

PROTOTIPO BRAZO ROBÓTICO DIDÁCTICO CON CINCO GRADOS DE  
LIBERTAD PARA TAREAS DE RECOGER Y COLOCAR

ALMARIO RODRIGUEZ WILSON JAVIER  
CAJAMARCA VEGA MARLON ANDRÉS

ESCUELA TECNOLÓGICA INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL  
TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA  
2012

PROTOTIPO BRAZO ROBÓTICO DIDÁCTICO CON CINCO GRADOS DE  
LIBERTAD PARA TAREAS DE RECOGER Y COLOCAR

ALMARIO RODRIGUEZ WILSON JAVIER  
CAJAMARCA VEGA MARLON ANDRÉS

PROYECTO PARA OPTAR EL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN MECATRÓNICA

Ingenieros  
Carlos Murillo  
Pablo Velásquez

ESCUELA TECNOLÓGICA INSTITUTO TÉCNICO CENTRAL  
TECNOLOGÍA EN MECATRÓNICA  
BOGOTÁ D.C, COLOMBIA  
2012

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado.

---

Firma del jurado.

---

Firma del jurado.

Bogotá D.C 27 de noviembre del 2012

DEDICADO A:

NUESTRAS FAMILIAS, PROFESORES  
E INSTITUCION EDUCATIVA.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestra familia, por apoyarnos incondicionalmente en todo el proceso de desarrollo del proyecto; a nuestros maestros por enseñarnos los conocimientos tanto tecnológicos como normativos aplicados en este proyecto y a nuestra institución por proporcionarnos la formación tecnológica en área de la mecatrónica.

Familia Almario Rodríguez y Familia Cajamarca Vega.

Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central.

Profesorado del ciclo Técnico Profesional y Tecnológico en Mecatrónica de la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central.

## TABLA DE CONTENIDO

pág.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.1. ANTECEDENTES.....	18
1.2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	23
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	23
1.4. OBJETIVOS .....	24
1.4.1. Objetivo general .....	24
1.4.2. Objetivos específicos .....	24
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	25
1.5.1. Alcances .....	25
1.5.2. Limitaciones .....	25
2. MARCO REFERENCIAL .....	26
2.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA ROBÓTICA.....	26
2.1.1. Robots móviles.....	27
2.1.2. Robots humanoides .....	27
2.1.3. Robots industriales.....	27
2.2. ESTRUCTURA DE ROBOTS INDUSTRIALES.....	27
2.2.1. Elementos y articulaciones de un manipulador.....	28
2.2.2. Configuraciones de manipuladores .....	29
2.3. SERVOMOTORES .....	31
2.3.1. Servomotores de CC.....	32
2.3.2. Servomotores de CA .....	33
2.4. EFECTOR FINAL .....	34
2.5. FUENTES DE ALIMENTACIÓN .....	36
2.5.1. Fuentes de corriente directa.....	36
2.5.2. Fuentes de tensión alterna rectangular .....	38

2.6.	Placa microcontroladora Arduino .....	39
2.6.1.	Programación en IDE Arduino.....	41
2.6.2.	Estructura del lenguaje Arduino.....	42
2.7.	MANEJO DE SERVOMOTORES RC .....	43
2.7.1.	Funcionamiento de los servos RC.....	44
2.8.	PROGRAMACIÓN EN EL LENGUAJE PROCESSING .....	46
2.9.	PRO ENGINEER WILDFIRE 5.0 .....	48
3.	DESARROLLO INGENIERIL.....	49
3.1.	CINEMÁTICA INVERSA DEL PROTOTIPO .....	49
3.2.	SISTEMA ELECTRÓNICO Y ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO .....	54
3.2.1.	Microcontroladores y placas microcontroladoras.....	54
3.2.2.	ARDUINO vs PIC .....	54
3.2.3.	Elección del dispositivo controlador.....	56
3.3.	ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LOS MOTORES PARA EL PROTOTIPO .....	57
3.3.1.	Motores paso a paso.....	58
3.3.2.	Motores de corriente continua. ....	58
3.3.3.	Servomotores.....	59
3.3.4.	Elección del motor.....	60
3.4.	DESARROLLO MECÁNICO .....	61
3.4.1.	Diseño mecánico.....	62
3.4.2.	Análisis de perfiles .....	63
3.4.3.	Elección del perfil optimo.....	68
3.4.4.	Elección y construcción del mecanismo de transmisión angular .....	69
3.4.5.	Construcción de la unión entre el mecanismo de transmisión angular y los eslabones.....	71
3.4.6.	Construcción de la articulación del hombro .....	72
3.4.7.	Construcción de la base del manipulador.....	73
3.4.8.	Construcción de la ultima articulación y montaje de la pinza .....	75
3.5.	DESARROLLO DE LA INTERFAZ HUMANO MAQUINA (HMI).....	78
3.6.	CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA .....	80

3.7. DESARROLLO DE LA PARTE DE CONTROL.....	82
4. METODOLOGÍA.....	85
4.1. Líneas de investigación .....	85
4.2. Área de investigación .....	85
4.3. Líneas de investigación del programa.....	85
5. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS .....	86
6. CONCLUSIONES.....	89
BIBLIOGRAFIA.....	91



## TABLA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Primer brazo robótico. Desarrollado por George Devol y Joe Engleberger. ....	18
Figura 2. Robot PUMA 500 de Unimation robotics. ....	19
Figura 3. Robot Scara de la compañía A-fast .....	20
Figura 4. Planta de ensamblaje de automóviles automatizada con manipuladores robóticos, Michigan, USA.....	21
Figura 5. Demanda a nivel mundial de robots industriales según la IFR (federación internacional de robótica).....	21
Figura 6. Proyección de la demanda a nivel mundial de robots industriales según la IFR.....	22
Figura 7. Cadena Cinemática Abierta .....	28
Figura 8. Tipos de articulaciones. ....	28
Figura 9. Robot cartesiano.....	29
Figura 10. Robot cilíndrico. ....	29
Figura 11. Robot polar. ....	30
Figura 12. Robot SCARA.....	30
Figura 13. Brazo Antropomórfico. ....	31
Figura 14. Servomotor de corriente continua RC. ....	32
Figura 15. Servomotores de corriente alterna. ....	33
Figura 16. Pinza robótica en aluminio accionada por servomotores RC de corriente continua.....	34
Figura 17. Cabezal cañón láser para brazo robótico dedicado al corte de material .....	36
Figura 18. Fuente de alimentación de corriente continua ajustable.....	37
Figura 19. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación CC. ....	38
Figura 20. Tipos de onda rectangular .....	38
Figura 21. Placa microcontroladora Arduino UNO .....	39
Figura 22. Arduino con modulo hardware para comunicación Ethernet .....	40
Figura 23. Entorno integrado de desarrollo IDE, para Arduino.....	41
Figura 24. Esquema de funcionamiento interno de un servo RC .....	44
Figura 25. Tiempos de control de posición para servos estándar TowerPro, entre otros .....	45

Figura 26. Tiempos de control de posición para servos RC Futaba, Airtronic, Traxxas entre otros.....	45
Figura 27. Esquema de conexión de un servomotor RC .....	46
Figura 28. Entorno de programación del lenguaje Processing .....	47
Figura 29. Ejemplo de diseño en el software CAE Pro Engineer Wildfire 5.0 .....	48
Figura 30. Resolución de la cinemática inversa del prototipo por el método geométrico.....	49
Figura 31. Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo de brazo robótico con 5 grados de libertad .....	52
Figura 32. Diagrama de flujo de la subrutina de cálculo de ángulos para los motores del prototipo .....	53
Figura 33. Placa microcontroladora Arduino Mega 2560 .....	56
Figura 34. Microcontrolador PIC 16F877 .....	56
Figura 35. Motor paso a paso .....	58
Figura 36. Sistema de transmisión de movimiento con poleas y motor de corriente directa.....	59
Figura 37. Servomotor de modelismo HITEC.....	59
Figura 38. Conexión entre una placa microcontroladora Arduino y un servomotor de modelismo .....	61
Figura 39. Perfil 1: Perfil rectangular macizo.....	63
Figura 40. Perfil 2: Perfil en H.....	64
Figura 41. Perfil 3: Perfil en T .....	65
Figura 42. Perfil cuadrado hueco .....	66
Figura 43. Perfil 5: Perfil circular hueco .....	67
Figura 44. Soporte para servomotores estándar .....	70
Figura 45. Pieza en forma de L para el soporte del servomotor .....	70
Figura 46. Unión mecanismo transmisión angular y eslabon .....	71
Figura 47. Mecanismo de transmisión angular de la articulación del hombro .....	72
Figura 48. Mecanismo rotatorio para la base de un manipulador casero. ....	73
Figura 49. Mecanismo de posicionamiento angular de la base. ....	74
Figura 50. Base para el prototipo.....	75
Figura 51. Pinza para manipulador robótico de la empresa Sparkfun electronics. 76	
Figura 52. Conexión entre e eslabón del codo y el mecanismo de transmisión angular de la muñeca. ....	77
Figura 53. Conexión entre el mecanismo de transmisión angular de la muñeca con el extremo efector. ....	77
Figura 54. Pantalla principal de la interfaz de programación del prototipo .....	78
Figura 55. Pantallas para la localización del extremo efector del manipulador .....	79

Figura 56. Pantallas en las que se seleccionaron las coordenadas de un punto en el espacio .....80

Figura 57. Conexión entre varios servomotores y el Arduino. ....81

Figura 58. Alimentación de la placa microcontroladora .....82

Figura 59. Pantalla con un ejemplo de programa para controlar el posicionamiento de un servomotor por Arduino.....83

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Clasificación de los robots. ....	26
Tabla 2. Sistemas de sujeción para robots .....	34
Tabla 3. Herramientas terminales para robot .....	35
Tabla 4. Tabla de comparación entre los diferentes motores usados en robótica .	60
Tabla 5. Tabla comparativa entre los diferentes posibles perfiles para el diseño de los eslabones del prototipo .....	68

## GLOSARIO

**AUTÓMATA:** máquina que imita la figura y los movimientos de un ser animado.

**CADENA CINEMÁTICA:** conjunto de elementos mecánicos unidos entre sí por medio de acoplamientos esféricos o cilíndricos.

**CAE:** Computer-Aided Engineering (ingeniería asistida por computadora). Combina diseño asistido por computadora (CAD), análisis asistido por computadora (CAA), manufactura integrada por computadora (CIM), manufactura asistida por computadora (CAM), planeación de requerimientos de materiales (MRP) y planeación asistida por computadora (CAP).

**CINEMÁTICA:** es una rama de la física que estudia las leyes del movimiento (cambios de posición) de los cuerpos, sin tomar en cuenta las causas (fuerzas) que lo producen, limitándose esencialmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo.

**CIRCUITO:** red eléctrica (interconexión de dos o más componentes, tales como resistencias, inductores, condensadores, fuentes, interruptores y semiconductores) que contiene al menos una trayectoria cerrada.

**COMPONENTE:** se denomina componente electrónico a aquel dispositivo que forma parte de un circuito electrónico. Se suele encapsular, generalmente en un material cerámico, metálico o plástico, y terminar en dos o más terminales o patillas metálicas.

**DISPOSITIVO:** un dispositivo, artefacto o aparato electrónico (todos sinónimos), es una combinación de componentes electrónicos organizados en circuitos, destinados a controlar y aprovechar las señales eléctricas.

**ESLABÓN:** cada uno de los elementos que forman una cadena. En nuestro caso una cadena cinemática.

**MICROCONTROLADOR:** circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica.

**PLACAS MICROCONTROLADORAS:** son básicamente microcontroladores embebidos en una placa, con los dispositivos tales como cristales de cuarzo, reguladores de voltaje, entrada USB, botón de reinicio, entrada para un adaptador de corriente, entre otros más necesarios para un correcto funcionamiento.

**ROBOT:** es una maquina en la que se integran componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de comunicaciones, y dotadas de un sistema informático para su control en tiempo real, percepción del entorno y programación.

**SERVOMOTOR:** es un dispositivo similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y mantenerse estable en dicha posición.

**SISTEMA:** un sistema electrónico es un conjunto de circuitos que interactúan entre sí para obtener un resultado.

## RESUMEN

El trabajo presenta el desarrollo de un prototipo de brazo robótico didáctico con 5 grados de libertad. El prototipo podrá ser programado por cualquier persona, así no tenga conocimiento de robótica, y se tendrá como punto de partida para la creación de un brazo robótico desde ceros.

Éste prototipo es capaz de posicionarse en un punto dado del espacio tridimensional a partir de unas coordenadas ingresadas por una usuario mediante una interfaz grafica diseñada especialmente para este robot. La interfaz es intuitiva y amigable, por lo que no se presenta dificultad en la programación del prototipo.

Se abordan temas como la selección de perfiles para la realización de los eslabones, motores para las articulaciones, controladores o placas microcontroladoras usadas para el control del prototipo, lenguajes de programación como Processing y JAVA, cinemática inversa del manipulador por métodos geométricos.

Se pretende introducir a los estudiantes los conceptos básicos y criterios de selección de elementos idóneos para la construcción de un prototipo de brazo robótico de bajo costo. Se hace un enfoque más específicamente en la programación y método de posicionamiento del manipulador mediante el uso de métodos trigonométricos.

### Palabras claves:

- Brazo robótico con 5 grados de libertad.
- Brazo robótico con servomotores.
- Control de brazo robótico mediante Arduino.
- Posicionamiento de brazo manipulador por métodos geométricos.

## ABSTRACT

This document shows the development of a 5 degrees of freedom robotic arm prototype for pick and place activities. The prototype could be programmed by anyone, regardless of their knowledge of robotics or computer science, and will be the starting point for the creation of a robotic arm from the beginning.

This prototype is able to position its end effector at a given point in space, from three-dimensional coordinates entered by a user, through a graphical interface designed especially for this robot. The interface is intuitive and friendly, so it does not show difficulty in programming the prototype.

Document presents topics as selecting profiles for building the links of the robot, motors for the joints, electronic prototyping board used for the control of the prototype, programming languages like JAVA and Processing and inverse kinematics of the manipulator through geometric methods.

The goal is to introduce students to the basic concepts and criteria for selection of suitable elements for the construction of a low-cost robotic arm prototype. Focus more specifically on the programming and the positioning method of the manipulator, using trigonometric methods.

Keywords:

- Robotic arm with 5 degrees of freedom.
- Robotic arm with servomotors.
- Arduino robotic arm control.



## INTRODUCCIÓN

Problemas como los accidentes nucleares, localización de naufragios, exploración de volcanes y viajes espaciales han sido solucionados mediante la aplicación de robots y esto ha logrado captar la atención hacia ellos, hasta el punto de cambiar la forma en que construimos, mantenemos la seguridad, producimos y distribuimos la energía y alimentos al mundo. Se han convertido en las herramientas predilectas para la exploración de la tierra y lo que está fuera de ella. “Los robots están transformando la forma de vida y trabajo, y están expandiendo los límites de la experiencia humana” (Baturone, 2001).

La robótica a lo largo de la historia se ha vuelto cada vez más importante para nosotros los humanos, como ayuda en diversas actividades que consideramos desgastantes o imposibles de realizar por nuestra propia cuenta. Por ende, los avances a los que la humanidad está sujeta constantemente, tienen como consecuencias una mayor cantidad de actividades que no podemos realizar por nosotros mismos, y se debe recurrir a sistemas especializados o aptos para cumplir dichas actividades.

En la actualidad, con el gran desarrollo de la robótica y su aplicación en un sinnúmero de procesos o problemas a resolver, la robótica se ha dividido, de manera general, en cuatro ramas, que son: la robótica industrial, robótica humanoide, robótica móvil y robótica medicinal.

Los brazos robóticos, también llamados manipuladores industriales, se encuentran dentro de la rama de la robótica industrial. Siendo muy utilizados para la realización de tareas peligrosas y repetitivas presentes en el campo industrial. Se construirá este prototipo para ahondar en los conceptos de diseño, construcción y funcionamiento de manipuladores industriales, desde una perspectiva didáctica, con el fin de dar a conocer dichos conceptos de una manera muy fácil e intuitiva por los estudiantes de la carrera de mecatrónica de la ETITC.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. ANTECEDENTES

En 1774, Pierre Jaquet-Droz, describió una máquina autómatas, es decir, con movimientos propios. Pero casi 150 años más tarde, en 1920, la idea se transformó en una realidad, gracias al checo Karel Capek, que llamó a su máquina **robota**, palabra que en el idioma checo que significa trabajo forzado (ANGULO, ANGULO, & ROMERO, 2005).

A mediados de la década de 1960 a 1970, Joe Engleberger se reunió con George Devol para hablar sobre una patente que tenía en mente Devol, e involucraba un brazo mecánico controlado por computadora.

Figura 1. Primer brazo robótico. Desarrollado por George Devol y Joe Engleberger.

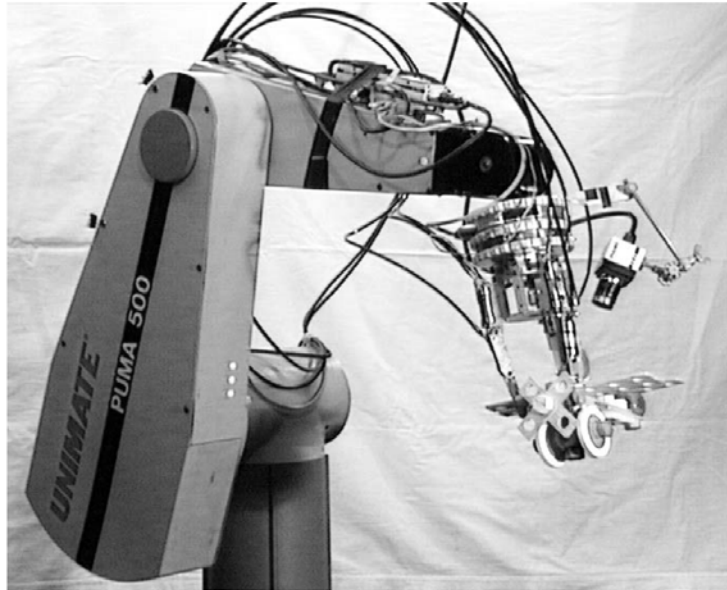


Fuente: NICKS, Victoria. George Devol & Joe Engleberger Create Unimation's Robot in 1959. En: The industrial robot arm created by George Devol and Joe Engelberger's company, Unimation, in the mid 1900s was inspired by Isaac Asimov's Robot series. [En línea]. Agosto 12, 2010. [consultado 5 sept. 2012]. Disponible en [http://c.suite101.com/files/styles/article\\_full/public/000/150/000150737.jpg](http://c.suite101.com/files/styles/article_full/public/000/150/000150737.jpg)

Engleberger dijo que esta invención era un robot primitivo. Los ancestros de los brazos robóticos fueron los brazos tele operados, desarrollados en la década de 1940s.

Estos brazos eran empleados en la manipulación de material radioactivo, y este estaba controlado por un usuario detrás de un vidrio aplomado. Más adelante, los usuarios de estos brazos tele operados fueron sustituidos por control computacional, y usaban tecnología desarrollada por el MIT para el control computacional de herramientas (SELIG, 1992).

**Figura 2. Robot PUMA 500 de Unimation robotics.**



Fuente: SHERIF, Yahia. The Robotics Laboratory. En: Robotic-rapid learning. [En línea]. Septiembre 10, 2009. [consultado 5 sept. 2012]. Disponible en <http://newplans.net/Robotics/Laboratory/img10.gif>

A comienzos de la década de 1970s, Engleberger visitó Japón, encontrándose con la primera investigación formal sobre robots industriales. Al mismo tiempo, la industria japonesa estaba investigando a cerca acerca de la robustez en las plantas de manufactura, criterio con el cual se relacionan las investigaciones tanto en robótica industrial como en los procesos de manufactura. Unimation robots estuvo a la cabeza de la manufactura en Japón, improvisando modelos que desarrollaban, lo que dio lugar a las compañías de robots Japonesas.

Originalmente con los robots se intentó reemplazar a los trabajadores humanos. Esto era cierto, especialmente en la industria, en donde los problemas surgían al mismo tiempo que la industria avanzaba. Se concluyó que los robots eran máquinas universales, capaces de ser reprogramadas y con una gran variedad de utilidades. Todas estas situaciones, motivaron el desarrollo del robot PUMA por Unimation robotics, en un proyecto de desarrollo de la General Motors. El robot PUMA fue modelado para tener un aspecto muy similar al de un brazo humano, y este podría levantar cargas según se peso.

Inicial mente, la difícil reprogramación de esos robots trajo como consecuencia una desventaja, con respecto a los humanos, donde la localización del espacio de trabajo no era conocida. Entonces las primeras aplicaciones para estas nuevas máquinas fueron pintar, retocar y soldar. Para ese entonces, los robots era

programados por un operador humano que le indicaba una secuencia de movimientos.

Luego la aparición de los robots Scara, permitió un mayor rango de actividades que podía realizar un brazo robótico. Los robots Scara fueron desarrollados en Japón, para montar componentes en placas de circuito impreso para la industria de la electrónica (SELIG, 1992).

**Figura 3. Robot Scara de la compañía A-fast**



Fuente: OMRON. Robots. En: Robot SCARA. [En línea]. Enero 28, 2012. [consultado 5 sept. 2012].

Disponible en

[http://images.industrial.omron.es/IAB/Products/Motion%20and%20Drives/SCARA%20Robots/images/Scara\\_Robots400x400.jpg](http://images.industrial.omron.es/IAB/Products/Motion%20and%20Drives/SCARA%20Robots/images/Scara_Robots400x400.jpg)

Para este momento, el concepto de robot cambio. Ya no se pensaba que los robots remplazarían a los humanos, sino que estos harían los trabajos que los humanos no podían, como por ejemplo, trabajar en zonas peligrosas o en ambientes tóxicos. Podrían trabajar en lugares inaccesibles para los humanos, como el espacio exterior o en el fondo del mar.

Con la depresión económica en la década de 1980s, la gente adoptó la tecnología como salva vidas. Esto fue, debido a que en cierto modo los robots fueron los encargados de reestructurar la industria manufacturera. Los beneficios económicos de instalar robots fueron tomando fama y se volvieron cada vez un recurso muy buscado para el desarrollo industrial (SELIG, 1992).

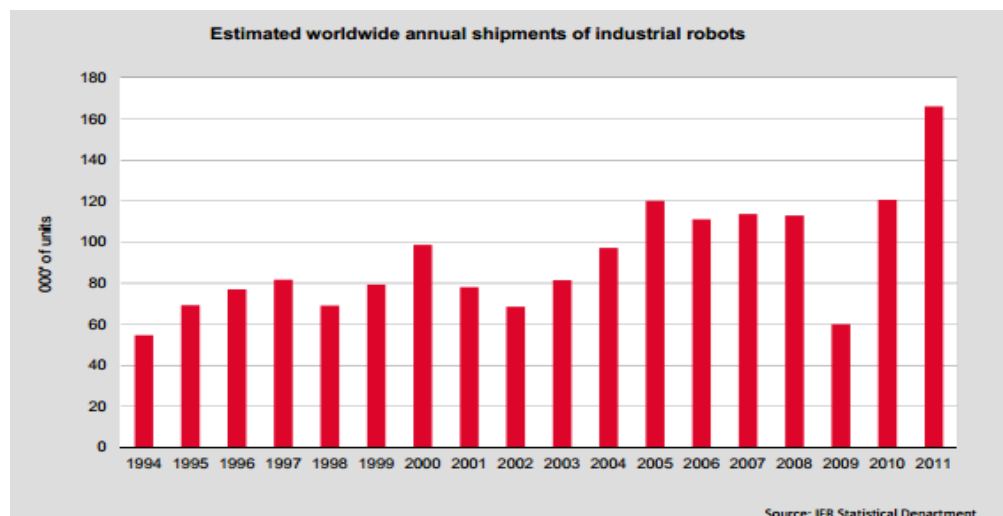
**Figura 4. Planta de ensamblaje de automóviles automatizada con manipuladores robóticos, Michigan, USA.**



Fuente: TXM. En: Smart Capital Investment – Lean Thinking First – Chequebook Second! [En línea]. Septiembre 12, 2010. [consultado 5 sept. 2012]. Disponible en [http://www.txm.com.au/wp-content/uploads/2012/05/robot+body\\_builder.jpg](http://www.txm.com.au/wp-content/uploads/2012/05/robot+body_builder.jpg)

Para el año 2011, la demanda de manipuladores industriales, brazos robóticos y robots de aplicaciones industriales, ha llegado a los 160 000 en todo el mundo, siendo este el año con mas demanda de robots industriales en toda la historia, según la federación internacional de robótica (IFR). En donde se puede donde se evidenciar este hecho y puede notarse que ha crecido en demanda con una velocidad que era insospechable hace treinta o cuarenta años atrás (International Federation of Robotics, 2012).

