe tener en cuenta la variación angular que tuvieron θ_2 y θ_3 al moverse hacia su posición destino con respecto a su posición de origen, a los cuales los llamaremos $\theta_{2(\text{recorrido})}$ y $\theta_{3(\text{recorrido})}$ respectivamente. El desplazamiento del último eslabón “L4” mantendrá un ángulo constante con respecto al eje x, dicho ángulo podrá ser introducido por el usuario y corresponderá al ángulo de ataque de la pinza. Como se puede observar en las figuras 6.5.8 y 6.5.9, en un desplazamiento de un punto inicial a otro punto determinado, se mantendrá constante el valor del ángulo Φ . Para lograr esto, el valor correspondiente a θ_4 debe contener a los valores desplazados de θ_2 y θ_3 .

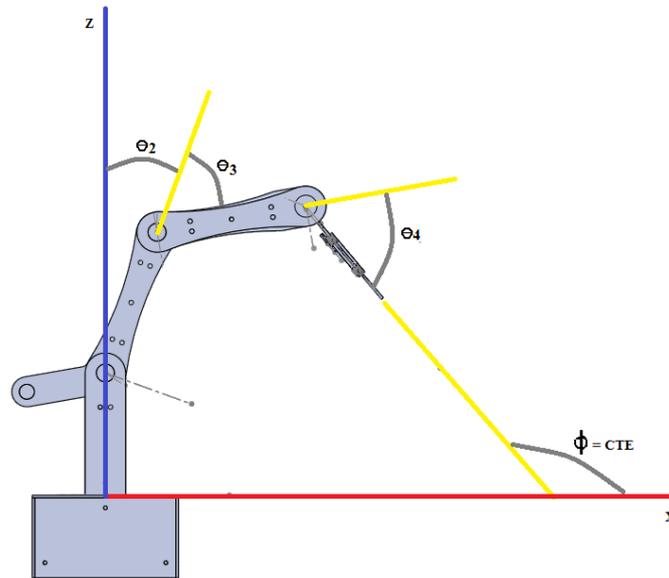


Figura 6.5.8 Ángulo de ataque en posición inicial.

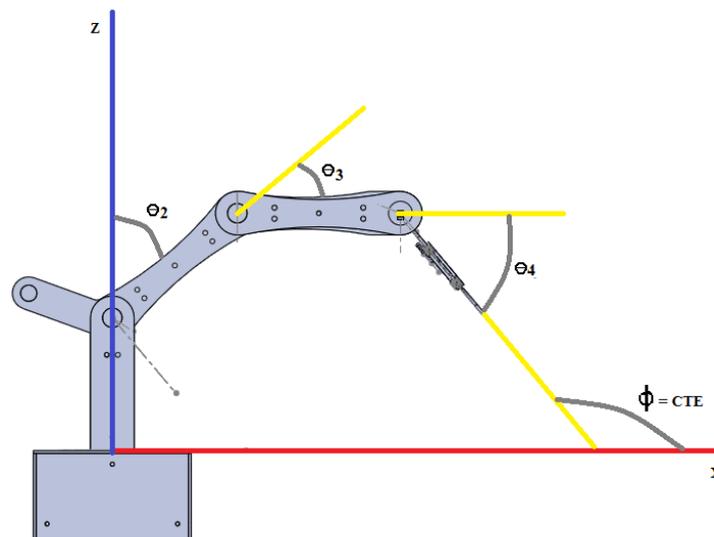


Figura 6.5.9 Ángulo de ataque en posición final.

Se definirán los desplazamientos angulares para θ_2 y θ_3 como:

- $\theta_2(\text{recorrido}) = (\theta_2 - 90)$ (36)

- $\theta_3(\text{recorrido}) = (\theta_3 - 90)$ (37)

A partir de los desplazamientos angulares de θ_2 y θ_3 se podrá calcular θ_4 como:

$$\bullet \theta_4 = 90 - \theta_2(\text{recorrido}) \pm \theta_3(\text{recorrido}) + \phi \quad (38)$$

Esto a su vez plantea dos posibles variantes para θ_4 , ya que θ_3 se sumará o restará, según sea el sentido de giro horario o antihorario.

