

BRAZO ROBOTICO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN UNA LÍNEA DE PRODUCCIÓN



Jorge Andrés Ortega Plaza
Rubén Darío Solarte Bolaños

Universidad del Cauca
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2013

**BRAZO ROBOTICO PARA CLASIFICACIÓN DE PIEZAS EN UNA LÍNEA DE
PRODUCCIÓN**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingenieros en Automática Industrial**

**Jorge Andrés Ortega Plaza
Rubén Darío Solarte Bolaños**

**Director:
Francisco Franco Obando
Magister en Electrónica y Telecomunicaciones**

Universidad del Cauca
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2013**

Nota de Aceptación

Director

Mg. Francisco Franco O.

Jurado

Ing.

Jurado

Ing.

Popayán, Septiembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecemos a Dios que permitió la realización completa del presente proyecto ayudándonos día a día a realizar las cosas de la mejor manera. A nuestros padres y familiares por el apoyo incondicional brindándonos seguridad y confianza en nuestras actividades y finalmente al ingeniero Francisco Franco al realizar sus labores adecuadamente como director del proyecto.

*“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un
esfuerzo total es una victoria completa”.*
Mahatma Gandhi

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	v
1 LA ROBÓTICA INDUSTRIAL	2
1.1 GENERALIDADES	2
1.1.1 Componentes	3
1.1.2 La robótica industrial en la actualidad.....	4
1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES.....	7
1.3 MODELO DE UN ROBOT SERIAL.....	10
1.3.1 Modelo geométrico	12
1.3.2 Modelo geométrico inverso.....	17
1.4 COMUNICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES.....	19
2 DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO	21
2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	21
2.1.1 Espacio de trabajo.....	21
2.1.2 Velocidad de clasificación.....	26
2.1.3 Torque del brazo robótico en configuración estática.....	27
2.2 DISEÑO SOFTWARE.....	32
2.3 DISEÑO DEL EFECTOR FINAL.....	34
2.3.1 Campo magnético debido a un solenoide. [20].....	35
2.3.2 Sistema de sujeción	38
2.4 MODELO GEOMÉTRICO DEL BRAZO ROBÓTICO	38
2.4.1 Modelo geométrico directo	39
2.4.2 Modelo geométrico inverso.....	41
2.5 COMUNICACIÓN	43
2.5.1 Comunicación PLC-Arduino Uno R3.....	47
3 IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO	49
3.1 ESTRUCTURA MECÁNICA	49
3.1.1 Construcción de la base.	50
3.1.2 Construcción primera articulación.....	52
3.1.3 Construcción de la segunda y tercera articulación.....	53