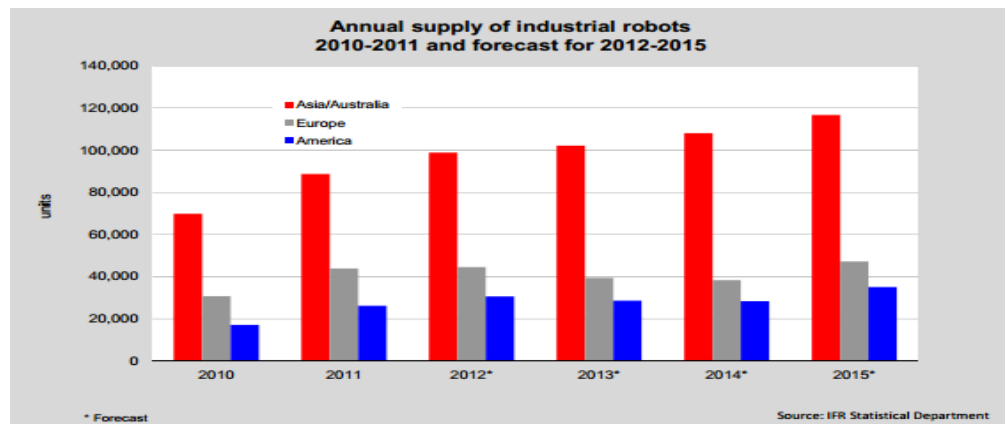
**Figura 5. Demanda a nivel mundial de robots industriales según la IFR (federación internacional de robótica)**



Fuente: International Robotic Federation. Executive Summary En: World Robotics 2012 Industrial Robots [En línea]. Agosto 20, 2012. [consultado 5 sept. 2012]. Disponible en: Executive\_Summary\_WR\_2012.pdf

La federación internacional de robótica, proyecta que para el año 2015, se proyecta que la demanda de robots industriales llegara a los 195 000, siendo Asia y Australia los continentes con mayor demanda, seguidos por Europa y América. En América se estima una demanda de 38 000 robots industriales para el 2015 (International Federation of Robotics, 2012).

**Figura 6. Proyección de la demanda a nivel mundial de robots industriales según la IFR**



Fuente: Fuente: International Robotic Federation. Executive Summary En: World Robotics 2012 Industrial Robots [En línea]. Agosto 20, 2012. [consultado 5 sept. 2012]. Disponible en: Executive\_Summary\_WR\_2012.pdf

Según la federación internacional de robótica (IRF), la población mundial de robots industriales actualmente en operación a finales del 2011, está en un rango entre 1.3 millones y 1.4 millones de robots.

## 1.2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, en la Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, el acceso a las herramientas para el estudio y fundamentación de la robótica, solo es posible para los estudiantes de mecatrónica que están en los últimos semestres de la carrera, decimo y onceavo semestre. Pero para los demás estudiantes, anteriores a dichos semestre, no se cuenta con una herramienta para el estudio y la interacción con sistemas robóticos. Para la investigación y desarrollo de aplicaciones basadas en los principios de la robótica, es de gran ayuda conocer sobre los mismos, y mediante sistemas didácticos, se pretende introducir a los estudiantes, sin importar el semestre, los principios básicos de la robótica.

¿Cómo desarrollar un prototipo de brazo robótico con 5 grados de libertad, que ayude a los estudiantes de la carrera de Mecatrónica de la E.T.I.T.C. en el proceso de fundamentación o introducción en la robótica sin importar en que semestre se encuentren?

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

El uso de los brazos robóticos en el mundo, ha aumentado considerablemente en los últimos años. Por ende, la experiencia en el diseño e implementación de los mismos, nos ayudara a comprender el funcionamiento de los brazos robóticos. Con ello se tendrá una base para la fundamentación, la investigación o el desarrollo de innovaciones relativos no solo a los manipuladores, sino a todas las áreas que se involucran en la robótica.

Al ver esta falencia, decidimos crear un prototipo de brazo robótico didáctico con 5 grados de libertad, que sirva a los estudiantes en general de la carrera de mecatrónica, como herramienta para el conocimiento y desarrollo de sistemas robóticos, con el que se puedan hacer prácticas didácticas, sirviendo como un medio de introducción al alumnado en la rama de la robótica

## 1.4. OBJETIVOS

### 1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de brazo robótico didáctico con 5 grados de libertad para tareas de recoger y colocar programable y controlado mediante interfaz grafica.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Definir el tipo de controlador para los actuadores y tipo de lenguaje para el desarrollo de la interfaz maquina-humano.
- Realizar diseño y simulación de la parte estructural del prototipo.
- Realizar diseño electrónico y eléctrico del manipulador.
- Desarrollar una interfaz maquina-humano óptima e intuitiva para el control del prototipo.
- Construir la estructura del prototipo según diseño y adaptar el sistema electrónico previamente realizado.
- Integrar la estructura, la parte electrónica y eléctrica con la interfaz maquina-humano.
- Realizar pruebas sobre el prototipo.
- Desarrollar aplicación didáctica para su presentación final.



## 1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

### 1.5.1. Alcances

Capacidad para posicionar su extremo efector, con movimiento en un solo plano vertical a la base, en un punto del espacio dado por el usuario y que este dentro del campo de trabajo del manipulador.

El robot podrá recoger y colocar piezas que se encuentren dentro del campo de trabajo del mismo.

Se contara con una interfaz grafica muy intuitiva y fácil de manejar, hasta por usuarios sin experiencia en robótica.

El robot solo podrá llegar a un punto dentro de un cubo de 200 mm. Ignorando los puntos que estén fuera de dicho cubo.

Admisión de cargas hasta de 100 gramos de peso.

### 1.5.2. Limitaciones

Se utilizaran herramientas trigonométricas para calcular la posición del brazo. No se utilizaran herramientas matemáticas avanzadas de robótica como las matrices de transformación homogénea, ángulos de Euler, entre otras.

Es indispensable contar con un ordenador, ya sea portátil o de escritorio, para poder utilizar y programar el prototipo.

Es indispensable contar con una fuente de alimentación que sea capaz de suministrar 2 o más amperios en corriente continua, para poder alimentar los servomotores presentes en el prototipo.

La cinemática inversa que se utilizo, solo nos permite calcular las posiciones a las que deben estar las articulaciones, mas no las velocidades y aceleraciones de las mismas.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. CONTEXTUALIZACIÓN DE LA ROBÓTICA

La definición aceptada internacionalmente para robot es: “manipulador multifuncional y reprogramable, diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales mediante movimientos programados y variables que permiten llevar a cabo diversas tareas” (Andres Gomez De Silva Garza, 2008).

La robótica estudia y analiza una clase particular de sistemas mecánicos llamados robots manipuladores, y la multifuncionalidad es la característica básica que distingue a un robot manipulador de un sistema mecatrónico. Generalmente los sistemas mecatrónicos realizan solo una función como en los casos de lavadoras electrónicas, despachadoras de café, aspiradores, cortadores de papel, etc. Mecatrónica es un concepto de la industria japonesa de 1969, y proviene de dos palabras del idioma Ingles: **mecha**, que se refiere a un sistema mecánico y **tronics** que denota la parte electrónica, es decir la Mecatrónica integra la mecánica con la electrónica para realizar una tarea específica. En este concepto un robot manipulador es parte de la mecatrónica. Sin embargo un sistema mecatrónico no pertenece a la clase particular de sistemas mecánicos denominados robots manipuladores. (Reyes, 2011)

- Tipos de robots

Actualmente existe una gran variedad de robots con diversas estructuras geométricas que definen su funcionalidad y aplicación.

Tabla 1. Clasificación de los robots.

Clasificación de Robots		
Móviles	Terrestres: ruedas, patas	
	Submarinos, aéreos-espaciales	
Humanoides	Diseño complejo	
Industriales	Brazos Mecánicos	Robots Manipuladores

### 2.1.1. Robots móviles

Estos pueden ser clasificados según el medio en el que se desplacen: terrestres, marinos y aéreos. Los terrestres generalmente se desplazan mediante ruedas o patas; tienen aplicaciones en rastreo y traslado de objetos, evasión de obstáculos entre otras aplicaciones.

### 2.1.2. Robots humanoides

También conocidos como androides, los cuales son maquinas antropomórficas capaces de imitar las funciones básicas del ser humano tales como caminar, hablar, ver, recolectar, limpiar y trasladar objetos. Actualmente el aspecto de los robots es mucho más humano lo que los hace más amigables.

### 2.1.3. Robots industriales

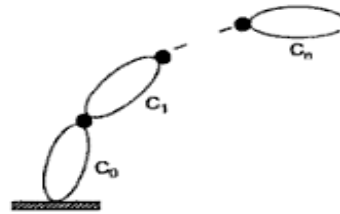
También conocidos como brazos robots o brazos mecánicos, por analogía con el brazo humano, y se componen de la base la cual puede rotar 360° grados alrededor de su eje de giro además de que poseen articulaciones para hombro y codo. En el extremo final del codo tienen una parte mecánica denominada muñeca que es la que determina la función a realizar.

Las principales aplicaciones que tienen los robots industriales son procesos de pintado de carrocería automotrices, accesorios, cubetas, tinas, cajas soldadura de punto y por arco en carrocerías automotrices, puertas y diversas piezas industriales; traslado de herramienta, estibado y empaquetado de materiales, etc. (Reyes, 2011).

## 2.2. ESTRUCTURA DE ROBOTS INDUSTRIALES

Los robots manipuladores son esencialmente, brazos articulados. De forma más precisa, un manipulador industrial convencional es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de eslabones o elementos de la cadena interrelacionados mediante articulaciones o pares cinemáticas. Las articulaciones permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones (Baturone, 2001).

Figura 7. Cadena Cinemática Abierta



Fuente: Reyes, Fernando. Robótica, Control de manipuladores. Primera edición. México: Alfaomega, 2011. p. 16.

### 2.2.1. Elementos y articulaciones de un manipulador

Los elementos o eslabones son los cuerpos rígidos que conforman un manipulador, mientras que las articulaciones son las partes que permiten el movimiento de los elementos que lo conforman (L.Sciavicco, 2001).

- **Rotación:** El elemento asociado a la articulación rota con respecto al anterior a lo largo de un eje que atraviesa a ambos elementos. Se denota con la letra R.
- **Prismáticas:** Son aquellas en las que un elemento se desplaza con respecto al precedente a lo largo de un eje. Se denota con la letra P.

Figura 8. Tipos de articulaciones.

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

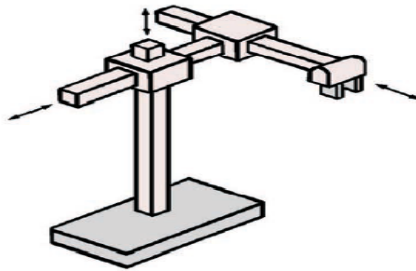
Fuente: Baturone, Aníbal Ollero. Robótica, manipuladores y robots móviles. Primera edición. España: Marcombo, 2001. p. 31.

### 2.2.2. Configuraciones de manipuladores

Aunque en principio un manipulador es un dispositivo de propósito general, en la práctica los manipuladores son usualmente diseñados con al menos una clase extensa de aplicaciones en mente, como soldadura, manipulación de materiales, y ensambles.

- **Cartesiano:** de configuración PPP (ejes prismáticos). Posee tres ejes perpendiculares y el movimiento lineal se realiza a lo largo de dichos ejes. Este tipo de manipuladores presenta la desventaja de necesitar un espacio muy grande para trabajar y un gran porcentaje de este espacio no está incluido dentro de su volumen de trabajo, es decir, no es posible acceder a todo este espacio con el efector final del robot. El algoritmo de control son más simples.

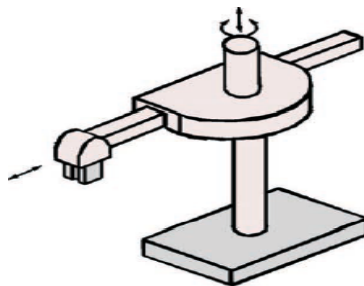
Figura 9. Robot cartesiano.



Fuente: Reyes, Fernando. Robótica, Control de manipuladores. Primera edición. México: Alfaomega, 2011. p. 15.

- **Cilíndrico:** De configuración RPP (Primer eje de revolución, segundo y tercer eje prismáticos). Consisten de dos ejes lineales que se deslizan ortogonalmente entre si y están montados sobre una base rotatoria.

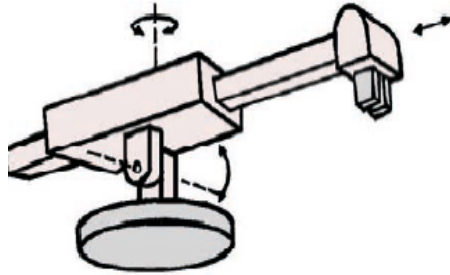
Figura 10. Robot cilíndrico.



Fuente: Reyes, Fernando. Robótica, Control de manipuladores. Primera edición. México: Alfaomega, 2011. p. 15.

- **Polar o Esférico:** este tipo de robot manipulador es de configuración RRP (Primer y segundo eje de revolución y el tercer eje prismático). El alcance de un punto se logra mediante un brazo telescópico que se extiende y también se retrae a lo largo de su eje, este se encuentra montado sobre una base giratoria con dos ejes rotacionales que son independientes.

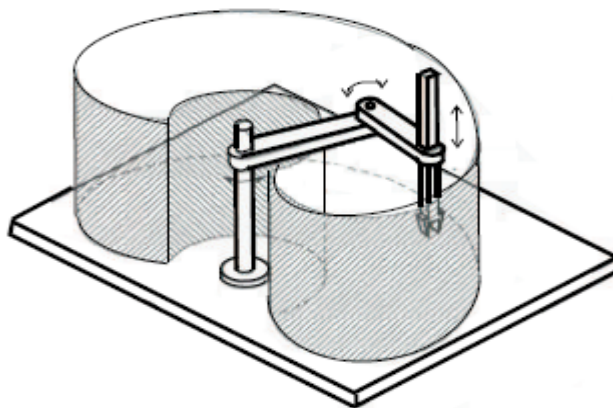
Figura 11. Robot polar.



Fuente: Reyes, Fernando. Robótica, Control de manipuladores. Primera edición. México: Alfaomega, 2011. p. 15.

- **Robot SCARA:** es una versión especial del brazo articulado, o más bien mejor aun, ya que es una combinación de las configuraciones revolución y cilíndricas (RRP). Sus articulaciones rotativas de hombro y de codo giran alrededor de ejes verticales, permitiendo que se efectúen giros en un plano horizontal.

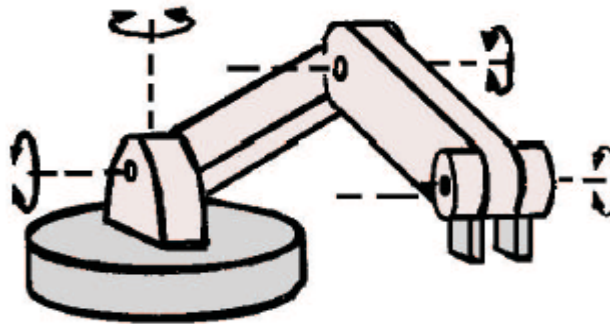
Figura 12. Robot SCARA.



Fuente: Reyes, Fernando. Robótica, Control de manipuladores. Primera edición. México: Alfaomega, 2011. p. 15.

- **Robot Antropomórfico:** (Con articulaciones rotatorias RRR). Es el que más se asemeja al brazo humano por ello se denomina antropomórfico. Aunque presenta algunos vacíos en su volumen de trabajo, son los que tienen mejores características de acceso de efector final a la mayoría de los puntos comprendidos en su universo de trabajo. Al ser todas sus articulaciones rotatorias presentan mayores inconvenientes en la compensación de cargas e inercias de rotación (L.Sciavicco, 2001).

Figura 13. Brazo Antropomórfico.



Fuente: Reyes, Fernando. Robótica, Control de manipuladores. Primera edición. México: Alfaomega, 2011. p. 15.

### 2.3. SERVOMOTORES

Un servomotor es un tipo especial de motor que usa un encoder para determinar la posición de su eje de salida (Warren Jhon David, 2011). Técnicamente, todo tipo de motor que tenga en su interior control retroalimentado puede ser categorizado como servomotor, siendo este un tipo particular de servomecanismo.

Esto significa que se le da una instrucción al motor, por ejemplo una velocidad, una aceleración o una posición que se desee obtener. Los servomotores son excelentes elecciones para posicionar sistemas y aplicaciones que se necesite de gran precisión (Dale, 2011).

Existen dos tipos de servomotores teniendo en cuenta el tipo de corriente que manejan sus motores internos, estos son los servomotores de corriente continua, CC, y los de corriente alterna, AC. De cada uno de los dos tipos hay una gran variedad de modelos dependiendo de su tamaño y de su par motor.

### 2.3.1. Servomotores de CC

Este tipo de servomotores posee un motor de corriente directa en su interior, tiene dos bobinas separadas de las cuales una está en el estator y la otra en el rotor o armadura. La mayoría de veces se diseñan de tal forma que el devanado del estator esta energizado independiente del devanado de la armadura, y esta a su vez es energizada por escobillas. El gran bobinado que se encuentra en la armadura logra un torque suave a la salida del motor.

El devanado del estator es de bajo poder y es generalmente usado para crear un campo magnético constante. Cuando se energiza la armadura, se crea una gran corriente, que desarrolla una fuerza electromotriz grande que es la que genera el torque necesario para acelerar la armadura. Como la corriente generada inicialmente por la armadura es muy grande, se implementa un limitador de corriente al interior de la unidad de potencia del servomotor (Riazollah, 2010).

**Figura 14. Servomotor de corriente continua RC.**



Fuente: Autores.

Entonces, su forma constructiva está adaptada a obtener un comportamiento dinámico rápido y estable y un par de arranque importante (Ballcels Joseph, 1997). Esta es la configuración estándar para los servomotores RC que son los típicos servomotores de CC.

Los servomotores de corriente continua se dividen a su vez por sus tamaños, estando los servomotores de corriente continua pequeños, llamados servomotores de hobby, radio controlados o servos a control remoto (figura 0), que son ampliamente utilizados para micro robots, robots de servicio, pequeños aviones radio controlados, pequeños botes radio controlados. En fin servos en donde no se requiera de alta potencia, por lo que son diseñados para tener baja inercia en su estructura y lograr así una rápida respuesta (Riazollah, 2010).

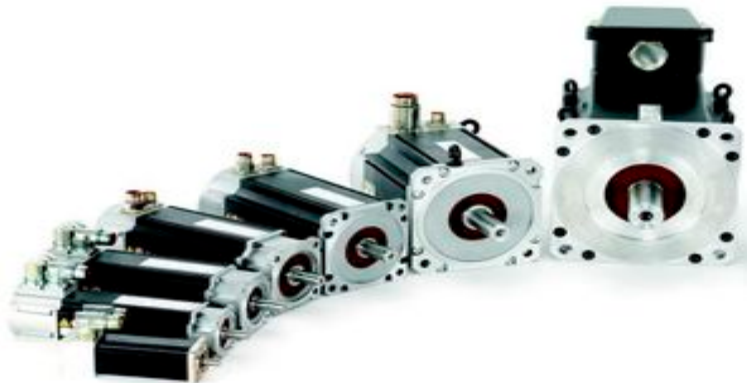


La otra categoría abarca a los servomotores de corriente continua de gran tamaño, conocidos como servomotores de corriente continua industriales, y se usan principalmente para maquinaria industrial que requiere de potentes y precisos motores para realizar sus movimientos.

### 2.3.2. Servomotores de CA

Técnicamente la mayor diferencia que presentan es el cambio en el motor interno del servomotor. Poseen un motor de corriente alterna en su interior, al igual que el servomotor de CC, posee un encoder conectado al mismo. El encoder es el que controla las revoluciones exactas que da el motor traspasando los datos al control interno para que tenga el registro exacto del mismo. El mismo encoder es el encargado de frenar en el punto exacto que ordena el motor al control (Francisco, 2007).

**Figura 15. Servomotores de corriente alterna.**



Fuente: Direct Industry. Products. En: Servomotores AC. [consultado 8 sept. 2012]. Disponible en: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-m2/servomotores-electricos-ac-brushless-7177-2319633.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-m2/servomotores-electricos-ac-brushless-7177-2319633.jpg)

Este tipo de motores se utilizan especialmente en aplicaciones que soliciten de un alto par motor sin perder la precisión, por ejemplo para levantar grandes cargas en donde se necesite precisión, que son operaciones que se solicitan con más frecuencia en la maquinaria industrial pesada.

## 2.4. EFECTOR FINAL

Los elementos terminales, también llamados efectores finales son los encargados de interaccionar directamente con el entorno del robot. Pueden ser tanto elementos de aprehensión como herramientas.

Se pueden clasificar los elementos terminales atendiendo a si se trata de un elemento de sujeción o de una herramienta. Los elementos de sujeción se pueden clasificar según el sistema de sujeción empleado, como se muestra en la tabla 1. Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener los objetos y se suelen denominar pinzas. Entre ellas se distinguen las que utilizan dispositivos de agarre mecánico (figura 1), y las que utilizan algún otro dispositivo (ventosas, pinzas magnéticas, adhesivas, ganchos, etc.) (BARRIENTOS, 2007).

**Figura 16. Pinza robótica en aluminio accionada por servomotores RC de corriente continua**



Fuente: Tienda de robótica. Actuadores mecánicos En: Articulaciones.[Consultado 11 sept. 2012]. Disponible en: <http://www.electronicaestudio.com/i/f/SP-ROB10332.jpg>

**Tabla 2. Sistemas de sujeción para robots**

Tipos de sujeción.	Accionamiento	Uso.
Pinza de presión: 1. Desplazamiento angular. 2. Desplazamiento lineal.	Neumático o eléctrico.	Transporte y manipulación de piezas sobre las que no importe presionar.
Pinza de enganche.	Neumático o eléctrico.	Piezas de grandes dimensiones o sobre las que no se puede ejercer presión.
Ventosas de vacío	Neumático	Cuerpos con superficie lisa poco porosa (cristal, plástico).
Electroimán	Eléctrico	Piezas ferro magnéticas.

Fuente: BARRIENTOS, Antonio. et al.. Fundamentos de Robótica. Segunda Edición. México: Mc Graw Hill, 2007. p. 23.

Para la elección o diseño de una pinza se deben de tener en cuenta los factores relacionados con la manipulación de un objeto, que serian factores tales como el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza necesaria a ejercer sobre el mismo para mantenerlo sujetado.