Capítulo 7: Análisis estático

El análisis estático estudiará las fuerzas y torques a los que será sometido el brazo en su posición más desfavorable, que corresponde con aquella en la que los torques son máximos. De esta forma, se podrán conocer los torques requeridos por los servomotores. En la figura 7.1 se puede observar esta posición y las fuerzas a las que es sometido el brazo.

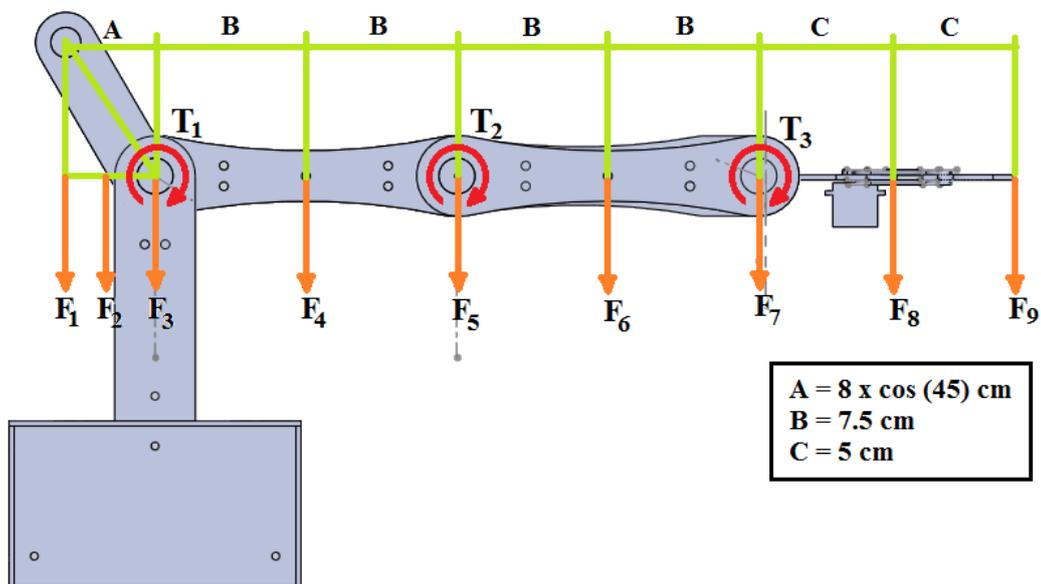


Figura 7.1 Brazo en la posición más desfavorable.

Todas las piezas fueron pesadas mediante una balanza digital de precisión marca Scout, modelo SC2020, como se muestran en las siguientes figuras.



Figura 7.2 Peso del brazo



Figura 7.3 Peso de la mano



Figura 7.4 Peso de los tornillos



Figura 7.5 Peso de la tuerca



Figura 7.6 Peso del eje de la mano



Figura 7.7 Peso del tornillo del contrapeso



Figura 7.8 Peso arandela del contrapeso

Se tomará el centro de masas en el centro geométrico de cada eslabón. La pieza que levantará el efector final no podrá superar los 50 gramos por lo que se ha propuesto un peso máximo para los servos de 55 gramos.

El peso de los servomotores se estimará en una primera instancia, en base a las especificaciones técnicas de posibles candidatos. Una vez realizado un cálculo estimado del torque requerido éstos se seleccionarán siguiendo los criterios adoptados en el capítulo 2. Para los cálculos realizados en esta sección se tomarán los valores especificados por el fabricante de los servomotores ya seleccionados. Estos valores junto con el peso de las otras piezas son detallados a continuación en la tabla 7.1.

Pieza	Peso (grf)
Servomotor 1	55
Servomotor 2	45
Servomotor 3	45
Brazo	14,51
Eje Mano	6,4
Mano	36,6
Tornillos	7,99
Tuercas	1,8
Carga	55
Contrapeso	208,4
Brazo del contrapeso	10

Tabla 7.1 Tabla de pesos.