Entre los factores relacionados con las propias propiedades de la pinza se encuentran su peso (que afectara a la inercia total del robot), el equipo de accionamiento y la capacidad de control.

El accionamiento neumático es el más utilizado por ofrecer mayores ventajas en simplicidad, precio y fiabilidad, aunque presenta dificultades en el control de posiciones intermedias. En ocasiones se utilizan accionamientos de tipo eléctrico.

Actualmente la utilización de pinzas con accionamiento eléctrico ha incrementado, gracias a la disminución en el precio de actuadores eléctricos, además de ofrecer una facilidad de control mucho mayor a la ofrecida por los actuadores neumáticos, y en cuestiones de peso, cada vez son más livianos y robustos.

Sin embargo, en ocasiones es necesaria la utilización de elementos aprehensores específicos para una aplicación. Teniendo como base elementos utilizados en la industria se suelen desarrollar elementos terminales validos para una aplicación en concreto.

En muchas aplicaciones el robot ha de realizar operaciones que no constituyen en manipular objetos, sino que implican el uso de una herramienta. En la tabla 2 se muestran las herramientas que son más usadas como efector final del robot. Normalmente, la herramienta está fijada rígidamente al extremo (figura 2) del robot aunque a veces se dota al robot de la capacidad de cambiar de herramientas durante la ejecución de una tarea (BARRIENTOS, 2007).

**Tabla 3. Herramientas terminales para robot**

Tipo de herramienta.	Comentarios.
Pinza soldadura por puntos	Dos electrodos que se cierran sobre la pieza a soldar.
Soplete soldadura por arco	Aportan el flujo de electrodo que se funde.
Cucharon por colada	Para trabajos de fundición.
Atornillador	Suelen incluir la alimentación de tornillos.
Fresa-lijas	Para perfilar, eliminar rebabas, pulir ,etc.
Pistola de pintura	Por pulverización de la pintura.
Cañón láser	Para corte de materiales, soldadura o inspección.
Cañón de agua a presión	Para corte de materiales.

Fuente: BARRIENTOS, Antonio. et al. Fundamentos de Robótica. Segunda Edición. México: Mc Graw Hill, 2007. p. 23.

**Figura 17. Cabezal cañón láser para brazo robótico dedicado al corte de material**



Fuente: España, Technology for life. Especiales. En: Ese increíble haz de luz. [Consultado 12 sept. 2012].  
Disponible en: [http://www.spaintechnology.com/FicherosEstaticos/TECNOLOGIAv2/2011-04-06-laser\\_int2.jpg](http://www.spaintechnology.com/FicherosEstaticos/TECNOLOGIAv2/2011-04-06-laser_int2.jpg)

## 2.5. FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Las fuentes de alimentación son usadas en la mayoría de los equipos eléctricos, sus aplicaciones pueden ir desde aplicaciones de consumo pequeñas, hasta aplicaciones en utilidades industriales, desde miliwatts a megawatts, desde productos portables hasta herramientas para la comunicación satelital. Debido a las características de la tensión de salida, se pueden dividir en fuentes de tensión directa o fuentes de tensión alterna.

### 2.5.1. Fuentes de corriente directa

Las fuentes de tensión continuas se les denominan generalmente como fuentes de alimentación. Estas convierten un voltaje de entrada de la red, que es una tensión alterna, en una tensión constante o en una corriente constante.

Las fuentes que suministran una tensión constante se les llama fuentes de alimentación constante, y las fuentes que suministran una corriente constante se les denominan fuentes de corriente constante (Dzieia Werner, 1991). Se muestra en la figura 2.1 una fuente de corriente continua variable.

**Figura 18. Fuente de alimentación de corriente continua ajustable**



Fuente: Autores.

Por definición una fuente de alimentación es un dispositivo que convierte una tensión eléctrica de corriente alterna de entrada a una tensión estacionaria de corriente directa de salida o en varias formas de tensión de salida.

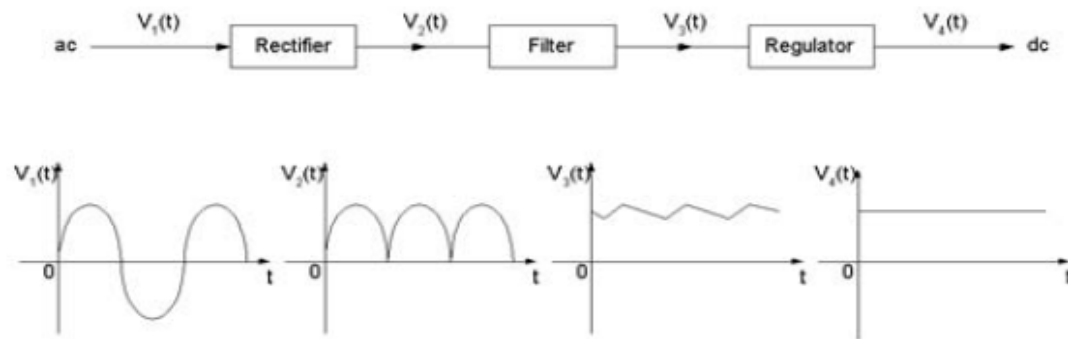
Primero la tensión e CA entra directamente a un transformador, que es el encargado de reducir la tensión de la red a una tensión de trabajo, generalmente más baja, para poder ser maneja. La tensión en CA luego es rectificada para producir una tensión titilante en CC, y después filtrada mediante el uso de capacitores para producir una tensión en CC suave. Finalmente la tensión de salida es regulada para producir una salida constante de la que se ha eliminado las variaciones de la tensión en CA y tendremos como resultado una tensión en CC con la que podremos trabajar y alimentar a nuestros dispositivos eléctricos y electrónicos (Muhammad, 2004). Este proceso se describe gráficamente en la figura 18.

Esta tensión proporcionada por la fuente de alimentación, proporcionara una tensión que en todo momento posee el mismo valor y cuya polaridad en los bornes no varía. Como fuentes de alimentación continuas principales para el funcionamiento de circuitos electrónicos están a disposición los elementos primarios, los elementos secundarios y las fuentes de tensión continua electrónica.

En el caso de los elementos secundarios, el proceso electroquímico se puede desarrollar en los dos sentidos. Cada elemento secundario se tiene que cargar primero mediante otra fuente de tensión continua. Durante la carga se transforma la energía eléctrica en energía química y se almacena.

En estas fuentes las tensiones de salida a menudo se pueden conmutar y ajustar dentro de ciertas gamas y sin necesidad de un gasto técnico elevado, se pueden alcanzar valores y características que son mucho más convenientes que los de las fuentes de tensión continua electroquímicas (Dzieia Werner, 1991).

**Figura 19. Diagrama de bloques de una fuente de alimentación CC.**

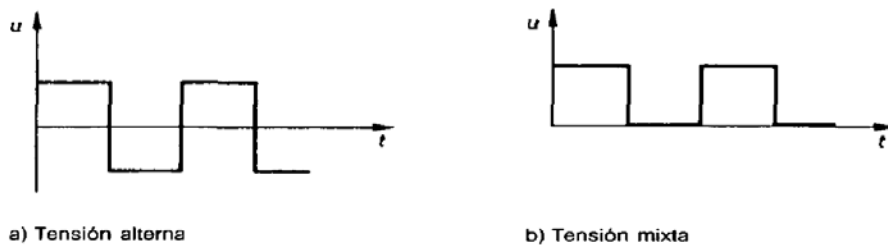


Fuente: Muhammad, Rashid. Power Electronics Handbook. Primera edición. U.S.A: Academic Press, 2004. p. 55.

### 2.5.2. Fuentes de tensión alterna rectangular

Las tensiones alternas de onda rectangular tienen una gran importancia en la electrónica, ya que sirven como señales de reloj o de control. Estas pueden ser una tensión rectangular alterna o una tensión rectangular alterna mixta como se muestra en la figura 20.

**Figura 20. Tipos de onda rectangular**



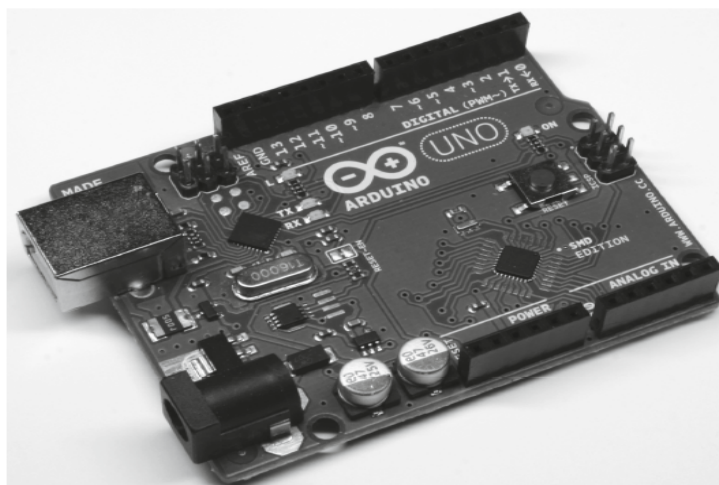
Fuente: Muhammad, Rashid. Electronica de potencia. Segunda edición. U.S.A: Academic Press, 2004. p. 55.

Este tipo de señales son muy importantes en el control de nuestro prototipo, ya que la información de la posición a la que queremos que se posicione un servomotor, tiene este tipo de onda. Siendo codificada la posición en determinado ancho de pulso de la onda.

## 2.6. Placa microcontroladora Arduino

Arduino es una familia de microcontroladores (pequeñas computadoras) y un software para la creación de programas, llamados sketches, que puede interactuar con el mundo físico. Con Arduino se pueden pensar y responderá al tacto, sonido, posición, calor y luz. Este tipo de tecnología, es conocido como computación física, es usado en gran variedad de cosas desde el iPhone hasta sistemas electrónicos para automóviles (Margolis, 2011).

**Figura 21. Placa microcontroladora Arduino UNO**



Fuente: Evans, Brian. Arduino Programming. Primera edición. U.S.A: Apress, 2011. p. 20.

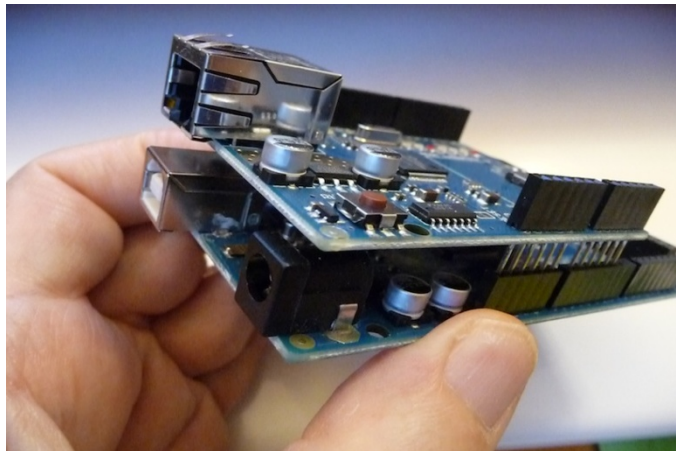
Es una plataforma hardware flexible diseñada para artistas, diseñadores, pensadores, y creadores. La pequeña placa de circuitos azul tomo su nombre de la jerga italiana, en la que significa gran amigo, y en muy poco tiempo motivo a la nueva generación de aficionados y profesionales a realizar proyectos en cualquier lugar desde el campus de una universidad hasta lugares remotos como las arenas de los desiertos. Usualmente la flexibilidad que ofrece la fácil programación de una placa Arduino y la no necesidad de un amplio conocimiento de teoría electrónica, la ha hecho uno de los mejores caminos para empezar en estos dos campos, programación y electrónica.

Centrándonos en el hardware de placa la microcontroladora, esta contiene un microcontrolador embebido dentro le ella, que es el cerebro de la placa y se comporta como una pequeña computadora construida en un chip. Este microcontrolador viene de la compañía ATMEL, y el chip es conocido como AVR, que trabaja con un reloj a 16 MHz y un núcleo de 8-bits. Una de las

características más relevantes de la placa es que su entorno de desarrollo es totalmente libre de ser usado, y puede ser implementado en cualquier sistema operativo que soporte Java, y solo es necesario un cable USB para comenzar a utilizar la placa

La placa Arduino, por si sola, no constituye su gran poder de aplicación e interacción con el mundo físico. El Arduino posee un ecosistema con una gran variedad de herramientas que potencializan la utilización de esta placa. Este ecosistema está constituido por una variedad de hardware y software, que al trabajar en conjunto crean un modulo extremadamente potente. La gran variedad de módulos pueden ser conectados entre sí con la placa microcontrolador, generando así un modulo compacto, ligero y potente.

**Figura 22. Arduino con modulo hardware para comunicación Ethernet**



Fuente: jlectronique.org. Shield Ethernet sur Internet. En: Le shield Arduino Ethernet. [consultado 21 sept. 2012]. Disponible en: [http://jlectronique.org/images/Arduino/ET\\_Shield\\_sur\\_MEGA.JPG](http://jlectronique.org/images/Arduino/ET_Shield_sur_MEGA.JPG)

La placa Arduino es muy usada para la realización de proyectos con microcontroladores. Pero lo que quizá es un sello distintivo de la placa es su carácter de ser de fuente o código libre, Open-Source, tanto en la parte del hardware como en el software. Esto significa que hay una libertad de acceder gratis a los planos de diseño de las placas, improvisar sobre ellas y distribuir sus actualizaciones con la comunidad, por lo que cualquiera es libre de utilizar la placa para hacerle actualizaciones. En cuanto al software, también es gratuito, por lo que no hay que tener licencias para poder reproducir nuestros trabajos. Esto responde a la filosofía de la libre colaboración, arquitectura, y diseño como método de mejoramiento de la propia placa y quizá este es el aspecto más importante ya



que gracias a la colaboración en el desarrollo ah hecho del Arduino la placa microcontroladoras mas popular y usada en momento (Evans, 2011).

### 2.6.1. Programación en IDE Arduino

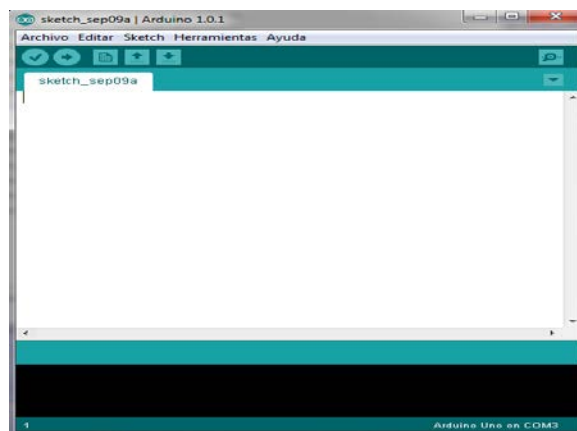
Para poder programar nuestro Arduino, es necesario un software que sea capaz de transmitir nuestro código hacia la placa e indicando que operaciones debe seguir según las instrucciones que nosotros le proporcionemos. Este software es llamado Arduino, al igual que la placa, y es un ambiente de desarrollo integrado (IDE) por sus siglas en ingles.

Los programas realizados con el software son llamados sketches, y en ellos se escribirán los programas que deseemos ejecutar o poner en marcha con la placa. El IDE permite escribir y editar código y luego convertir ese código en instrucciones que la placa Arduino pueda entender. El proceso de transferencia de esas instrucciones a la placa es llamado descarga (Margolis, 2011).

En síntesis, para hablar con el Arduino y que este nos escuche se necesita dicho software. Los sketches son combinados con librerías propias del IDE para generar las instrucciones y asegurarse de que el Arduino entienda dichas instrucciones.

Trabajar con Arduino es prácticamente trabajar con dos computadores a la vez: la placa microcontroladora Arduino y el PC. En el mundo del desarrollo de herramientas embebidas, nuestro PC es el computador patrón o host, y el Arduino es computador esclavo o nuestro blanco de tiro o target. El sketch es normalmente llamado escenario patrón, ya que en él se ordena y luego compilan las instrucciones que ejecutara el Arduino.

**Figura 23. Entorno integrado de desarrollo IDE, para Arduino.**



Fuente: Autores.

El software que nos proporciona Arduino está diseñado para trabajar en la mayoría de los sistemas operativos, incluyendo Microsoft Windows, Apple Mac OS, y la mayoría de las variantes de Linux. El software es necesitado en ambos computadores, tanto en la PC como en la placa, siendo distinto el tipo de software para cada uno, ya que ambos sistemas difieren en su arquitectura interna y por ende se necesitan estos software para que se puedan entender la placa con el PC (Dale, 2011).

El microcontrolador de la placa se programa usando el “Arduino Programing Lenguaje” (basado en Wiring) y el IDE de Arduino (basado en Processing).

Los proyectos pueden ser autónomos o se puede comunicar con software en ejecución en un ordenador (por ejemplo con Flash, Processing, MaxMSP, etc.).

Este entorno de programación es fácil de usar para principiantes, pero suficientemente flexible para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también (Herrador, 2009).

#### 2.6.2. Estructura del lenguaje Arduino

El IDE de Arduino basado en el entorno de programación llamado Processing, siendo la interfaz de Arduino muy similar a la de dicho lenguaje. La estructura básica del lenguaje Arduino se divide en dos sentencias principales llamadas funciones principales, en las que se encerraran bloques de instrucciones.

Estas dos funciones son requeridas para que el programa funcione, y son:

- void setup ()  
    {Instrucciones;}
- void loop()  
    {Instrucciones;}
- Setup()

Esta función deberá contener la declaración de cualquier variable el comienzo del programa. Es la primera función que se ejecuta en el programa, es ejecutada una sola vez y es usada para asignar el **pinMode** o inicializar las comunicaciones serie.

```
void setup ()  
  
{ pinMode ( pin, OUTPUT); // ajusta pin como salida }
```

- Loop()

La función **loop** se ejecuta justo después d la función **setup**, y en ella se aloja el código que se va a ejecutar continuamente, como lectura de entradas, activando salidas, etc. Esta función es el núcleo de todos los programas Arduino y es la que hace la mayoría del trabajo (Herrador, 2009).

```
void loop()  
  
{  
  
digitalWrite (pin, HIGH); // Activa ´pin´.  
  
delay (1000);           // Espera un Segundo  
  
digitalWrite (pin, LOW); // Desactiva ´pin´.  
  
delay (1000);           // Espera un Segundo  
  
}
```

Las características que conforman el IDE de Arduino, como lo son las funciones, las variables que maneja el IDE, la sintaxis, los comentarios, los tipos de datos que maneja, los operadores aritméticos y lógicos que soporta, las constantes, y el control de flujo que son explicadas se basan en el lenguaje Processing. Cabe mencionar que existen gran cantidad de libros especialmente diseñados para la placa Arduino, donde se exponen aspectos como la programación y la variedad de aplicaciones que posee dicha placa microcontroladora.

## 2.7. MANEJO DE SERVOMOTORES RC

Los servomotores son motores que tiene la capacidad de ser controlados en posición. Estos se dividen dependiendo su tensión de alimentación en servomotores de tensión continua y servomotores de tensión alterna. Entre los

servomotores de corriente continua se encuentran los utilizados para aplicaciones industriales y los que se utilizan para aplicaciones no tan robustas. Estos últimos son conocidos como servos RC o hobby servos (véase la figura 0), ya que son para aplicaciones que no necesitan de motores potentes.

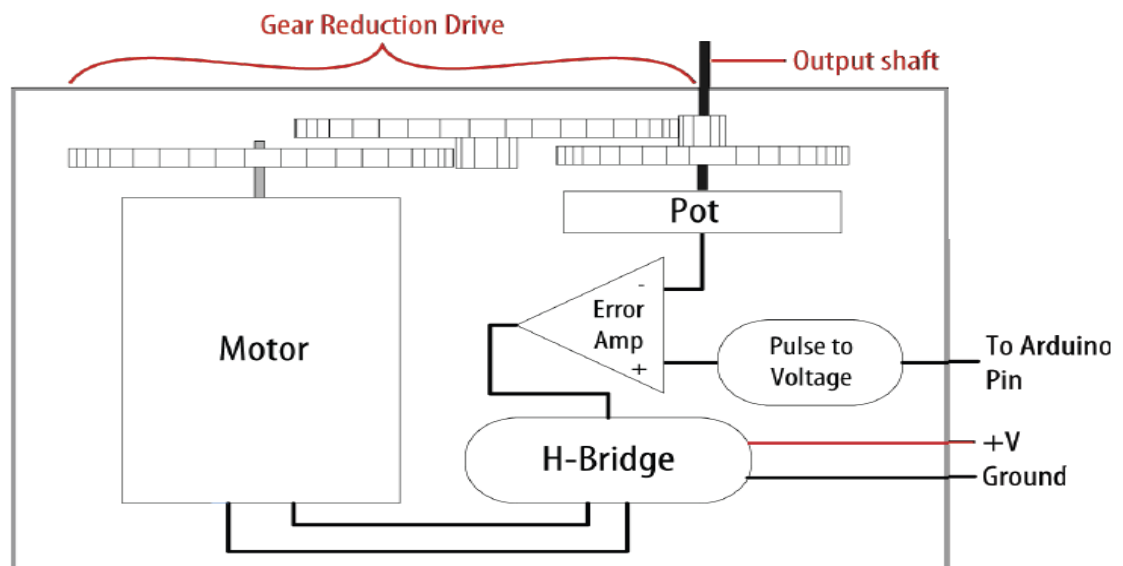
Los servos RC son utilizados ampliamente en aplicaciones de robótica y animatrónica, ya que estos tienen integrado electrónica, caja de transmisión, y control posicional que permite un control bastante preciso (Evans, 2011).

### 2.7.1. Funcionamiento de los servos RC

Estos servomotores permiten un preciso control del movimiento cuando se utilizan como posicionadores y un gran torque a bajas revoluciones cuando se utiliza como motor de arrastre o rotación continua. Son ideales para rotar cosas desde 0 a 180 grados. Además son fáciles de conectar y de controlar, ya que el propio controlador del motor se encuentra construido dentro del servo.

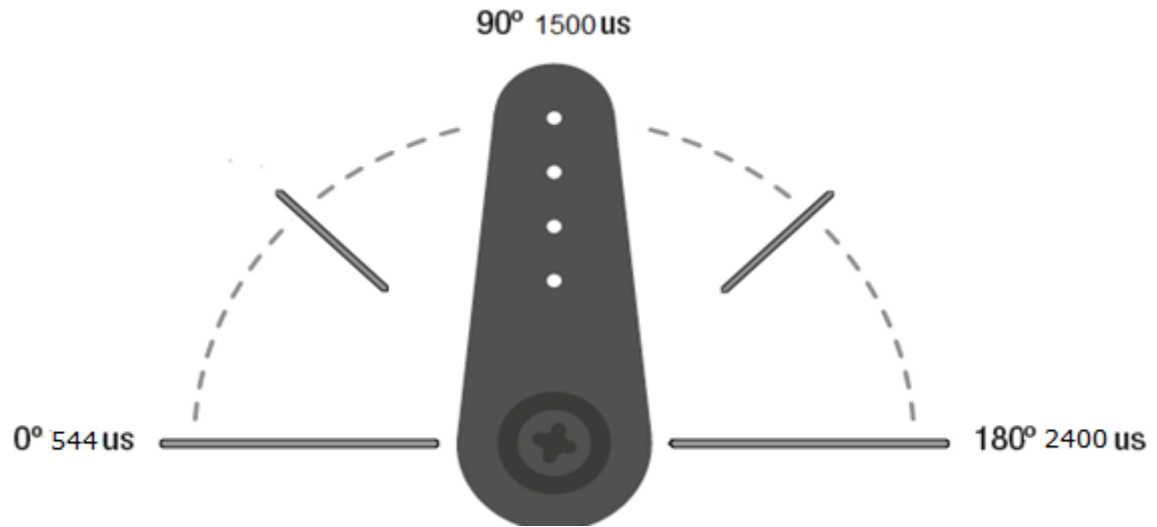
Contiene dentro un pequeño motor de CC acoplado a una transmisión hecha por engranajes y finalmente el eje de salida. El eje de salida es un potenciómetro que controla el brazo del servo y es el encargado de proveer la posición del brazo para ser procesada por el circuito de control interno. Este esquema de funcionamiento es mostrado en la figura 23.

Figura 24. Esquema de funcionamiento interno de un servo RC



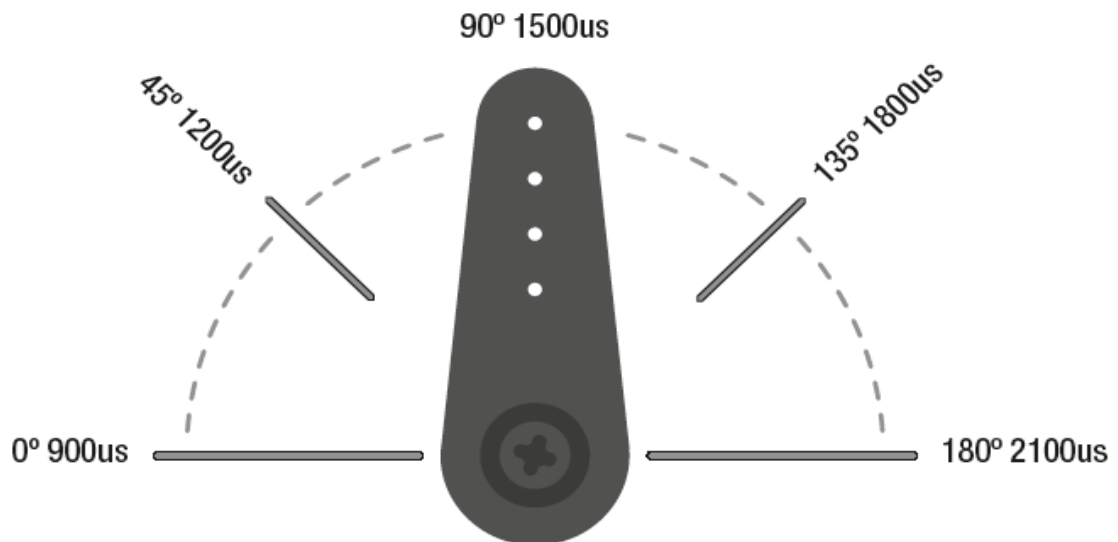
Generalmente, para controlar un servo RC, se envía una señal cuadrada que varía en su ancho de pulso en un tiempo determinado. Dependiendo del ancho de pulso, el servo se posicionara en un determinado ángulo, y cada 20 milisegundos tiene que refrescarse el ancho de pulso. Los anchos de pulso para cada servo difieren dependiendo de la marca que lo fabrico, aunque los tiempos más estandarizados son mostrados en la figura 24 y 25.

**Figura 25. Tiempos de control de posición para servos estándar TowerPro, entre otros**



Fuente: Autores.

**Figura 26. Tiempos de control de posición para servos RC Futaba, Airtronic, Traxxas entre otros**



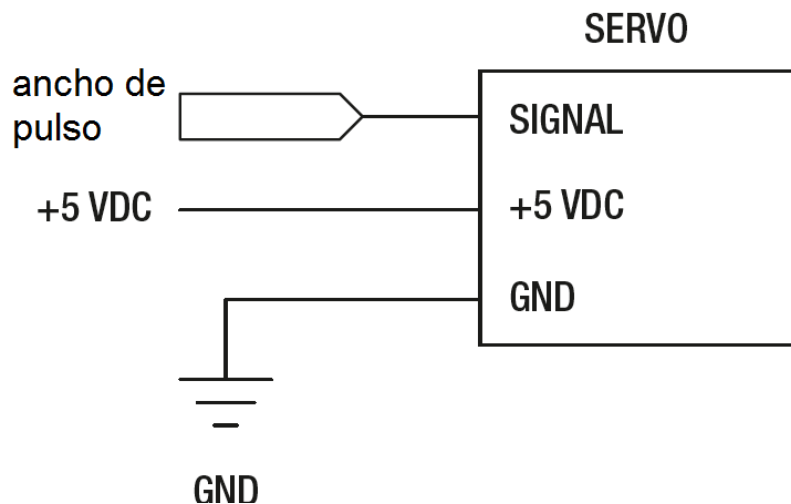
Fuente: Evans, Brian. Arduino Programming. Primera edición. U.S.A: Apress, 2011. p.110.

Los servos RC poseen tres cables: señal, poder y tierra. El cable amarillo, blanco o a veces el naranja es para la señal de control del servo y debe ser conectado a el generador de ancho de pulso que se utilice. En cable de color rojo es el de poder, y se conecta a la fuente de alimentación, teniendo en cuenta las especificaciones eléctricas del servo, se le dará un voltaje de alimentación al que este pueda trabajar.

El cable negro o café es para ser conectado a la tierra de la fuente de alimentación.

Los servomotores generalmente trabajan con tensiones de +4.8 voltios a +6 voltios CC, y aunque ellos no consuman mucha corriente, si se conectan varios a la vez se debe tener en cuenta que la fuente de alimentación soporte la cantidad de corriente que necesitaran los servomotores. En la figura 26 se muestra la fácil conexión de un servomotor (Evans, 2011).

Figura 27. Esquema de conexión de un servomotor RC



Fuente: Autores.

## 2.8. PROGRAMACIÓN EN EL LENGUAJE PROCESSING

Processing es un lenguaje de computación originalmente concebido por Ben Fry y Casey Reas en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en el año 2001. Es un lenguaje simple de usar, en comparación con lenguajes como C, y diseñado especialmente para diseñadores, artistas e ingenieros que desean experimentar sin necesidad de tener un amplio conocimiento de programación. Además, es un software libre, es decir, no requiere de licencias para su uso y es gratis. Este

lenguaje posee su propio editor integrado que tipifica, compila, y ejecuta el código. Está basado en Java, siendo este la base para generar los comandos y scripts (Terzidis, 2009).

Processing es un lenguaje especialmente creado para ejecutar programas que involucren dibujos, animaciones y graficas interactiva. Es entonces un lenguaje especial para diseñadores gráficos.

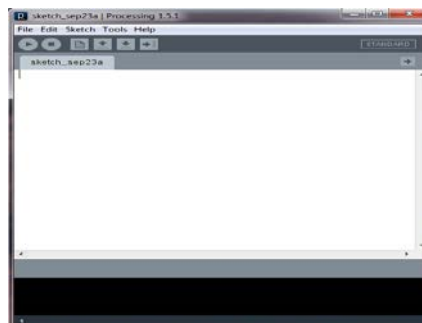
Este lenguaje ha sido creado para hacer de la programación grafica interactiva mucho más fácil, teniendo en cuenta que, es demasiado difícil realizar este tipo de acciones en lenguajes de programación como C++ y Java.

Algunas de las características del lenguaje Processing son:

- Multiplataforma: Cualquier programa corre en Windows, MacOS o Linux.
- Seguro: Permite un gran nivel de criptografía para el intercambio de información privada.
- Centrado en internet: Las aplicaciones pueden ser construidas a base de protocolos de internet.
- Dinámico: Utiliza alojamiento de memoria dinámica.
- Internacional: Soporta caracteres internacionales.
- Rendimiento: Provee un gran rendimiento con compiladores en tiempo de ejecución y optimizadores.
- Simplicidad: Processing es mucho más fácil de aprender que otros lenguajes como C, C++ y hasta el mismo Java.

Processing utiliza elementos comunes entre los lenguajes de programación como lo son constantes, variables, métodos, clases, librerías, y operaciones básicas de aritmética y lógica.

**Figura 28. Entorno de programación del lenguaje Processing**



Fuente: Autores.

## 2.9. PRO ENGINEER WILDFIRE 5.0

Solución integrada para 3D CAD / CAE / CAM, que ofrece a los usuarios con nuevas oportunidades para superar las barreras tradicionales en el proceso de diseño, haciendo que el proceso de desarrollo aún más rápido, más eficiente e innovador.

Pro / ENGINEER Wildfire - un completo 3D CAD / CAE / CAM para el desarrollo de productos de cualquier complejidad. Gracias a las capacidades de automatización de gran alcance, Pro / ENGINEER Wildfire es una solución reconocida para el diseño 3D, ingeniería, modelado y desarrollo de productos de la competencia comercial. Pro / ENGINEER - no tanto una herramienta para la visualización de soluciones en el momento, pero primero y ante todo, una herramienta para la búsqueda de soluciones de ingeniería. Las amplias capacidades del sistema permiten a los ingenieros para desarrollar productos de acuerdo con las necesidades del cliente, en lugar de las limitaciones del software (Parametric Technology Corporation).

**Figura 29. Ejemplo de diseño en el software CAE Pro Engineer Wildfire 5.0**



Fuente: Parametric Technology Corporation. Products En: Pro Engineer Wildfire 5.0. [Consultado 30 sept. 2012]. Disponible en: <http://img.clasf.mx/2012/03/28/Curso-de-proengineer-wildfire-particular-paso-a-paso-20120328222913.jpg>



### 3. DESARROLLO INGENIERIL

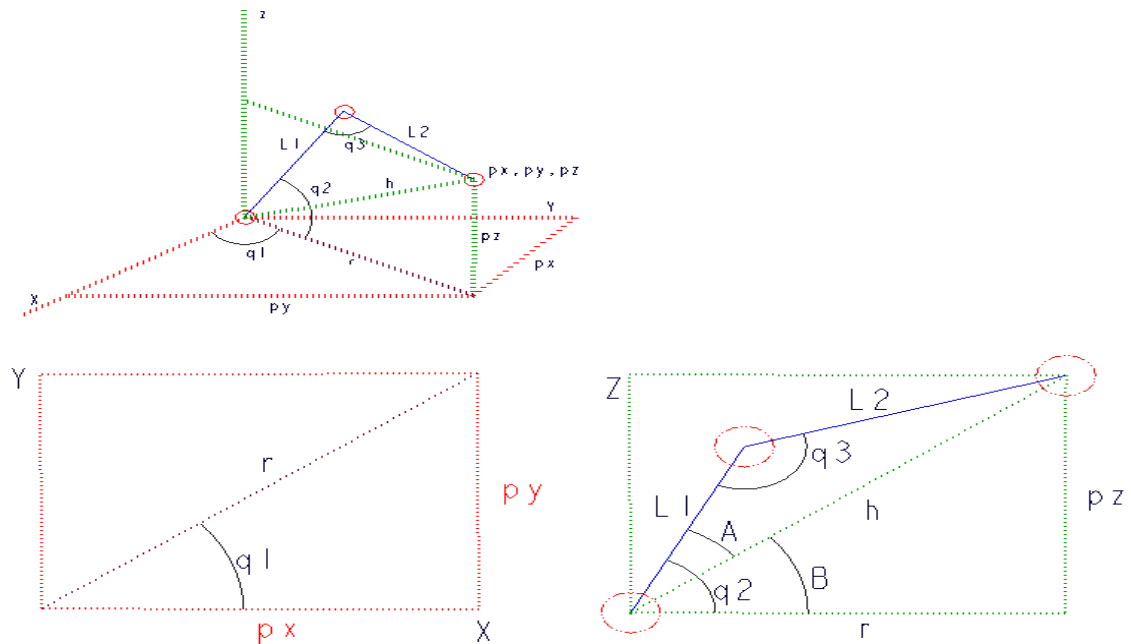
#### 3.1. CINEMÁTICA INVERSA DEL PROTOTIPO

Para la cinemática inversa del prototipo, posicionamiento del extremo efector del prototipo dado un punto en el espacio, se escogió el método geométrico de resolución de posicionamiento. Este método es muy práctico y preciso, no permite ambigüedades en la resolución de la posición, siendo muy utilizado en los brazos robóticos que se mueven en un solo plano, como es nuestro caso.

Se puede ver que nuestro prototipo se mueve en plano  $Z - r$  y básicamente, las diferentes posiciones que pueda adoptar el robot, se pueden descomponer en triángulos, que mediante la resolución de los mismos, se obtendrán las posiciones de cada articulación y logrando así la resolución de la cinemática inversa para nuestro prototipo.

Cabe acotar que, para brazos robóticos que se muevan en más de un plano, el método de resolución de posición por los métodos geométricos, no es un método muy aconsejable de utilizar. Se utiliza entonces, el método de resolución de posición por matrices de transformación homogénea.

**Figura 30. Resolución de la cinemática inversa del prototipo por el método geométrico**



Fuente: Autores.

Mediante la interfaz didáctica del prototipo, se recolectan las coordenadas px, py y pz, que serán las bases para el cálculo de los ángulos necesarios para posicionar al robot en el punto deseado.

Primero calcularemos el ángulo que deberá rotar nuestra base, ángulo q1.

$$q1 = \tan^{-1}\left(\frac{py}{px}\right)$$

Como se puede ver en el grafico, el ángulo q1 se halla fácilmente mediante la resolución del triángulo que tiene como cateto opuesto a py y como cateto adyacente a px.

Luego se procederá a calcular el valor de la resultante r, mediante la fórmula pitagórica para triángulos rectángulos.

$$r = \sqrt{px^2 + py^2}$$

Para este paso ya habremos resuelto lo necesario al triángulo que se formó en el plano X-Y. Pasaremos a resolver los triángulos en el plano Z-r. El triángulo que tiene como cateto opuesto a pz, y como cateto adyacente a r, nos permitirá resolver, mediante la entidad pitagórica para triángulos rectángulos, el valor de h.

$$h^2 = r^2 + pz^2$$

Por medio de la ley del coseno, encontramos el valor de q3.

$$h^2 = L1^2 + L2^2 - 2 * L1 * L2 * \cos(q3)$$

$$q3 = \cos^{-1}\left(\frac{L1^2 + L2^2 - h^2}{2 * L1 * L2}\right)$$

Para este momento, tendremos dos de los tres ángulos necesarios para posicionar nuestro robot en un punto del espacio dado.

Para calcular el ángulo q2, es necesario descomponer el mismo en dos ángulos, A y B. Se descompone este ángulo en dos, ya que los datos obtenidos hasta el momento nos permiten calcular estos ángulos de manera directa. Para el ángulo A, se utilizara nuevamente la ley del coseno, ya que conocemos los dos lados adyacentes al ángulo que se busca, y el ángulo opuesto al mismo.

Entonces tenemos que:

$$A = \cos^{-1} \left( \frac{L1^2 + h^2 - L2^2}{2 * L1 * h} \right)$$

Y, mediante la identidad pitagórica para triángulos rectángulos decimos que para el triángulo que tiene como cateto opuesto a pz, y como cateto adyacente a r, hallaremos al ángulo B.

$$B = \tan^{-1} \left( \frac{pz}{r} \right)$$

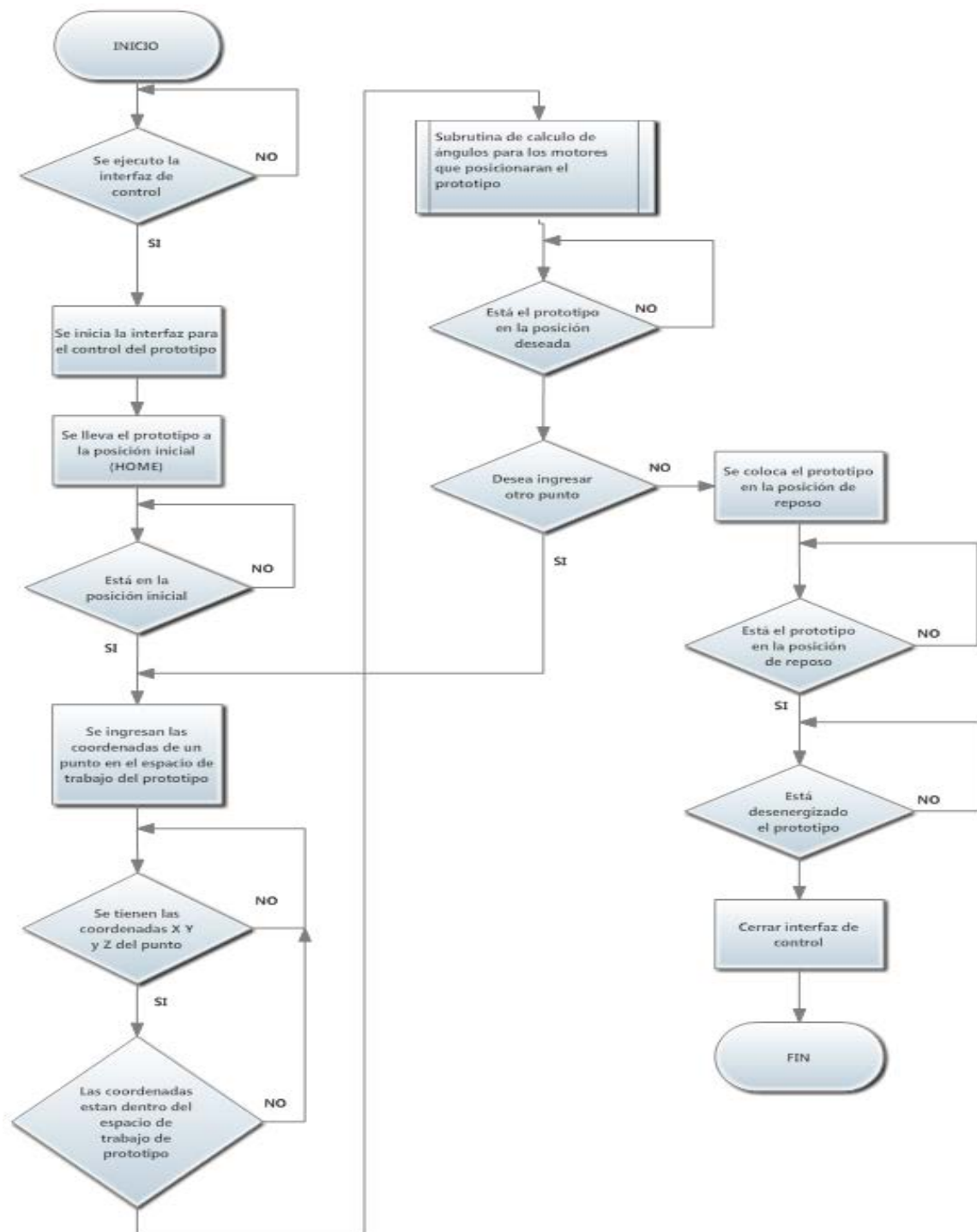
Teniendo los valores de los ángulos A y B, se puede obtener fácilmente el valor de q2, así:

$$q2 = A + B$$

$$q2 = \cos^{-1} \left( \frac{L1^2 + h^2 - L2^2}{2 * L1 * h} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{pz}{r} \right)$$

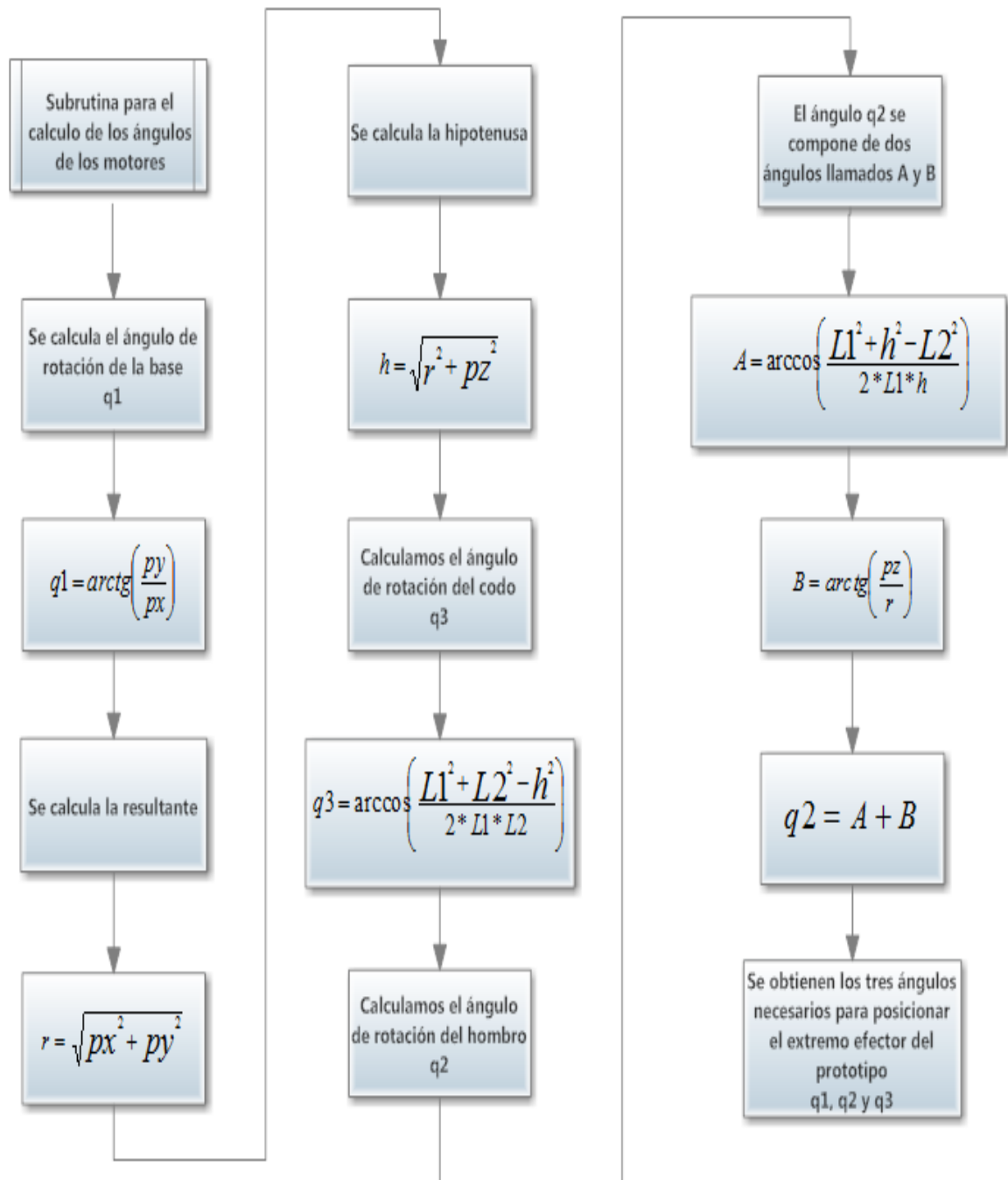
Ya tendremos los tres ángulos necesarios para posicionar nuestro brazo en algún punto del espacio. Estos tres ángulos serán los necesarios para posicionar nuestros motores en un ángulo necesario para la posición del extremo efector del prototipo. El ángulo q1 corresponde a los grados que deberá girar el motor de la base del robot; el ángulo q2 corresponde a los grados que deberá girar el hombro del prototipo; el ángulo q3 corresponde a los grados que deberá girar el motor del codo del robot.

Figura 31. Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo de brazo robótico con 5 grados de libertad



Fuente: Autores.

Figura 32. Diagrama de flujo de la subrutina de cálculo de ángulos para los motores del prototipo



Fuente: Autores.

### 3.2. SISTEMA ELECTRÓNICO Y ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO

El sistema electrónico de la maquina está compuesto por una placa microcontroladora ARDUINO, que será la encargada de manejar los cinco servomotores que lleva el robot. Los servomotores no necesitan electrónica de potencia, ya que trabajan con corriente continua, y necesitan de solo 6 voltios para funcionar.