El contrapeso será la suma de 12 arandelas, 2 tuercas y el tornillo de media pulgada, y corresponderá con la fuerza 1 según se muestra en la figura 7.1. La fuerza 2, corresponderá a la suma de los 2 eslabones que sostienen el contrapeso, uno a cada lado. La fuerza 3 será el peso del servomotor 1. Las fuerzas 4 y 6 corresponderán al peso de 2 brazos unidos por 5 tornillos con 3 tuercas cada uno. La fuerza 5 pertenecerá al peso del servomotor 2 y la fuerza 7 será la suma del servomotor 3 y el eje de la mano. Por último, las fuerzas 8 y 9 serán los pesos de la mano y de la carga correspondientemente.

En la tabla 7.2 se puede observar un cálculo detallado de las fuerzas antes nombradas y las distancias a los puntos sensibles de movimiento rotacional T1, T2 y T3 como se puede observar en la figura 1. Para los puntos T2 y T3 se tomarán únicamente los valores de distancia positivos dado que la fuerza de torque generada por detrás de estos puntos no generará un esfuerzo sobre los servomotores ubicados en los mismos.

	Fuerza (grf)	Fuerza (kgf)	Distancia a T1 (cm)	Distancia a T2 (cm)	Distancia a T3 (cm)	T1 (kgfcm)	T2 (kgfcm)	T3 (kgfcm)
F1	208,40	0,21	-5,66	0,00	0,00	-1,18	0,00	0,00
F2	20,00	0,02	-2,83	0,00	0,00	-0,06	0,00	0,00
F3	55,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
F4	95,97	0,10	7,50	0,00	0,00	0,72	0,00	0,00
F5	45,00	0,05	15,00	0,00	0,00	0,68	0,00	0,00
F6	95,97	0,10	22,50	7,50	0,00	2,16	0,72	0,00
F7	51,40	0,05	30,00	15,00	0,00	1,54	0,77	0,00
F8	36,60	0,04	35,00	20,00	5,00	1,28	0,73	0,18
F9	55,00	0,06	40,00	25,00	10,00	2,20	1,38	0,55
Torque requerido (kgf cm)						7,34	3,60	0,73

Tabla 7.2 Tabla de calculo de torque.

Capítulo 8: Conclusiones y propuestas para mejoras

8.1 Conclusiones

Al comienzo del trabajo se propuso realizar un brazo robótico con el fin de implementar las herramientas adquiridas en el transcurso de la carrera universitaria y dejar una herramienta para fines didácticos en la universidad.

Durante el transcurso del proyecto surgieron muchos desafíos que permitieron el desarrollo de las experiencias técnicas inherentes al campo de la mecatrónica y el desarrollo en las capacidades de búsqueda y estudio de mercado. Surgieron dificultades a lo largo del proyecto, que principalmente derivaron de las políticas de importación en Argentina y que acotaron la oferta de materiales, obstaculizando y encareciendo la búsqueda de los materiales correctos para el buen desarrollo del proyecto. Esto motivó el estudio de materiales alternativos disponibles en el país a costos admisibles, pero aumentó considerablemente los tiempos de ejecución previstos en el trabajo. Los tiempos del proyecto también se vieron afectados por la disponibilidad del laboratorio de la universidad, que implica los horarios para el uso de la cortadora láser y el mantenimiento de la misma. Se considera que se podría haber facilitado la construcción del brazo mediante el uso de la impresora 3D, sin embargo esta no estuvo disponible durante la realización del proyecto.

En cuanto a la programación y el desarrollo analítico del brazo se debieron realizar sucesivas pruebas hasta el correcto acoplamiento entre la cinemática del movimiento y la programación que así lo permite.

Los objetivos del trabajo fueron cumplidos satisfactoriamente. El brazo robótico fue diseñado y construido y es capaz de realizar todas las acciones que fueron propuestas en su alcance.

8.2 Propuestas de mejoras

Uso de la impresora 3D

Las piezas podrían ser nuevamente realizadas utilizando la impresora 3D cuando la misma esté disponible para el uso de los alumnos. Esto permitiría piezas de aproximadamente el mismo peso pero con mejores características de maquinabilidad, de resistencia al impacto y a la intemperie.