#### 3.2.1. Microcontroladores y placas microcontroladoras

En el mercado actual de los microcontroladores, existe una gran variedad de los mismos, cada una de ellos con diferentes características. A la hora de elegir uno, se tienen muchas opciones, comenzando por los famosos microcontroladores PIC de MICROCHIP, que son una excelente opción en cuanto a precio, disponibilidad, flexibilidad y potencia de procesamiento.

Otra gran opción son las placas microcontroladoras, que son básicamente microcontroladores embebidos en una placa con los dispositivos tales como cristales de cuarzo, reguladores de voltaje, entrada USB, botón de reinicio, entrada para un adaptador de corriente, entre otros más, para lograr evitar la conexión externa de todos esos dispositivos, y ganando espacio de montaje de circuitos, y ahorrando tiempo en el montaje de los mismos.

Actualmente la placa microcontroladora más famosa es la placa ARDUINO. Esta placa, aparte de ser de hardware libre y de bajo costo, es muy potente y utilizada para la realización de proyectos, tanto para principiantes como para expertos y tanto para hobby como para aplicaciones profesionales.

#### 3.2.2. ARDUINO vs PIC

En la electrónica digital se habla de una forma rápida, eficaz y sorprendente de desarrollar y aprender la misma, llamada Arduino. La placa microcontroladora ARDUINO, se presenta como una solución a los problemas de aprendizaje y de desarrollo de aplicaciones tecnológicas, tan comunes tiempo atrás. Aquí es donde surge las preguntas: ¿Por qué una placa microcontroladora ARDUINO es mejor que un microcontrolador PIC?

La placa ARDUINO, nos brinda una forma diferente para desarrollar aplicaciones, proyectos o para aprender electrónica. La facilidad para crear elementos que interactúen con nuestro entorno y la facilidad de comenzar a utilizar al ARDUINO

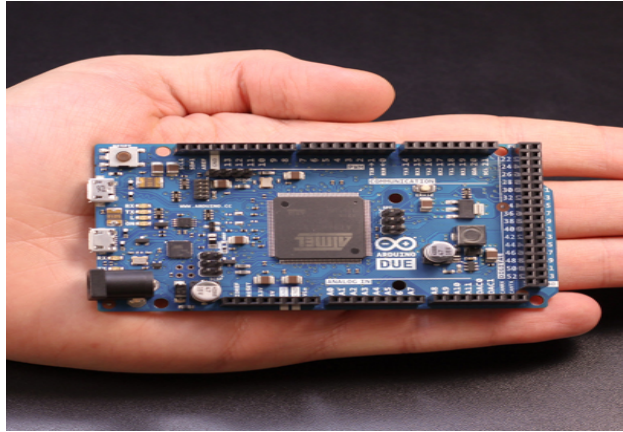
sin conocimientos previos sobre electrónica es una de las principales ventajas de ARDUINO. La placa es de fácil montaje y ocupa un espacio muy reducido.

En cuanto al costo, sin duda es mucho más económico un microcontrolador que una placa microcontroladora, aunque gracias a que el ARDUINO es un hardware libre, se pueden desarrollar placas microcontroladoras con una diferencia mínima en cuanto a costo, con los microcontroladores PIC. Teniendo en cuenta que para el traspaso de un programa al ARDUINO, no se necesita un quemador, como lo necesitan los PIC, de programas. Ya que el ARDUINO tiene su propio quemador incorporado, llamado boot loader, en el aspecto del costo, puede que sea más económico una placa ARDUINO que un PIC.

Además, es mucha la información que se encuentra en la red acerca de los microcontroladores PIC y no tanta sobre ARDUINO, por lo que es un aspecto en el que los PIC están un paso más adelante. Aunque, desde la aparición de Arduino en el mundo de los microcontroladores, la información disponible acerca de la placa ha crecido lo suficiente y se predice que supere la información que hay sobre los PIC, esto debido a que ARDUINO es una plataforma libre, tanto en software, como en hardware, y puede ser compartida gratis toda esa información, sin necesidad de licencias para desarrollar o modificar el hardware o software de la placa.

La ventaja más marcada que tiene el ARDUINO sobre el PIC, es la capacidad de implementar desarrollos que serían muy complejos en PIC, tales como conexión Bluetooth, Ethernet, pantallas táctiles, gran cantidad de sensores, manejo de teclados, manejo de motores, manejo de joysticks, manejo de servomotores, comunicación inalámbrica, localización GPS, entre otros desarrollos que en ARDUINO se puede realizar con una mayor facilidad.

**Figura 33. Placa microcontroladora Arduino Mega 2560**



Fuente: Arduino cc. Products. Página principal. En: Photo by the Arduino Team. [Consultado 6 oct. 2012]. Disponible en: [http://arduino.cc/en/uploads/Main/arduino\\_due\\_in\\_hand.jpg](http://arduino.cc/en/uploads/Main/arduino_due_in_hand.jpg)

**Figura 34. Microcontrolador PIC 16F877**



Fuente: Burgarth. Products. En: Microcontrolador 18f4550. [Consultado 6 oct. 2012]. Disponible en: <http://burgath.com/wp-content/uploads/2012/06/F452.jpg>

### 3.2.3. Elección del dispositivo controlador

La placa microcontroladora ARDUINO posee una biblioteca que le permite controlar servomotores RC (hobbie servos). La biblioteca Servo de ARDUINO admite hasta 12 servomotores RC en la mayoría de las placas Arduino y 48 servomotores en el Arduino Mega.

Entre las diferentes características especiales que posee el Arduino para manejar servomotores, están la de asignar, mediante software, el ancho de pulso en



microsegundos, correspondiente con el ángulo mínimo (0 grados) y máximo (180 grados) del servomotor. Esto es demasiado útil en los casos que se tenga un servomotor en los que la asignación del ancho de pulsos sea diferente a la que está por defecto en el IDE de Arduino (544 microsegundos para el grado cero y 2400 microsegundos para 180 grados).

Otra característica especial, permite posicionar al servomotor solo con escribir el ángulo al que se desea que éste llegue. En muchos microcontroladores hay que realizar complejos algoritmos para el control de la posición final del servomotor. Arduino nos facilita el control de estos motores agregando la función de posicionar nuestro servomotor simplemente con saber el ángulo, sin necesidad de algoritmos y cálculos complejos. Aparte de esto, nos ofrece otra función, aparte del posicionamiento por ángulo, que nos permite posicionar el servomotor por el valor en microsegundos correspondiente al ángulo deseado (0 grados 1000 microsegundos y 180 grados 2000 microsegundos).

Podemos utilizar al propio motor como sensor de posición utilizando el software. El software permite leer y capturar la posición a la que está el servomotor, con lo que podremos saber, en cualquier momento que deseemos, la posición de nuestro servomotor y sin necesidad de adicionar elementos que nos censan la posición del mismo.

Los servomotores RC, como ya es sabido, poseen tres cables, cada uno con un color que designa su conexiónamiento. El Arduino tendrá la función de, únicamente, enviar el pulso de señal deseado hacia el servomotor, con lo que cada servomotor ocupará solamente un pin de nuestra placa microcontroladora (Arduino, 2008).

Como en nuestro prototipo el manejo de los servomotores es crucial, el ARDUINO nos proporciona una mayor facilidad que un PIC en cuanto al manejo de los mismos, además de no ocupar el mismo espacio que, si implementáramos en el control de los servomotores, un PIC.

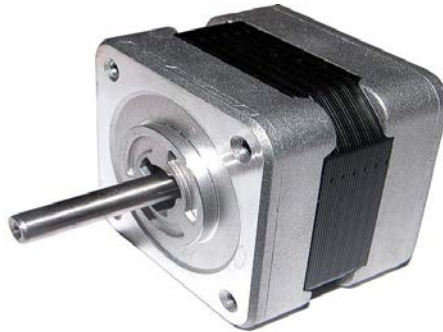
### 3.3. ESTUDIO Y SELECCIÓN DE LOS MOTORES PARA EL PROTOTIPO

Existen varios tipos de motores que son los más utilizados para aplicaciones de robótica. Estos motores pueden ser: servomotores, motor paso a paso o motores de corriente continua.

### 3.3.1. Motores paso a paso.

Los motores paso a paso tienen una increíble precisión y fuerza, pero suelen ser demasiado pesados para algunas aplicaciones. Esto es un punto negativo para este tipo de motores, ya que hay gran cantidad de proyectos en los que el peso es un factor vital en el funcionamiento del mismo. Cabe acotar, que hay servomotores de tamaños pequeños, como los motores paso a paso de las impresoras, pero estos son especialmente utilizados en tareas de precisión y no en actividades en las que se necesite de fuerza para mover o alzar objetos. Tienen una forma de control de posición relativamente fácil, por lo que la fácil implementación de un control para estos motores es un ítem a favor.

**Figura 35. Motor paso a paso**

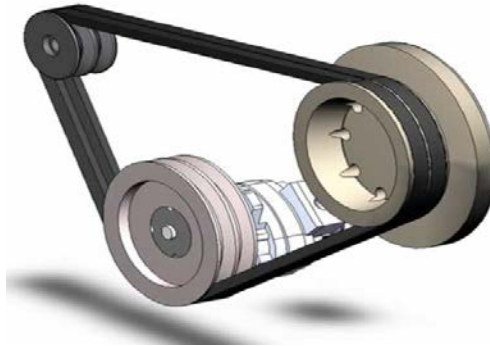


Fuente: Superrobotica. Motores. En: Motor paso a paso unipolar 2 fases tipo 1 S330300. [Consultado 6 oct. 2012]. Disponible en: <http://www.superrobotica.com/Images/S330300big.JPG>

### 3.3.2. Motores de corriente continua.

Los motores de corriente continua, se utilizan en robótica en conjunto con variadas formas de transmisión de movimiento, como trenes de engranajes o sistemas de poleas, para lograr alcanzar una cierta precisión. Estos motores son excelentes para aplicaciones donde se necesite precisión y fuerza. Pero debido a que tienen que ser acompañados por un sistema de transmisión, el peso se incrementa demasiado, y tiende a suceder lo mismo que con los motores paso a paso, siendo ambos renegados a aplicaciones en las que el peso de los motores no importe demasiado. En cuanto al control de estos motores, no es tan fácil como la de los paso a paso, ya que se tiene que hacer toda una serie de cálculos sobre el sistema de transmisión y sobre las relaciones entre los giros del motor, y el giro resultante a la salida, después del sistema de transmisión.

**Figura 36. Sistema de transmisión de movimiento con poleas y motor de corriente directa.**



Fuente: Aprendemos tecnología. Tecnología para todos. En: Sistema simple de transmisión por correas. [Consultado 8 oct. 2012]. Disponible en: <http://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2008/08/correa-auto.jpg>

### 3.3.3. Servomotores

Por último los servomotores, básicamente son motores de corriente continua con un control electrónico interno de posición, lo que los hace extremadamente precisos. Además de esto, en su interior tienen un tren de engranajes a pequeña escala, que le da una increíble fuerza y torque todo en un servomotor pequeño, liviano y potente que es el más utilizado en aplicaciones en las que se necesita de precisión, fuerza y en el que el peso de los motores es un factor muy importante.

**Figura 37. Servomotor de modelismo HITEC**



Fuente: Superrobotica. Motores. En: SERVO MOTOR HITEC HS422 S330165. [Consultado 17 oct. 2012]. Disponible en: <http://www.superrobotica.com/Images/S330165big.JPG>

El control de estos motores es extremadamente fácil, ya que con solo una señal de control, una fuente de alimentación de corriente directa que suministre de cuatro a seis voltios y sin necesidad de dispositivo de potencia, se puede controlar

a la perfección. Una gran ventaja es que muchos de los lenguajes de programación poseen librerías especiales para el control de servomotores, lo que lo hace más fácil de controlar desde un microcontrolador o una placa microcontroladora.

Se puede realizar una tabla comparativa entre los distintos tipos de motores (tabla 4), teniendo como referencia aspectos tales como la precisión al posicionarse, la fuerza que es capaz de ejercer sin que se averíe, el peso total del motor, el costo en el mercado y su facilidad de control.

**Tabla 4. Tabla de comparación entre los diferentes motores usados en robótica**

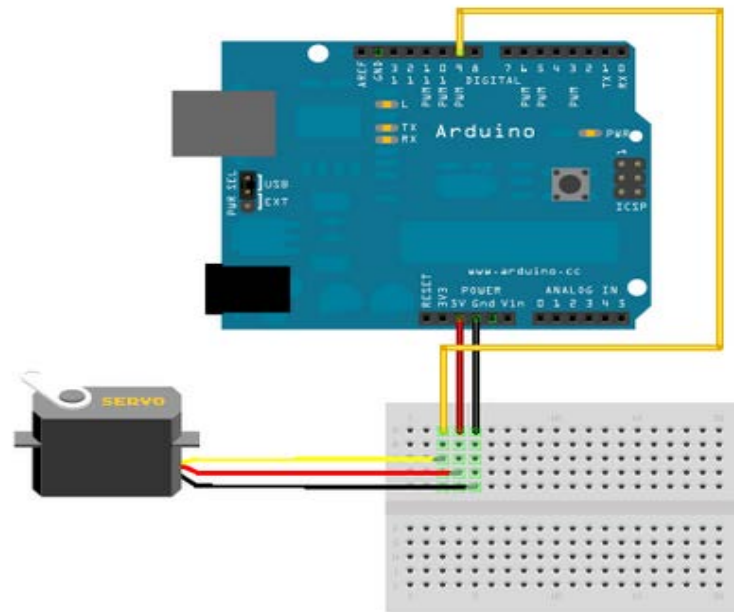
	Precisión	Fuerza	Peso	Costo	Control
Motor paso a paso	Excelente	Buena	intermedio	Bajo-medio	Fácil-intermedio
Motor DC con sistema de transmisión	Buena	Excelente	Muy pesados	Alto	Difícil
Servomotores hobby de corriente continua	Excelente	Buena	Livianos	Bajo –medio	Muy fácil

Fuente: Autores.

#### 3.3.4. Elección del motor

Basándonos en las necesidades del prototipo, como son bajo peso excelente precisión, buena fuerza, relativamente bajo costo y facilidad de control, elegimos los hobby servos como los indicados para implementar en nuestro prototipo. La utilización de este tipo de motores nos beneficiara notablemente en el peso final del prototipo, además de que nos ahorrara gran tiempo en implementar los algoritmos para el control de los mismos y nos proporcionarán la fuerza y la precisión requeridas por el proyecto.

**Figura 38. Conexión entre una placa microcontroladora Arduino y un servomotor de modelismo**



Fuente: Tienda de robótica. Tutoriales En: Arduino avanzado T00AA - Control de un servomotor con PWM. [Consultado 29 sept. 2012]. Disponible en:

[http://cosasdemecatronica.com/images/stories/tutoriales/arduino\\_basico/Servo\\_Arduino\\_bb.png](http://cosasdemecatronica.com/images/stories/tutoriales/arduino_basico/Servo_Arduino_bb.png)

Ya que el brazo requiere de una gran precisión en el posicionamiento del extremo efector del robot, pero manteniendo el torque necesario para que este se mantenga en esa posición por un tiempo indeterminado, los servomotores son la solución perfecta para nuestro prototipo, además de que no son motores que tengan un elevado costo, lo que contribuye a un bajo costo del prototipo final.

### 3.4. DESARROLLO MECÁNICO

El desarrollo mecánico del prototipo abarca diferentes aspectos, como el material de las piezas en que se construirá el prototipo, la forma de dichos materiales para que soporten las cargas a las que van a ser sometidos y el tamaño de prototipo. El desarrollo de la parte mecánica, abarca el diseño estructural del prototipo, la simulación en un software CAE de las distintas piezas y el ensamble, la construcción del prototipo y los ajustes mecánicos finales necesarios para una optima puesta a punto final del prototipo.

### 3.4.1. Diseño mecánico

El diseño mecánico, abarca tanto la el diseño como tal, mas una simulación del componente para saber si cumple los requerimientos mecánicos para ser instalado o elegido para el prototipo.

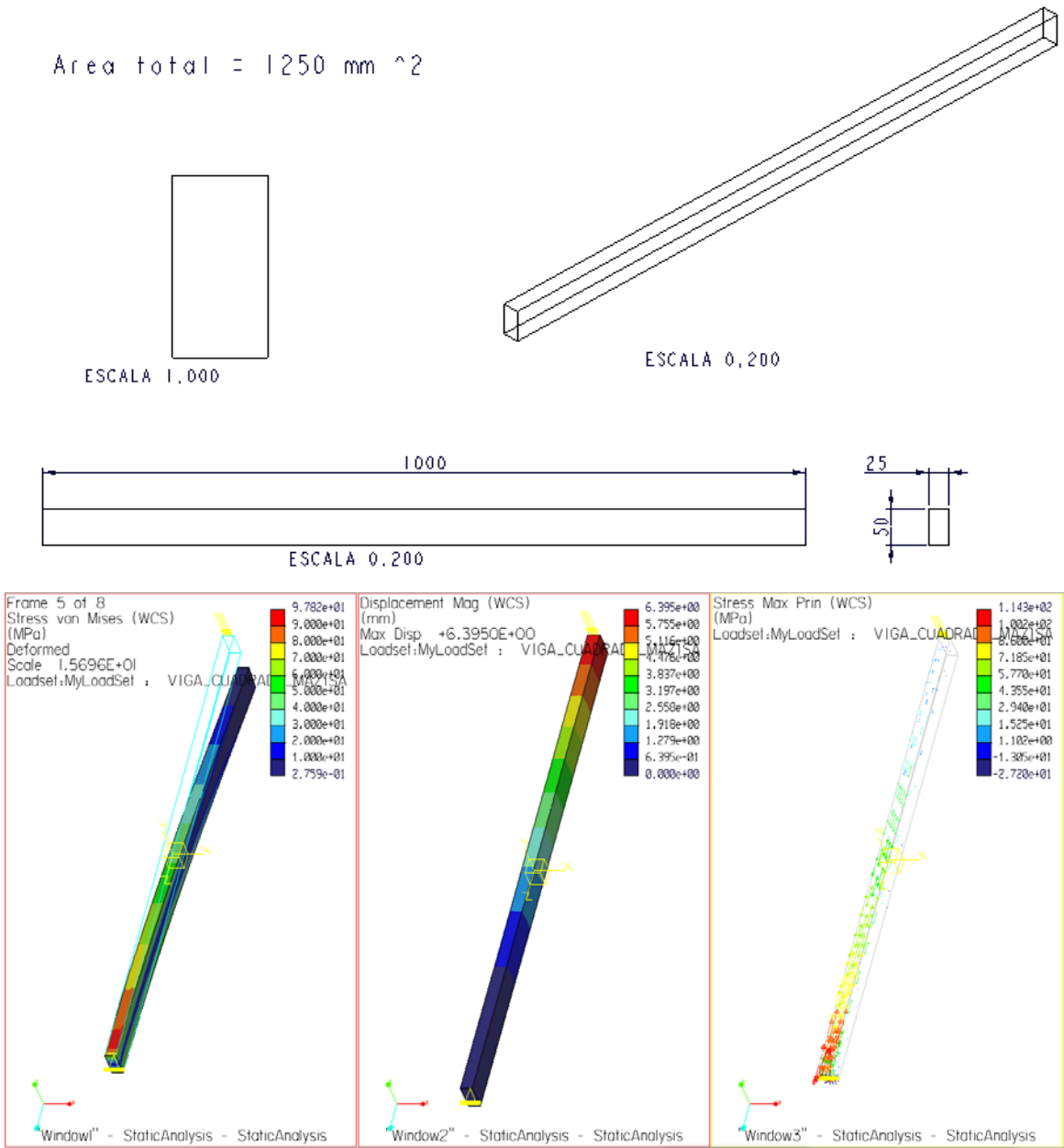
Para la elección del perfil con el que se realizaran los eslabones encargados de conectar las articulaciones del robot, se escogieron los tipos de perfiles más utilizados en desarrollo de prototipos robóticos.

El análisis de dichos perfiles se realizo con el software Pro Engineer Wildfire 5.0. Este software CAE (Computer Aided Engineering) nos permite simular y analizar, mediante el modulo de mecánica que posee, nuestros diferentes tipos de perfiles. El software es capaz de entregarnos el esfuerzo al que está sometido el perfil, el desplazamiento o flexión que este sufrirá, en que lugares del perfil es donde se concentra más el trabajo, nos permite elegir el material del que está hecho nuestro perfil suministrando todos los parámetros intrínsecos del material como inercia, densidad, entre otros.

Con el fin de encontrar cual de dichos perfiles nos proporciona mejores prestaciones para nuestro prototipo, los analizamos bajo ciertas circunstancias controladas y concluimos cual era el más apto para ser implementado en el manipulador. Se simulo el estado al que va a estar sometido el perfil si estuviera colocado en el prototipo, luego se procedió a realizar una comparación entre los resultados de cada tipo de perfil y por último se concluyó y escogió el perfil más apto para el prototipo.