Capacidad de detectar obstáculos dentro del área de trabajo

Mediante sensores de proximidad se podría verificar la ausencia de elementos dentro del área de trabajo del brazo, permitiéndole a éste esquivarlos.

Capacidad de sensor otras características de la pieza aparte del color

Se podría adaptar el brazo robótico para que pudiese identificar otras características propias de la pieza para una separación más específica tal como su peso, volumen, forma, tipo de material, etc.

Aumentar la capacidad de los servomotores

Esto se podría lograr adquiriendo servomotores de mayor capacidad o utilizando dos o más servomotores por articulación. Dicha mejora permitiría aumentar el peso de las piezas que el brazo es capaz de tomar.

Aumentar los grados de libertad

Aumentando las articulaciones o permitiendo el giro de alguna de éstas, se podría aumentar los grados de libertad, pudiendo realizar movimientos más complejos.

Capítulo 9: Referencias

Libros consultados

CRAIG, John J. *Robótica*. 3ª. ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Education, 2006. 400p. ISBN: 9789702607724.

ANGULO USATEGUI, José María. *Robótica práctica: tecnología y aplicaciones*. Madrid: REDE, 1985. 376p.

ANGULO USATEGUI, José María. *Introducción a la robótica: principios teóricos, construcción y programación de un robot educativo*. Madrid: International Thompson, 2005. 426p. ISBN: 9788497323864.

Sitios web

Sitios web consultados

Página oficial de Arduino [en línea]. © 2015.
<<http://www.arduino.cc/>>

Precios de los brazos robóticos

<http://www.amazon.com/OWI-OWI-535-Robotic-Arm-Edge/dp/B00170FRCY/ref=sr_1_1?ie=UTF8&qid=1421075832&sr=8-1&keywords=robotic+arm> [Consulta: 15 de julio de 2014].

<http://www.amazon.com/Global-Specialties-R680-Banshi-Robotic/dp/B00GTQ0ZY0/ref=sr_1_7?ie=UTF8&qid=1421075832&sr=8-7&keywords=robotic+arm> [Consulta: 15 de julio de 2014].

<http://www.amazon.com/Global-Specialties-R700-Robotic-Diameter/dp/B00LNA5F0G/ref=sr_1_17?ie=UTF8&qid=1421075856&sr=8-17&keywords=robotic+arm> [Consulta: 15 de julio de 2014].

<http://www.amazon.com/Robotbase-As-6DOF-Aluminium-Robotic-Arm/dp/B00MJUIY5W/ref=sr_1_33?ie=UTF8&qid=1421075885&sr=8-33&keywords=robotic+arm> [Consulta: 15 de julio de 2014].

<http://www.amazon.com/Gowe%C2%AE-Programmable-Clamp-Robot-Ready/dp/B00HO15O54/ref=sr_1_87?ie=UTF8&qid=1421080754&sr=8-87&keywords=robotic+arm>[Consulta: 16 de julio de 2014].

<http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-539072192-robot-brazo-didactico-6-grados-de-libertad-para-armar-_JM>[Consulta: 17 de julio de 2014].

<[http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-548174754-robot-brazo-con-arduino-4-grados-de-libertad-para-armar-_JM#D\[S:VIP,L:SELLER_ITEMS,V:2\]](http://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-548174754-robot-brazo-con-arduino-4-grados-de-libertad-para-armar-_JM#D[S:VIP,L:SELLER_ITEMS,V:2])> [Consulta: 17 de julio de 2014].

Anexos

Anexo I: Datasheet Arduino Atmega 2560

Anexo II: Datasheet Servomotores

Anexo III: Datasheet Sensor de color

Anexo IV: Planos Brazo

Anexo V: Información complementaria cortadora láser

Anexo VI: Diagrama de Gantt

Anexo VII: Algoritmo de calibración del sensor de presencia

Anexo VIII: Programa Arduino

Anexo IX: Programa del sensor