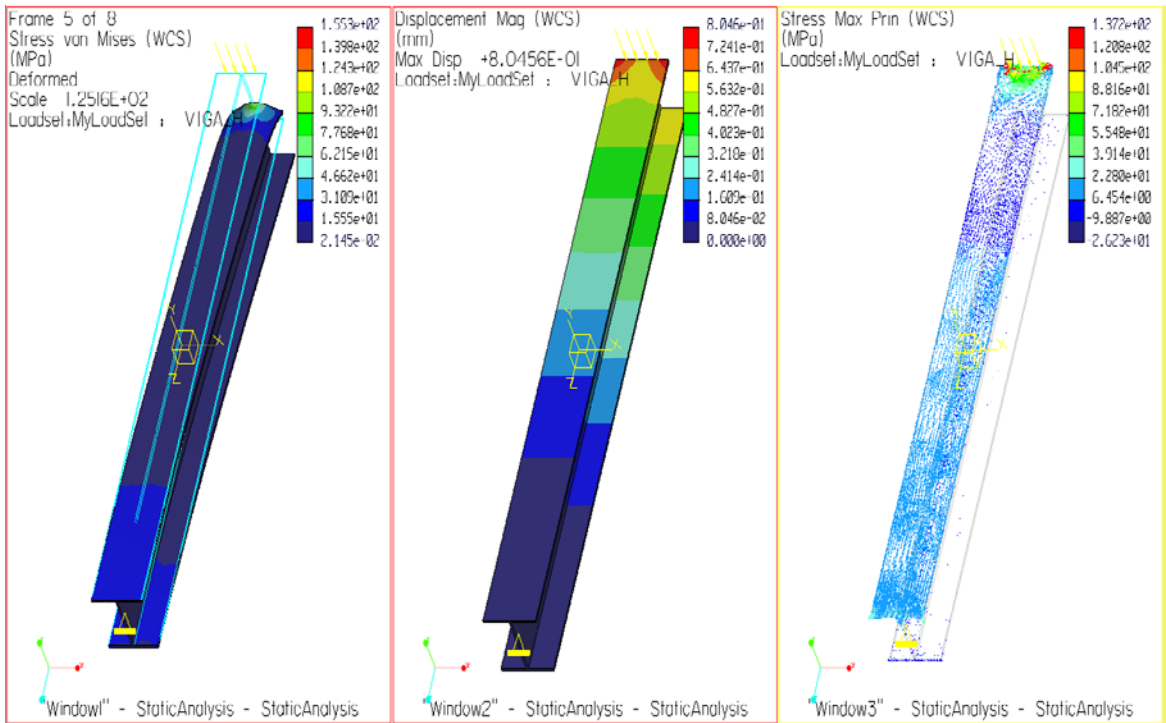
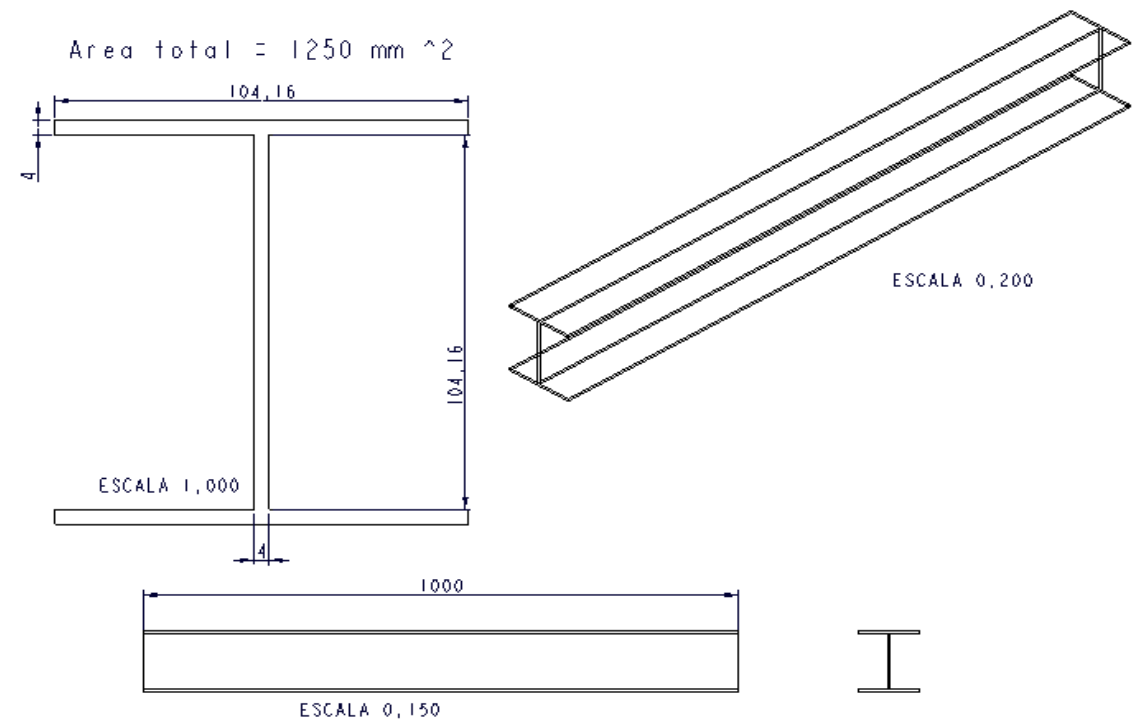
3.4.2. Análisis de perfiles

Figura 39. Perfil 1: Perfil rectangular macizo



Fuente: Autores

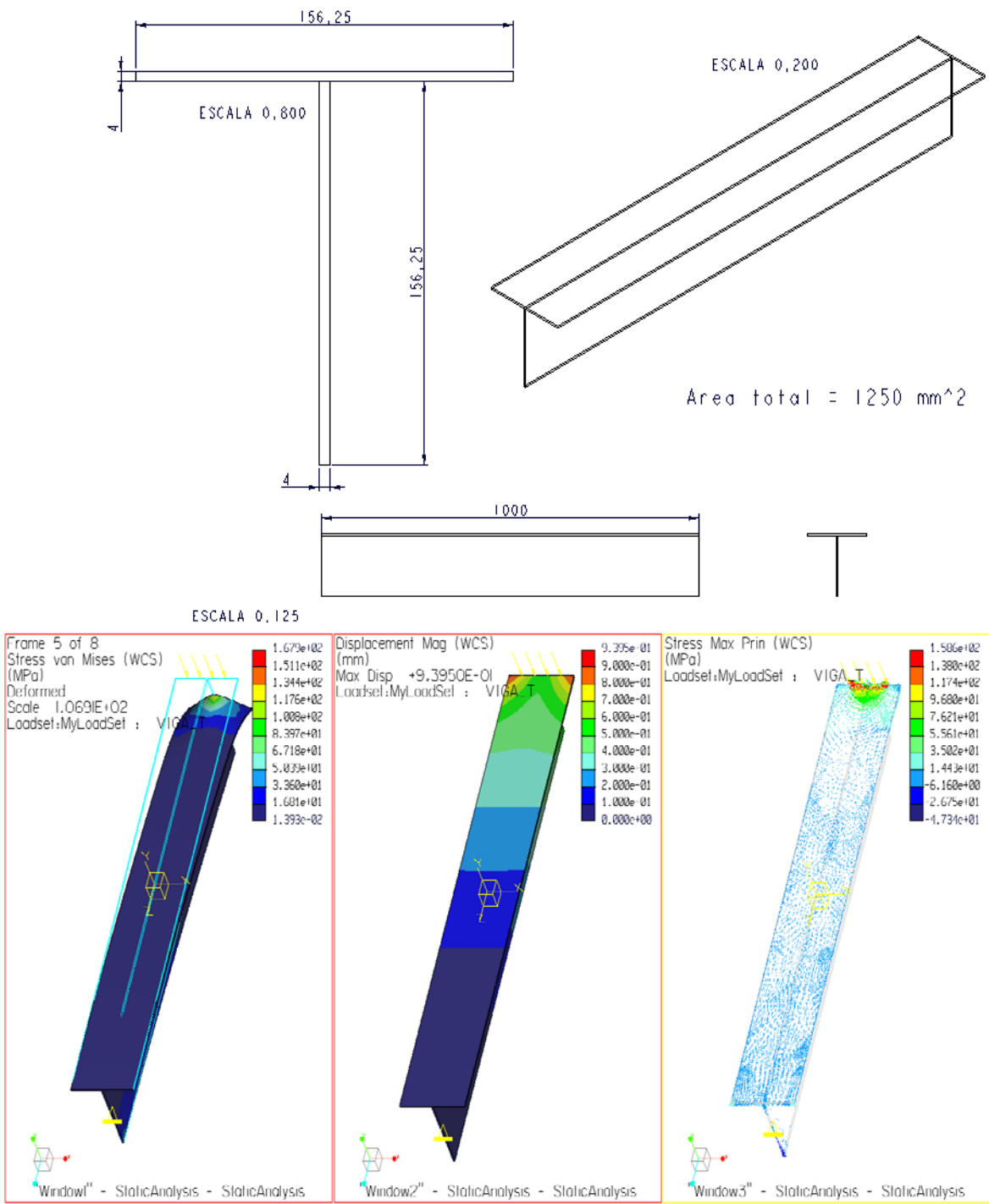
Figura 40. Perfil 2: Perfil en H



Fuente: Autores.

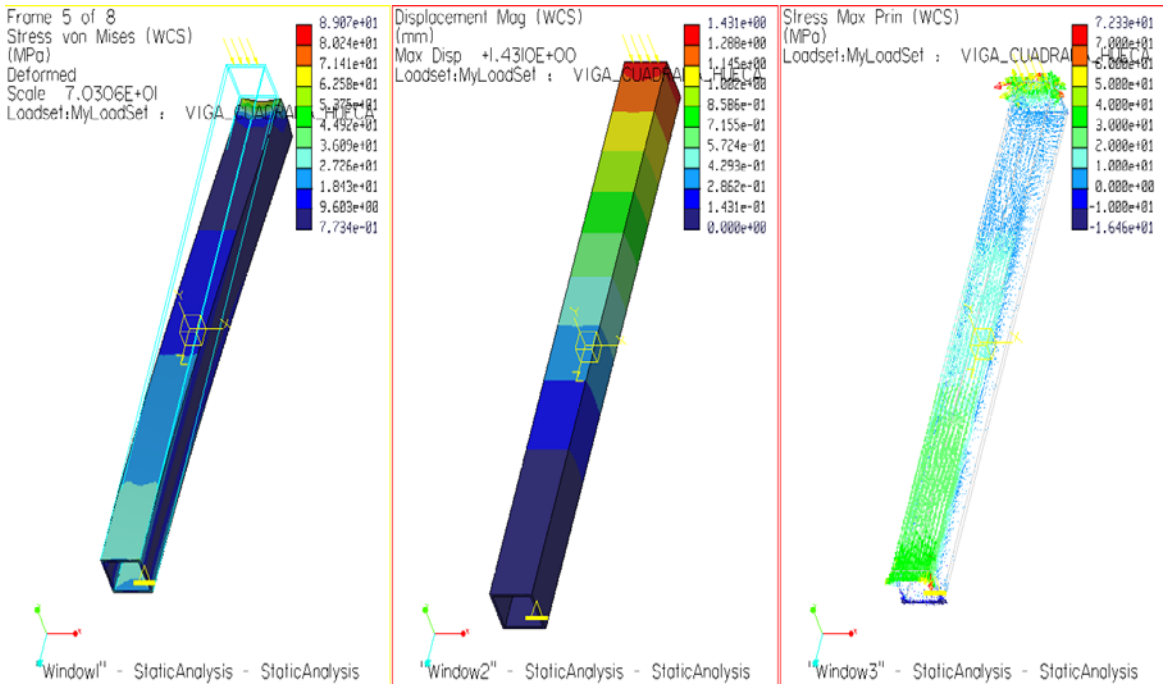
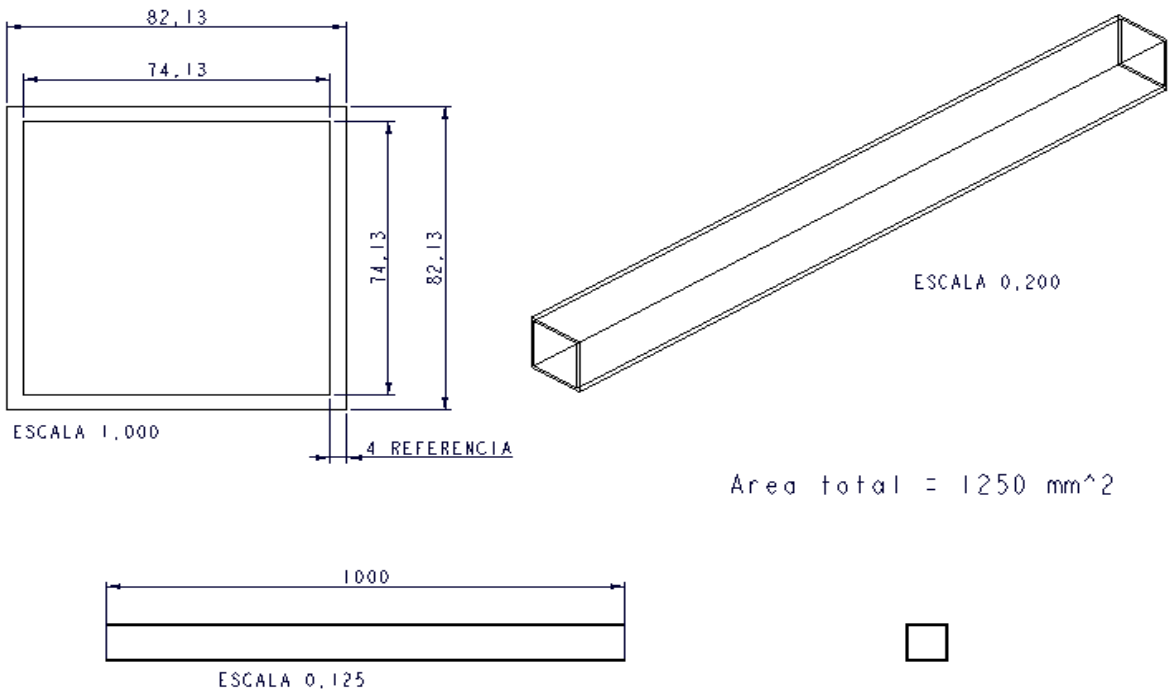


Figura 41. Perfil 3: Perfil en T



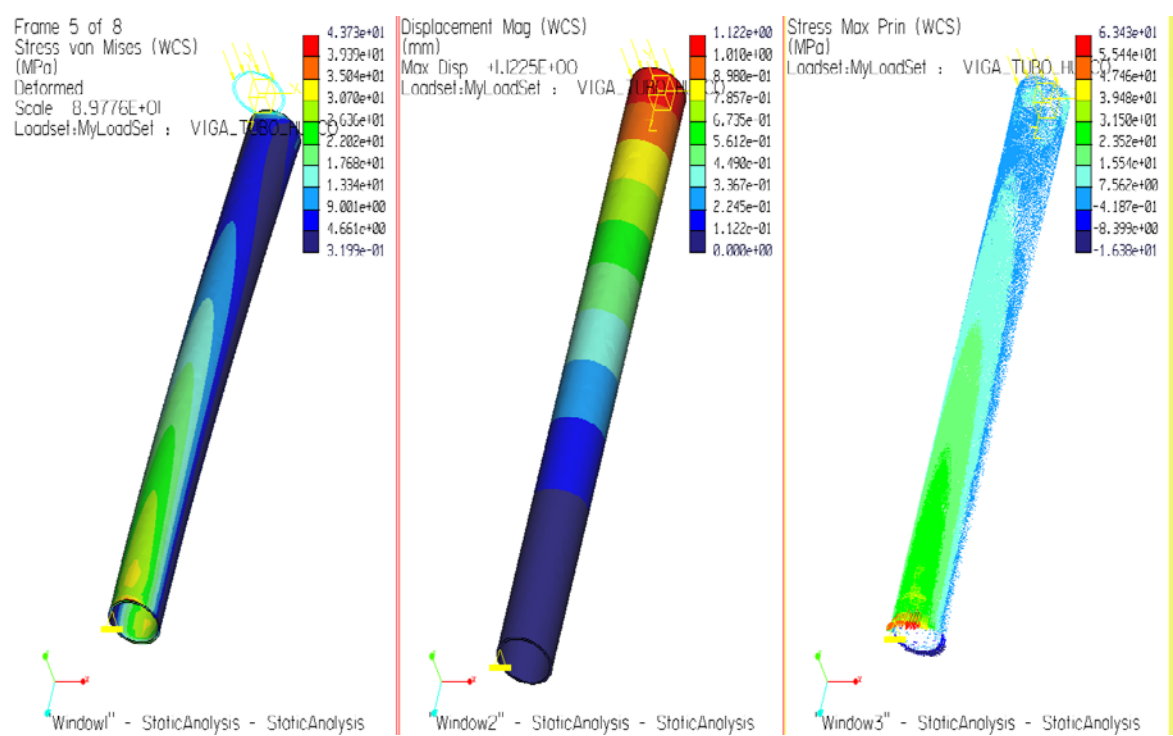
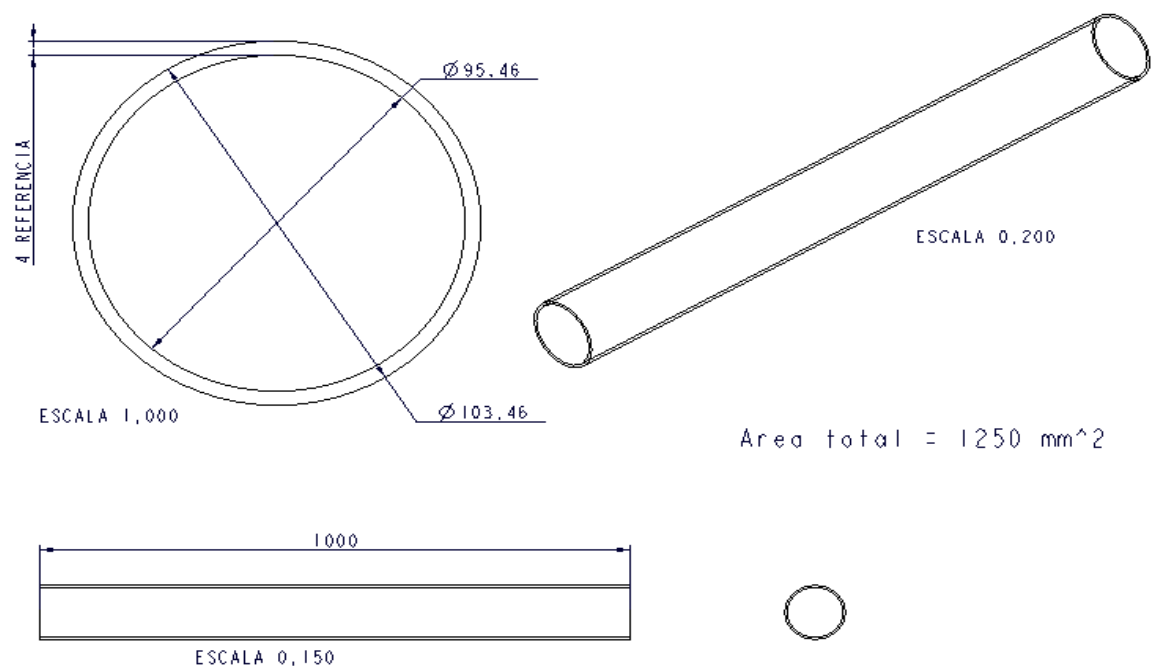
Fuente: Autores.

Figura 42. Perfil cuadrado hueco



Fuente: Autores.

Figura 43. Perfil 5: Perfil circular hueco



Fuente: Autores

Según los resultados obtenidos por el software, podemos comparar los perfiles analizados y realizar una tabla comparativa (tabla 5) teniendo en cuenta aspectos como el esfuerzo de von Mises, el máximo desplazamiento que se produce en el perfil y el máximo esfuerzo principal que se produce en el perfil.

**Tabla 5. Tabla comparativa entre los diferentes posibles perfiles para el diseño de los eslabones del prototipo**

Tipo de perfil viga	Esfuerzo von mises	Desplazamiento máximo	Esfuerzo máximo principal
Viga rectangular maciza	97.82 MPa	6.39 mm	114.3 MPa
Viga en perfil H	155.3 MPa	0.80 mm	137.2 MPa
Viga en perfil T	167.9 MPa	0.93 mm	158.6 MPa
Viga perfil cuadrado hueco	89.07 MPa	1.43 mm	72.33 MPa
Viga en perfil tubo hueco	43.73 MPa	1.12 mm	63.43 MPa

Fuente: Autores.

### 3.4.3. Elección del perfil optimo

Podemos concluir que el perfil más apropiado sería el tubo hueco, teniendo en cuenta los criterios tales como el esfuerzo de von mises, en donde ofrece las mejores prestaciones (43.73 MPa) en comparación con los demás perfiles, y el desplazamiento máximo, que aunque no es el perfil que menos se desplaza (1.12 mm), su respuesta en desplazamiento es buena.

En síntesis, el perfil en tubo hueco es el más equilibrado y con mejores prestaciones mecánicas teniendo en cuenta los resultados en esfuerzo y desplazamientos analizados anteriormente con cada uno de los cinco diferentes tipos de perfiles, teniendo como variables controladas la fuerza que se aplica a la viga (1000 N), el área de las vigas (1250 mm<sup>2</sup>) y la profundidad o largo de la viga (1000 mm).

Para el segundo eslabón, ya que este no estará sometido a momentos considerables, se utilizó el perfil circular hueco. Este perfil no reducirá el peso total del robot y proveerá al robot de las respuestas mecánicas necesarias para soportar los esfuerzos y las deformaciones que se presenten en ese segundo eslabón.

El material que se selecciono para la construcción de los eslabones fue: para el primer eslabón se eligió aluminio, ya que el eslabón posee las propiedades mecánicas idóneas, y el problema era el peso del mismo, el aluminio al ser un material liviano, compensaría un poco el perfil en relación de sus propiedades mecánicas y su peso.

Con el segundo perfil paso lo contrario. El peso en el perfil no es tan crítico, ya que el perfil e hueco, pero las propiedades mecánicas del perfil, en cuanto a deformación y esfuerzo soportado, aunque sean buenas, decidimos mejorarlas cambiando el material del perfil. El perfil ya no sería en aluminio, sino que sería en acero galvanizado. El acero galvanizado posee unas propiedades mecánicas excelentes, pero una densidad mucho más a la del aluminio. Como el peso no es crucial, se escogió el perfil circular hueco en acero galvanizado como la elección para el segundo eslabón.

#### 3.4.4. Elección y construcción del mecanismo de transmisión angular

El mecanismo de transmisión angular es el encargado de transmitir el ángulo de rotación que realice el servomotor, a alguna articulación del manipulador. Está constituido por un servomotor estándar, un soporte para servomotor estándar, una pieza en forma de L, que servirá de soporte para el motor, y una pieza en forma de U, que será la encargada de transmitir el ángulo de rotación del eje del servomotor.

Para la sujeción del servomotor se decidió utilizar diversas piezas existentes en el mercado, con el fin de evitar sobre costos en piezas que requirieran ser realizadas por maquinas de control numérico, es decir, piezas específicas para nuestro proyecto. Teniendo como base todas las medidas del servomotor que utilizamos, se decidió utilizar un soporte especialmente realizado para servomotores estándar. Este soporte es comercial, pero no muy fácil de encontrar en el mercado colombiano.

Hay que tener en cuenta, que primero se exploraron las opciones ya antes mencionadas, antes de realizar el diseño por software del prototipo. Una vez explorado el mercado y las facilidades para encontrar las diferentes piezas que conformarían nuestro robot, procedimos con el diseño y análisis del mismo en el software Pro Engineer Wildfire 5.0.

**Figura 44. Soporte para servomotores estándar**

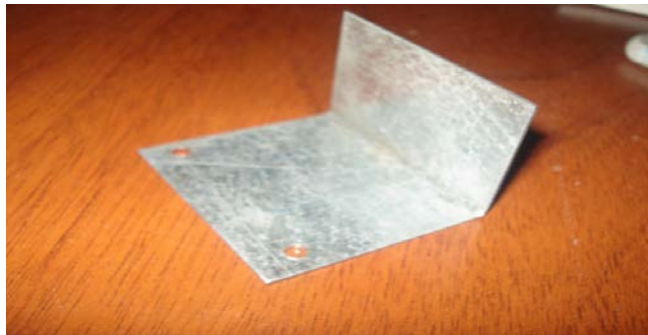


Fuente: Autores.

Con el soporte se logro evitar la realización de piezas específicas para la sujeción del servomotor. Se encuentran mecanismos especiales para el montaje de servomotores en el mercado, pero estos mecanismos son de alto costo y por ende se deajo atrás esa opción.

Una vez realizado el ajuste entre el servomotor y el soporte, se realizaron distintas piezas encargadas de completar el mecanismo encargado de transmitir el movimiento angular de los servomotores hacia el brazo. Las piezas que se diseñaron fueron fáciles de conseguir, gracias al estudio previo del mercado, y no eran de gran costo. Se decidió utilizar placa de acero galvanizado para la realización de las piezas, ya que es mucho más resistente, denso y económico que la otra opción contemplada, el aluminio. Ya que eran placas no muy grandes, el peso no era un factor decisivo a la hora de la elección del material de la placa, además los pesos entre la placa de acero galvanizado y la de aluminio no eran muy grandes, con referencia al tamaño de las placas.

**Figura 45. Pieza en forma de L para el soporte del servomotor**



Fuente: Autores.

### 3.4.5. Construcción de la unión entre el mecanismo de transmisión angular y los eslabones

Una vez contamos con el mecanismo de transmisión angular y los eslabones, necesitábamos una pieza que nos uniera de forma óptima las dos partes mencionadas. Logrando así que el giro de una articulación provocara un giro en las demás articulaciones, mediante los eslabones, y formando así la cadena cinemática abierta propia del robot.

Las uniones son una parte muy importante en el prototipo, así que un correcto diseño era primordial para evitar fallos en esta parte del prototipo. Las articulaciones tendrían que estar totalmente fijadas, sin ningún juego o vaivén, para evitar pérdida de ángulos al girar el motor, e inestabilidades por la rigidez del manipulador.

Las piezas se realizaron con ayuda de un torno, teniendo como material el aluminio. Se decidió aluminio gracias a su fácil maquinación y a su bajo peso. Nos basamos en modelos existentes en el mercado, pero ya que las piezas en el mercado eran muy costosas, decidimos realizar nuestra propia pieza, con similitudes respecto a la vendida en el mercado.

**Figura 46. Unión mecanismo transmisión angular y eslabon**



Fuente: Autores.

#### 3.4.6. Construcción de la articulación del hombro

En la construcción de la articulación del hombro se tuvo que hacer un rediseño, con respecto al mecanismo de transmisión angular desarrollado anteriormente. Ya que la articulación del hombro es la que tendrá que soportar más peso, y por ende la que tendrá que realizar más fuerza para mover dicha articulación, se decidió utilizar dos servomotores en la articulación. La utilización de dos servomotores, implicó el rediseño de esa articulación, resultando en la elaboración de piezas como un lamina de acero galvanizado en U más larga que la anterior, y una base circular, que reemplazo a la placa en forma de L, en la que irán soportados los montajes de los servomotores.

El rediseño se debió a la una prueba realizada con un servomotor, y se revisaron distintos modelos comerciales de manipuladores, no industriales, que utilizaban dos servomotores en esta articulación. Por lo que se llegó a la conclusión de que el peso total del robot no iba a ser soportado por solo un motor, así que se decidió la utilización de dos servos para esta articulación.

**Figura 47. Mecanismo de transmisión angular de la articulación del hombro**



Fuente: Autores.

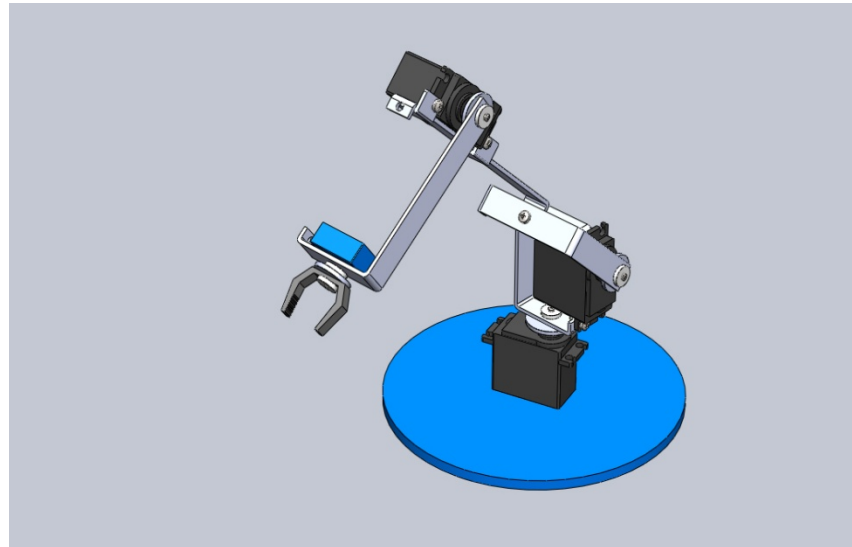


### 3.4.7. Construcción de la base del manipulador

La base es una parte muy necesaria tanto para poder apoyar nuestro robot, como para dotarlo de estabilidad. Una base bien diseñada nos puede evitar problemas de estabilidad al momento en que nuestro robot se esté moviendo de una posición a otra. En nuestro caso, se diseñó la base con el fin de solucionar varios problemas que se analizaron previamente.

Un problema que se analizó y solucionó fue el de la fuerza que tenía que realizar el servomotor encargado de hacer rotar la base. Varios de los modelos vistos en la web, soportaban todo el peso de su robot sobre el motor, como se ve en la figura 43. Al recaer el peso de todo el robot sobre este servomotor, se aumentaban drásticamente las posibilidades de que este no pudiera realizar sus desplazamientos debido al gran peso que debía mover, o también podría quedar trabajando forzadamente, lo que a largo plazo dañaría nuestro servomotor.

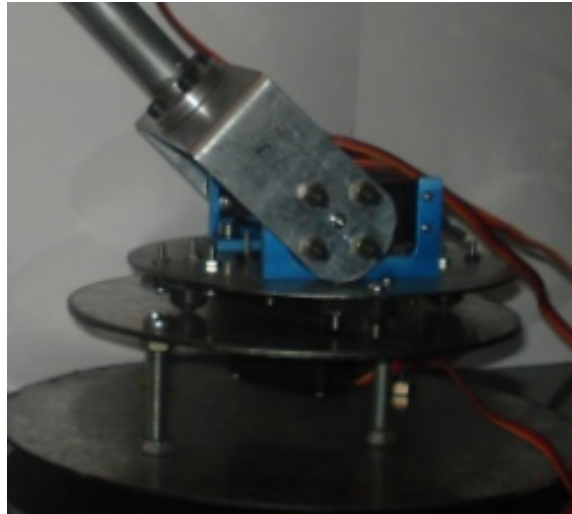
**Figura 48. Mecanismo rotatorio para la base de un manipulador casero.**



Fuente: HIDALGO, Jairo; PADILLA, Jorge. Proyecto brazo robótico. En: Diseño Solidworks brazo robótico. [Consultado 1 nov. 2012]. Disponible en: [http://brazorobotico3.files.wordpress.com/2011/01/brazo\\_robotico\\_vista\\_a.jpg](http://brazorobotico3.files.wordpress.com/2011/01/brazo_robotico_vista_a.jpg)

El problema se solucionó colocando unas bolas locas en la parte inferior del primer disco que contiene la base. Las ruedas locas son las encargadas de recibir todo el peso del robot, el que antes recibía en servomotor, para liberar al mismo de tener que cargar con toda esa carga, y dejarlo encargado exclusivamente a realizar la fuerza de torsión necesaria para hacer rotar la base. En la figura 44 se puede detallar el mecanismo encargado de realizar la operación mencionada.

**Figura 49. Mecanismo de posicionamiento angular de la base.**

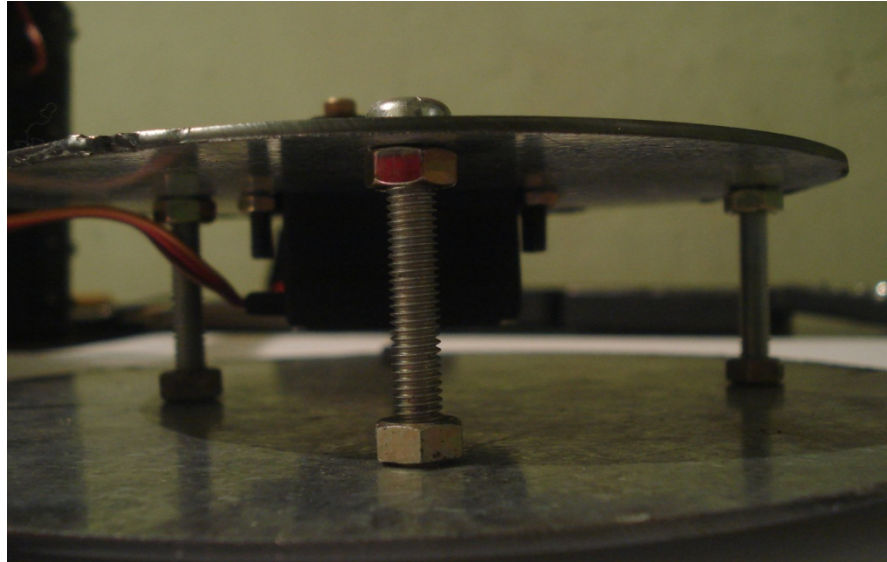


Fuente: Autores.

Otro problema que se analizó y se solucionó, fue el de la estabilidad que nos debería ofrecer la base en el momento en que el manipulador cambiara de posición. Se observó que en varios diseños vistos, la base era muy pequeña en proporción con el reto del brazo. Esto no permitía al robot tener la estabilidad necesaria a la hora de realizar un movimiento, ya que el robot se podría caer al momento de realizar un movimiento de alguna de su articulación. En el caso de nuestro robot, la utilización de servomotores nos generaba, a la hora de un movimiento de cualquier articulación, un rápido posicionamiento de dicha articulación en cierto punto deseado, generando, por las altas velocidades a las que se posiciona un servomotor, movimientos bruscos a la hora de realizar dichos posicionamientos. Mediante unas pruebas realizadas, se decidió hacer una base más grande que el disco en donde se soportaba el resto del brazo robótico. Esto nos proporcionó una mejor estabilidad en los momentos en los que se realizaban los movimientos de las articulaciones.

Se pensó inicialmente que dichos discos más grandes, que compondrían el resto de la base, se harían en el mismo material que el primer disco, el que soportaba el resto del brazo. Pero debido a algunas pruebas realizadas con materiales que eran más pesados, se concluyó, que entre más pesado fuera el material de dichos discos, el robot mejoraba su estabilidad y a la vez se daba una mayor rigidez a la base. Así que decidimos utilizar el mismo material, pero con un mayor calibre, lo que nos aumentaba el peso, y nos proporcionaba todas las condiciones requeridas y analizadas previamente. En la figura 45, se puede observar la base ensamblada en su totalidad.

**Figura 50. Base para el prototipo.**



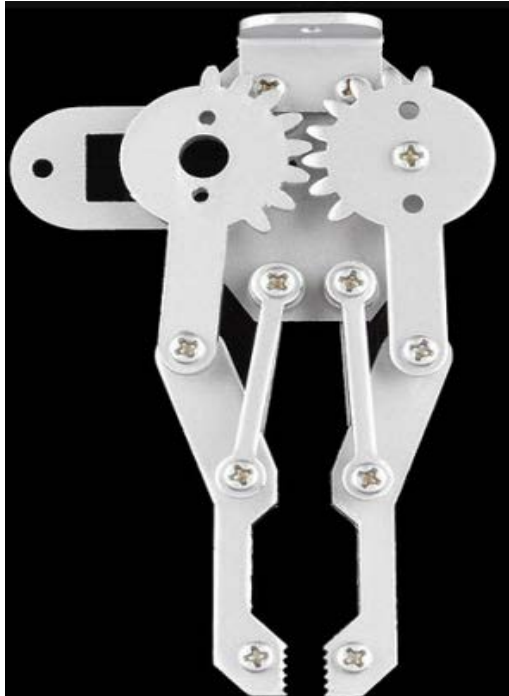
Fuente: Autores.

#### 3.4.8. Construcción de la ultima articulación y montaje de la pinza

Para la parte final del ensamble de las partes mecánicas del prototipo, se dejó el extremo efector a usar, y su respectivo mecanismo movimiento. El extremo efector seleccionado fueron las pinzas, ya que la aplicación que se le va a dar a nuestro robot es la de recoger y colocar objetos, y para esta acción, las pinzas son una solución económica y suficiente para realizar dicha tarea. Debido al poco tiempo del que disponíamos en este paso del ensamble, decidimos no diseñar y construir el extremo efector.

En vez de esto, se decidió utilizar una pinza ya construida, y montarla sobre la articulación que se diseñara. Lo bueno de esto fue el ahorro en tiempo, y el buen diseño que presentaba la pinza que decidimos adquirir. Aparte de el ahorro en el diseño y la construcción de la pinza, se ahorro también tiempo gracias a que no tendríamos que hacer ajustes de último momento sobre la misma. En la figura 46, se muestra la pinza que se adquirió para utilizarla como extremo efector en nuestro prototipo.

**Figura 51. Pinza para manipulador robótico de la empresa Sparkfun electronics.**



Fuente: Tienda de robótica. Actuadores mecánicos En: Articulaciones.[Consultado 3 nov. 2012]. Disponible en: <http://www.electronicaestudio.com/i/f/SP-ROB10332.jpg>

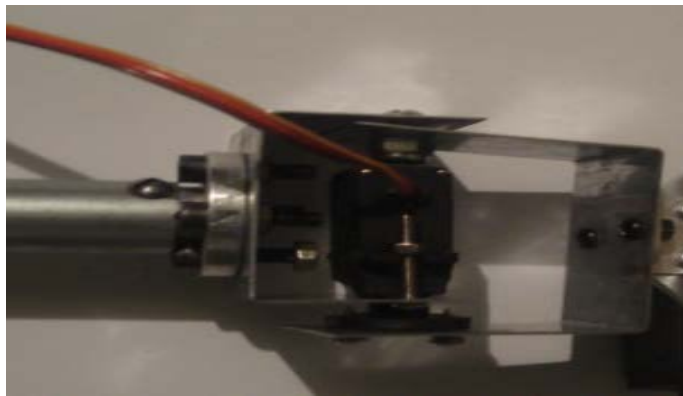
La pinza seleccionada tiene un diseño especial que permite la adaptación de un servomotor para realiza la acción de abrir y cerrar la pinza. Este fue otro criterio que tuvimos en cuenta para la selección de esta pinza, ya que nuestro robot va a estar todo dotado por servomotores y este diseño, nos evita el uso de otra clase de motores en el prototipo. Otra ventaja de esta pinza es su bajo peso, ya que está hecha en aluminio de baja densidad en su totalidad. Esto nos reduce el peso del extremo efector, y por ende, el torque que necesitan los motores para levantar sus respectivas articulaciones y el torque necesario para que el servomotor montado en la pinza abra o cierre la misma.

En cuanto al mecanismo encargado de transmitir el movimiento angular del motor hacia el extremo efector, se reutilizo el diseño previamente realizado para la articulación del centro, el codo. Se utilizo el mismo diseño pero en una menor proporción, ya que el servomotor que iría esta vez en la articulación era de menor tamaño.

Se decidió que fuera de menor tamaño el servomotor, teniendo en cuenta dos aspectos. El primero fue, ya que el peso que debía levantar este motor era menor, ya que solo levantaría la pinza, se podría utilizar un motor de menos potencia y por ende de menor tamaño. El otro aspecto fue que con un motor de menos peso, se reducía el peso total de todo el prototipo, logrando que todas las articulaciones anteriores a este servomotor, tuvieran que realizar un menor esfuerzo a la hora de moverse.

Básicamente el mecanismo cuenta con dos perfiles de aluminio en forma de U, uno es el encargado de conectar el mecanismo con el eslabón proveniente del codo, segunda articulación, como se muestra en la figura 47.

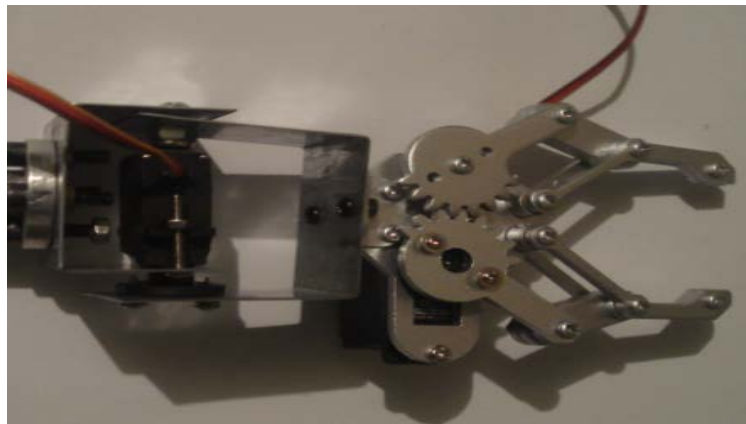
**Figura 52. Conexión entre e eslabón del codo y el mecanismo de transmisión angular de la muñeca.**



Fuente: Autores.

El otro perfil es en encargado de transmitir el movimiento angular, del mecanismo en mención, con la pinza, como se muestra en la figura 48.

**Figura 53. Conexión entre el mecanismo de transmisión angular de la muñeca con el extremo efector.**



Fuente: Autores.

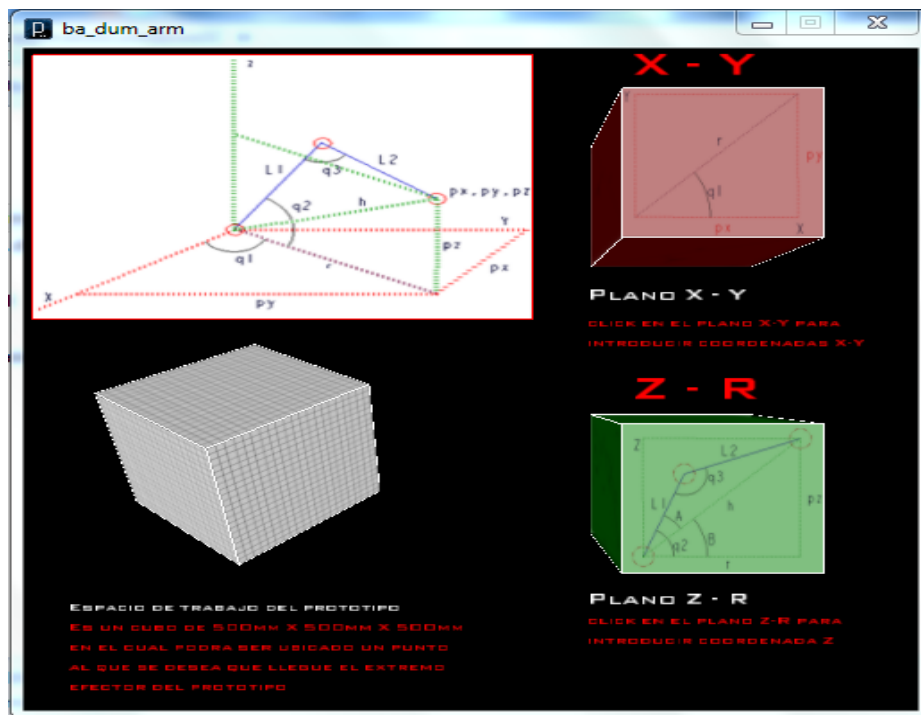
El mecanismo encargado del movimiento angular de la muñeca, además, posee un servomotor con un torque estático de 3.2 Kg\*cm a 6 voltios, lo suficiente para mover todo el extremo efector sin dificultad alguna. Tiene un eje de rotación opuesto a eje del servomotor, encargado de soportar el movimiento angular del motor y brindar estabilidad y simetría de movimiento al mecanismo.

### 3.5. DESARROLLO DE LA INTERFAZ HUMANO MAQUINA (HMI)

Para el desarrollo de la interfaz de programación del robot, se escogió el lenguaje de programación Processing. Con este lenguaje logramos crear aplicaciones visuales capaces de interactuar con el usuario.

El primer punto que se tuvo en cuenta a la hora de el desarrollo de la interfaz fue la posibilidad de que esta fuera intuitiva y muy fácil de manejar por cualquier persona, incluso por alguien que no tenga conocimiento alguno de robótica o computación. Por ende se trabajo en realizar una aplicación grafica muy amigable con el usuario, fácil de entender, y que con solo un vistazo al manual de operación se pueda manipular el robot sin ningún problema.

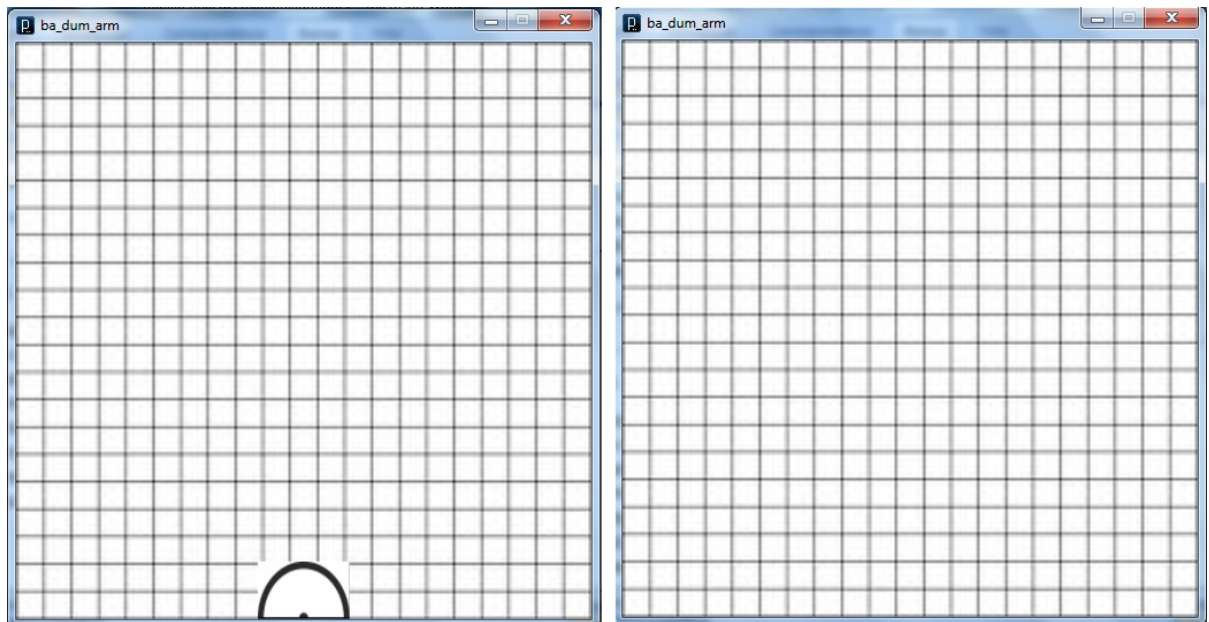
Figura 54. Pantalla principal de la interfaz de programación del prototipo



Fuente: Autores.

Para la programación de movimientos del brazo manipulador, se utilizaron eventos activados por el ratón y el teclado del computador. Así que, básicamente, no se tendrá que ingresar ningún valor numérico en la interfaz, sino que se tendrá solo que ubicar el ratón del computador en las diferentes pantallas, y dar click, para dar la posición a la que se desee que llegue la pinza de robot.

**Figura 55. Pantallas para la localización del extremo efector del manipulador**



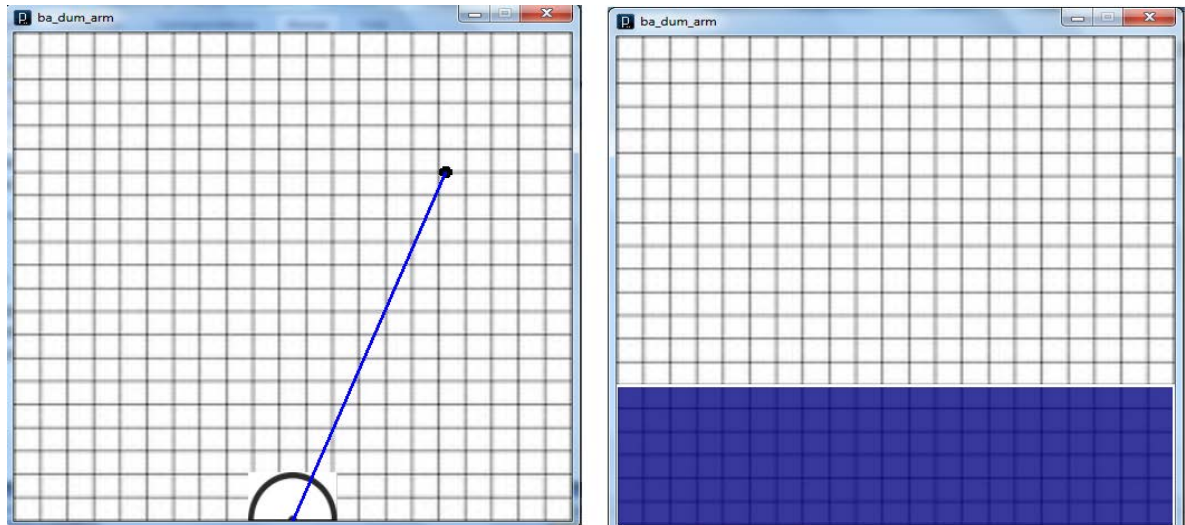
Fuente: Autores.

Se realizó un modelo a escala, por píxeles, del campo de trabajo del manipulador. Así, un milímetro en el mundo real, equivale a una proporción de esta distancia en píxeles. Si se seleccionan 25 píxeles, por ejemplo, es como si se seleccionaran 25 milímetros multiplicado por una constante de proporción, y esta será la distancia en el mundo real. Se decidió utilizar una constante de proporción menor a 1, ya que si la constante fuera 1, el campo de acción del manipulador sería muy grande, y habrían puntos en la pantalla en las que el extremo efector no podría llegar.

Así se logró, que cada vez que se seleccione una posición del cursor, dentro de la pantalla correspondiente, se capturaran las coordenadas del punto donde se dio click, y luego esa información es utilizada para realizar los diferentes cálculos necesarios para encontrar los ángulos que requiere cada articulación para llegar al punto seleccionado.



**Figura 56. Pantallas en las que se seleccionaron las coordenadas de un punto en el espacio**



Fuente: Autores.

Una vez realizado los cálculos, estos se le envían a la placa Arduino, encargada de mover los motores hacia el ángulo calculado, y luego se espera a que se seleccione otra posición para repetir el proceso.

Una de las mejoras que se le realizó a la aplicación encargada de la programación del prototipo, fue la capacidad de ser multiplataforma. Es decir, la aplicación es compatible para sistemas operativos tanto Windows 32 bits, Windows 64 bits, MAC-Os, Linux 32 bits y Linux 64 bits.

### 3.6. CONSTRUCCIÓN DE LA PARTE ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA

Gracias a la utilización de una placa microcontroladora como lo es Arduino, se redujo drásticamente la complejidad de la parte electrónica y eléctrica del prototipo. Básicamente, la parte eléctrica se reduce a la alimentación de los motores, alimentación de la placa microcontroladora y la alimentación de la computadora que se utilizara; mientras la parte electrónica se reduce tan solo al conexcionamiento de los servomotores con la placa microcontroladora.

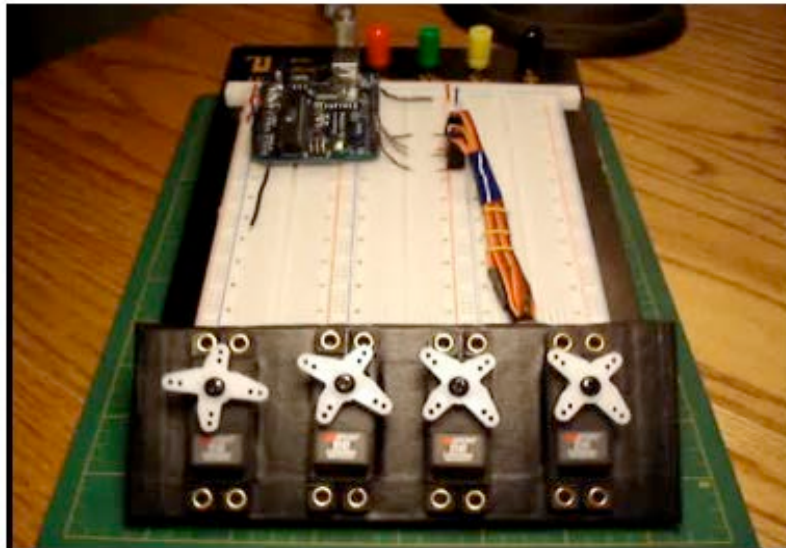
Ya que Arduino no es capaz de entregar alimentación a más de un motor al mismo tiempo, es necesario utilizar una fuente de alimentación externa para alimentar los servomotores del manipulador. Los servomotores consumen una corriente nominal



de 800 miliamperios, en condiciones de plena carga. Por lo que necesitaremos, para los 6 motores presentes en el prototipo, una fuente de 4.8 amperios para proveer de la corriente necesaria a todos los motores.

Como deseamos tener un factor de seguridad para proveer la corriente necesaria a los motores, utilizaremos una fuente de 5 a 6 amperios. La conexión entre varios servomotores y el Arduino se puede detallar en la figura 53.

**Figura 57. Conexión entre varios servomotores y el Arduino.**

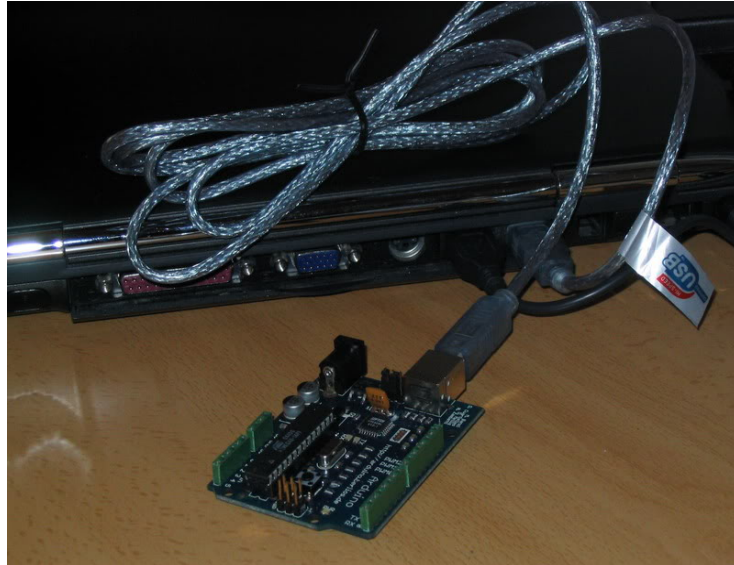


Fuente: embedded-lab. Servomotor control. En: Arduino-Phyton based multiple servo control. [Consultado 7 nov. 2012]. Disponible en: <http://embeddedlab.com/blog/wpcontent/uploads/2011/01/ArduinoServo.png>

La computadora encargada de la programación del robot, se conecta a una toma de corriente alterna que esté disponible. Así que es indispensable contar con una toma de corriente alterna a disposición a la hora de querer utilizar el prototipo. Cabe acotar que no es indispensable la utilización exclusiva de una computadora de escritorio, puede ser tanto una computadora portátil como una de escritorio, ya que la aplicación creada para la interfaz maquina-humano no requiere de un computador robusto.

La alimentación de la placa microcontroladora se realizara mediante el mismo cable USB por el que se programa el Arduino. Así que no es necesario alimentar el Arduino con la fuente de alimentación, ni con pilas o baterías, solo basta que esté conectada la placa microcontroladora con la computadora de programación.

**Figura 58. Alimentación de la placa microcontroladora**



Fuente: BERNAT, Daniel. Conociendo Arduino. En: Arduino versión USB. [Consultado 10 nov. 2012].  
Disponible en:

[http://img.photobucket.com/albums/v20/igortme/Arduino/GuiaRapida/CONEXION\\_PORTATIL.jpg](http://img.photobucket.com/albums/v20/igortme/Arduino/GuiaRapida/CONEXION_PORTATIL.jpg)

### 3.7. DESARROLLO DE LA PARTE DE CONTROL

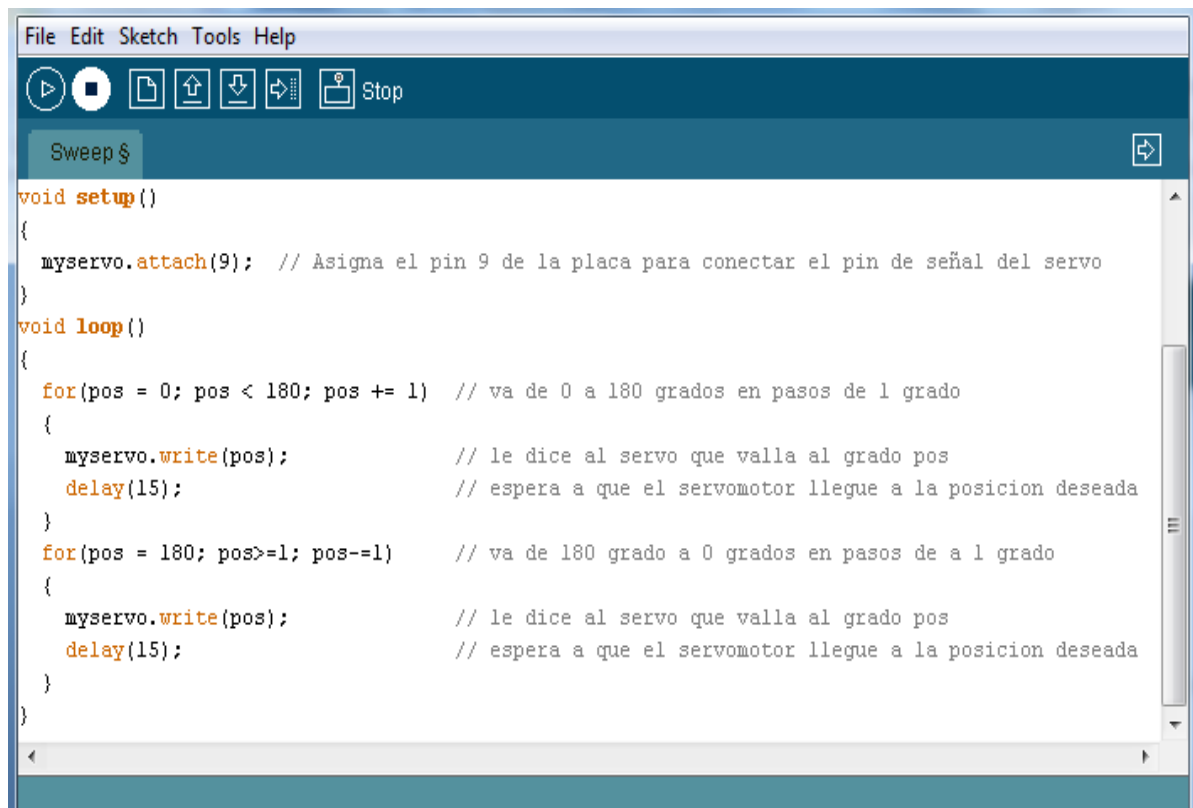
El control de movimiento de los motores está dividido en dos partes. La primera parte, es la encargada, mediante algoritmos, de tomar las coordenadas tomadas por la interfaz maquina-humano y calcular los ángulos a los que deberán estar cada articulación para llegar a la posición deseada por el usuario. Esta primera parte se realiza en la computadora por medio del lenguaje Processing.

La segunda parte, es la encargada de tomar los ángulos generados por la primera parte del control, y mediante la programación de Arduino, utilizar esos datos para mover los servomotores hasta que lleguen a los ángulos que se tuvieron por entrada. El Arduino posee una librería especial para el control de servomotores y además, el servomotor tiene en su interior un control PID para el posicionamiento de su eje de salida, por lo que no es necesario realizar un control por computadora o por métodos matemáticos, basta con la ayuda que nos proporciona el mismo servomotor para su posicionamiento y control del mismo.

La necesidad de sensores para el control de la posición del servomotor, no es estrictamente necesaria, aunque se podrían poder potenciómetros u otra clase de sensores de posición angular redundantes al servomotor, para mayor seguridad.

Los servomotores al poseer un comparador, contenido en la unidad interna de control de posición del servomotor, no pararan hasta llegar a la posición que se le indico. Con lo que aseguraremos que el ángulo al que se le pidió al servomotor que se posicionara es el correcto. Sin embargo se puede realizar un control por computadora, leyendo, mediante Arduino, la posición actual del servomotor, y asegurando que no realice ninguna acción hasta que se encuentre en el ángulo especificado.

**Figura 59.** Pantalla con un ejemplo de programa para controlar el posicionamiento de un servomotor por Arduino.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, there is a menu bar with 'File', 'Edit', 'Sketch', 'Tools', and 'Help'. Below the menu bar is a toolbar with icons for running, stopping, and other functions. The main area displays a C++ program for controlling a servo motor. The program includes a 'Sweep' tab and a code editor with the following content:

```
void setup()
{
  myservo.attach(9); // Asigna el pin 9 de la placa para conectar el pin de señal del servo
}
void loop()
{
  for(pos = 0; pos < 180; pos += 1) // va de 0 a 180 grados en pasos de 1 grado
  {
    myservo.write(pos);              // le dice al servo que valla al grado pos
    delay(15);                       // espera a que el servomotor llegue a la posicion deseada
  }
  for(pos = 180; pos >= 1; pos -= 1) // va de 180 grado a 0 grados en pasos de a 1 grado
  {
    myservo.write(pos);              // le dice al servo que valla al grado pos
    delay(15);                       // espera a que el servomotor llegue a la posicion deseada
  }
}
```

Fuente: Autores.

Cuando se inicia el movimiento del manipulador hacia el punto deseado, se observa que la corriente que consumen los seis motores del prototipo se disminuye al activar secuencialmente los motores, diferente a cuando se activan todos los motores en un mismo paso.

**Tabla 6. Comparación entre corriente de consumo con activación secuencial y activación simultanea de los motores del prototipo.**

	Prueba1	Prueba2	Prueba3	Prueba4	Prueba5
Consumo en amperios con activación secuencial	1.12	0.90	1.19	0.98	0.89
Consumo en amperios con activación simultanea	1.56	1.66	1.63	1.49	1.55

Fuente: Autores.

En la tabla 6 se muestra un comparativo entre la corriente que consumen los motores utilizando una activación secuencial y la corriente de consumo con activación simultanea de todos los motores. Valiéndonos de los resultados anteriores, decidimos realizar un control de activación secuencial de los motores que se involucren en el movimiento a realizar. Esto nos permite bajar el consumo de corriente pico que aparece al arrancar todos los motores simultáneamente.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Líneas de investigación

La presente investigación es enfocada en el área de invención, innovación, desarrollo y transferencia de tecnología ya que cuenta con el propósito de desarrollar tecnología aplicable en el campo de la robótica.

### 4.2. Área de investigación

- Robótica.
- Diseño mecatrónico.

### 4.3. Líneas de investigación del programa

- Innovación y desarrollo tecnológico.

## 5. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS

El funcionamiento del prototipo de brazo robótico con 5 grados de libertad para aplicaciones de coger y colocar, inicia con la operación del prototipo. El programa de la computadora presta una interfaz amigable y de fácil comprensión, por lo cual el usuario mismo no deberá de tener un amplio conocimiento en los campos de la robótica ni de la computación.

Inicialmente el operario tendrá que ejecutar la aplicación encargada de la programación del robot, luego de haber energizado el robot. Luego se estará listo para iniciar el posicionamiento, mediante software, del extremo efector del prototipo. El prototipo se posicionara secuencialmente desde la base, hasta la pinza, llegando así, al punto programado por el usuario anteriormente.

Se realizaron unas tablas calificativas que exponen los resultados de las pruebas iniciales realizadas con el prototipo, donde la calificación se realiza así:

1. Muy inadecuado.
2. Inadecuado.
3. Moderado.
4. Adecuado.
5. Muy adecuado.

**Tabla 7. Prueba movimiento rotacional.**

	Precisión	Velocidad	Rigidez
Base	4	5	4
Hombro	4	4	2
Codo	4	4	4
Muñeca	5	5	4

Fuente: Autores.

Solución de problemas.

Los principales inconvenientes aparecieron en el ensamble de todos los elementos que componen el prototipo, para que este cumpliera con las expectativas de diseño y funcionalidad.

Para realizar la sujeción de las diferentes piezas, fue necesario hacer diferentes ajustes en los agujeros de las placas, proporcionándoles ciertas tolerancias, para poder realizar los ajustes necesarios para el correcto ensamble de los componentes.

Se tuvo que recortar un poco los eslabones del prototipo, ya que, con las medidas que se diseñaron inicialmente, la distancia total del robot, nos generaba un torque muy alto en la articulación del hombro.

La pieza en forma de U presente en la articulación del hombro, tuvo que ser rediseñada con tolerancia de 5%, para poder ajustar los motores que se ensamblarías en dicha articulación.

Se utilizaron ruedas locas para reducir el torque necesario por el servomotor de la base, en el movimiento angular de dicha articulación.

La elaboración de la pinza utilizada como extremo efector del prototipo requería del diseño de cada una de las piezas que la componían, además, las piezas eran costosas en construcción y por ende se gastaría tiempo en diseño, construcción y ensamble de la misma. Por ello se decidió comprar una pinza que se encontraba en el mercado, ahorrándonos así, tiempo que luego empleamos en el ensamble y puesta a punto del prototipo.

Algunos de los componentes, al no ser hechos completamente a la medida, según el diseño, nos traían problemas como un aumento del peso del prototipo. Ese aumento de peso del prototipo, nos llevo a utilizar un resorte en la articulación del hombro, con el fin de solucionar dos problemas: el primer problema que soluciono fue, la incapacidad de la articulación del hombro para realizar el posicionamiento del extremo efecto, debido a ciertas posiciones en las que se exigía al máximo a dicha articulación; el segundo problema que se soluciono fue, el vaivén que se generaba en la articulación al mover la articulación del codo. El resorte redujo drásticamente dicho problema, generando así una mejor estabilidad del prototipo.

Los servomotores traen tres cables de aproximadamente 30 cm de largo. Para las articulaciones, que va a estar en constante movimiento, y variando su posición con respecto a la placa microcontroladora, es necesario contar con cables más largos,

ya que las articulaciones van a estar en movimiento, y algunas de estas articulaciones van a estar lejos de la placa microcontroladora. Por lo que se decidió construir unas extensiones, lo suficientemente grandes como para cubrir toda el área de movimiento de cada articulación, lo que nos permite dotar de mucha más libertad a cada articulación del prototipo, mientras que se asegura su conexión con la placa microcontroladora.

Para la realización de las pruebas de cada articulación, encontramos un problema ocasionado por la fuente externa, a la hora de realizar la descarga de los programas realizados en la computadora hacia la placa microcontroladora, la computadora registraba un error en el que perdía o mantenía activo el puerto USB en el que estaba conectado la placa, y por ende aparecía un error de “puerto en uso”, lo que impedía cargar el programa realizado. Se encontró una solución a este problema mediante el análisis de las circunstancias en las que aparecía el mismo. Se determinó que el error aparecía cuando se apagaba la fuente mientras que la placa microcontroladora estuviera en comunicación con nuestra computadora. La solución para este problema es no apagar la fuente mientras que se esté ejecutando un programa en la placa, o si se desea apagar la fuente de alimentación externa, es necesario primero desenergizar la placa Arduino primero y luego, cuando se encuentre desenergizada, sin ejecución de programas, se procede a apagar la fuente externa. Lo mismo para la activación, primero la fuente de alimentación externa, y luego si la alimentación de la placa Arduino.



## 6. CONCLUSIONES

- En la investigación, análisis y selección del método de posicionamiento del extremo efector del prototipo, fue bastante ardua, seleccionando al final el método de posicionamiento trigonométrico. Se seleccionó este método gracias a las facilidades matemáticas que nos brindó a la hora del cálculo de las posiciones de cada articulación, así como, las propiedades físicas y estructurales que presentaba nuestro prototipo, ya que cumplía con las reglas para la utilización de este método de posicionamiento.
- Se definió la placa microcontroladora de prototipado rápido Arduino, para el desarrollo de la parte electrónica, ya que nos ofreció las facilidades para el control de servomotores de modelismo. Además nos simplificó significativamente la cantidad de componentes eléctricos y electrónicos a utilizar en el prototipo.
- El lenguaje de programación Processing nos ofreció una gran facilidad para la creación de la interfaz gráfica, encargada de la programación visual del prototipo. El lenguaje JAVA se utilizó para crear las pantallas de programación por medio de ventanas, ofreciéndonos otro ángulo de programación diferente al gráfico. Entonces el prototipo dispone de dos tipos de interfaces para su programación.
- La parte de control del prototipo se realizó entre la placa microcontroladora y las interfaces gráficas. La programación de las mismas forma en conjunto un algoritmo de control capaz de controlar los movimientos de los servomotores desde una aplicación de computadora. La comunicación entre la computadora, en donde se calculan los ángulos de los motores, y la placa microcontroladora, encargada de tomar los ángulos generados por la computadora y transformarlos en movimientos de los servomotores, se realiza mediante comunicación serial.
- Aplicando los conceptos de mecánica adquiridos durante la carrera Ingeniería Mecatrónica y utilizando software de desarrollo ingenieril como Pro Engineer Wildfire 5.0, se finalizó satisfactoriamente el diseño y construcción de la parte mecánica.

- Se desarrollo un prototipo de brazo robótico con 5 grados de libertad para tareas de recoger y colocar programable, mediante programación del mismo por medio de una interfaz grafica amigable e intuitiva.
- El realizar las pruebas de puesta a punto del prototipo, nos permitió corregir ciertos problemas que surgieron en la parte mecánica y electrónica, logrando una puesta a punto final óptima.

## BIBLIOGRAFIA

- Andres Gomez De Silva Garza, e. a. (2008). Introducción a la computación. En e. a. Andres Gomez De Silva Garza, *Introducción a la computación* (pág. 350). Mexico D.F.: Learning Editores.
- ANGULO, J., ANGULO, I., & ROMERO, S. (2005). *Introduccion a la robotica*. Madrid: Thompson paraninfo.
- Arduino. (06 de 09 de 2008). [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). Recuperado el 23 de 10 de 2012, de [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc): [arduino.cc/es/Reference/Servo](http://www.arduino.cc/es/Reference/Servo)
- Ballcels Joseph, R. J. (1997). Automatas Programables. En R. J. Ballcels Joseph, *Automatas Programables* (pág. 456). Marcombo.
- BARRIENTOS, A. e. (2007). *Fundamentos de Robotica. Segunda Edicion*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Baturone, A. O. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Barcelona, España.: Marcombo.
- Dale, W. (2011). Arduino Internals. En W. Dale, *Arduino Internals* (pág. 387). New York: Apress.
- Dzieia Werner, K. J. (1991). curso de electronica 1. Fundamentos electrotecnicos de la electronica. En K. J. Dzieia Werner, *curso de electronica 1. Fundamentos electrotecnicos de la electronica* (pág. 462). München, Alemania: Heinz-Piest-Institut für Handwerkstechnik en la Universidad de Hannover.
- Evans, B. (2011). *Arduino Programming*. New York, USA: Apress.
- Francisco, C. T. (2007). Control numérico y programación. En C. T. Francisco, *Control numérico y programación* (pág. 400). Alfaomega.
- Herrador, R. E. (2009). *Guia de usuario Arduino*. Cordoba, Argentina: Creative Commons.
- International Federation of Robotics. (2012). *World Robotics 2012 Industrial Robots* .

L.Sciavicco, B. S. (2001). *Modeling and Control of robot Manipulators*. Great Britain : McGraw Hil.

Margolis, M. (2011). *Arduino Cookbook 2nd edition*. Sebastopol, California, USA.: O'REILLY.

Muhammad, R. (2004). Power Electronics Handbook. En R. Muhammad, *Power Electronics Handbook* (pág. 893). Pensacola, Florida: Academic Press.

Parametric Technology Corporation. (s.f.). <http://www.ptc.com>. Obtenido de <http://www.ptc.com: http://www.ptc.com/products/proe/wildfire5/index.htm>

Reyes, F. (2011). *Robotica*. Mexico D.F.: Alfaomega.

Riazollah, F. (2010). Servo Motors and Industrial Control Theory. En F. Riazollah, *Servo Motors and Industrial Control Theory* (pág. 225). Theran,Iran: Springer.

SELIG, j. (1992). *Introductory robotics*. Reino Unido: Prentice hall.

Terzidis, K. (2009). *Algorithms for Visual Design*. Induanapolis, USA.: Wiley.

Warren Jhon David, A. J. (2011). Arduino Robotics. En A. J. Warren Jhon David, *Arduino Robotics* (pág. 622). New York: Apress.