3.1.4	Construcción elemento final.....	55
3.1.5	Elección de contrapesos.....	55
3.1.6	Elección de los servomotores.....	59
3.2	CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO	61
3.2.1	Circuitos reguladores del voltaje de alimentación de los servomotores	62
3.2.2	Circuito de disparo del electroimán.....	64
3.2.3	Diseño de la Tarjeta impresa.....	66
3.2.4	Interfaz Robot-Usuario.....	67
3.3	ENTORNO DE PROGRAMACIÓN DEL ROBOT.....	68
3.4	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL BRAZO ROBÓTICO	69
3.5	COMUNICACIÓN PLC-ROBOT	72
3.6	TRAYECTORIAS EN EL ESPACIO ARTICULAR.....	73
4	RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO	81
4.1	PRUEBAS FUNCIONALES	81
4.2	PRUEBAS CON ESTUDIANTES.....	85
	CONCLUSIONES.....	88
	BIBLIOGRAFÍA.....	1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Suministro anual de robots industriales a nivel mundial.	5
Figura 1.2 Robots industriales operativos a nivel mundial.....	5
Figura 1.3 Número de robots industriales multipropósitos (de todos los tipos) por 10.000 empleados en la industria manufacturera.	6
Figura 1.4 Número de robots industriales multipropósitos (de todos los tipos) por 10.000 empleados en la fabricación de automóviles y en el resto de industrias 2011.....	7
Figura 1.5 Arquitectura Robot Tipo PUMA. (Izquierda: Vista en 3D. Derecha: Vista frontal).	11
Figura 1.6 Representación de entradas y salidas de modelo geométrico directo.	12
Figura 1.7 Convención de parámetros para la representación D-H para un eslabón giratorio.	14
Figura 1.8 Esquema de transformación de coordenadas.	16
Figura 1.9 Representación de entradas y salidas del modelo geométrico inverso.	17
Figura 2.1 Grupo de botellas a clasificar (Color tapa: azul, rojo, blanco y verde)	22
Figura 2.2 Tipos de clasificación por nivel de llenado.	22
Figura 2.3 Tipo de clasificación por etiqueta.	22
Figura 2.4 Diagrama de flujo de la rutina principal de los scripts de procesamiento.....	23
Figura 2.5 Sistema final implementado.	24
Figura 2.6 Posiciones de clasificación sobre la banda principal (vista superior).....	25
Figura 2.7 Vista superior del espacio de trabajo. Clasificador.....	25
Figura 2.8 Posibles dimensiones para el área de trabajo.....	26
Figura 2.9 Esquema brazo robótico de tres grados de libertad.....	27
Figura 2.10 Par mecánico.....	28
Figura 2.11 Vista superior del eje de rotación del motor.	30
Figura 2.12 Esquema de masas que intervienen en el cálculo de pares del segundo y tercer motor.	30
Figura 2.13 Esquema de masas del sistema y contrapesos.	32
Figura 2.14 Esquema básico de robot antropomórfico de 3 grados de libertad.....	33
Figura 2.15 Modelo final del brazo robótico en entorno Solid Edge.	34
Figura 2.16 Líneas de campo magnético para un solenoide.	36
Figura 2.17 Envases con su respectiva arandela.....	38
Figura 2.18 Ubicación de ejes para el método D-H.....	39
Figura 2.19 PLC MicroLogix 1500.....	44
Figura 2.20 Placa Arduino Uno R3. Frontal (a), Respaldo (b).	45
Figura 3.1 Maqueta inicial.....	49
Figura 3.2 Base del Robot.	50
Figura 3.3 Tapa de la base.	51
Figura 3.4 Ubicación base y respectiva tapa.....	51
Figura 3.5 Primer eslabón.....	52
Figura 3.6 Eje de unión.....	53

Figura 3.7 Extremo superior del primer eslabón.	53
Figura 3.8 Segunda y tercera articulación.....	54
Figura 3.9 Electroimán.....	55
Figura 3.10 Esquema del sistema robótico y masa intervinientes	56
Figura 3.11 Contrapeso de la articulación 3.....	57
Figura 3.12 Contrapeso de la articulación 2.....	58
Figura 3.13 Brazo robótico implementado.....	61
Figura 3.14 Circuito regulador de voltaje	63
Figura 3.15 Circuito de diseño del activador del electroimán	64
Figura 3.16 Diseño circuitos reguladores en ARES Proteus.	66
Figura 3.17 Diseño del circuito disparador del electroimán en ARES Proteus	66
Figura 3.18 Vista 3D de la tarjeta electrónica.....	67
Figura 3.19 Circuito Impreso.....	67
Figura 3.20 Interfaz brazo robótico	68
Figura 3.21 Interfaz Arduino	69
Figura 3.22 Modelo en red de Petri del proceso General.	70
Figura 3.23 Modelos de los subprocesos anidados (Armar packs).	70
Figura 3.24 Diagrama Grafcet del funcionamiento del Robot.	71
Figura 3.25 Diagrama Ladder	73
Figura 3.26 Puntos que definen las trayectorias del sistema Robótico.....	74
Figura 3.27 Representación del robot en el plano cartesiano.....	75
Figura 3.28 Aplicación MGI.....	76
Figura 3.30 Diferentes trayectorias tomadas por el brazo robótico.....	78
Figura 3.31 Interpolación lineal entre (x_1, y_1) y (x_2, y_2)	79
Figura 3.32 Posicionamiento de los servomotores en una trayectoria.....	79
Figura 3.33 Comportamiento de un sistema de posicionamiento utilizando interiorización lineal para generación de trayectorias.	80
Figura 4.1 Botellas ubicadas correctamente.	82
Figura 4.2 Agarre correcto de botellas	82
Figura 4.3 Tiempo promedio en cada posición del pack.	83
Figura 4.4 Tiempo promedio en el armado total de un pack de cada color.	84
Figura 4.5 Representación de resultados de la encuesta.....	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Diferentes clasificaciones de robots industriales en el mundo.....	7
Tabla 1.2 Parámetros geométricos de un robot serie.....	16
Tabla 1.3 Tipos de ecuaciones encontradas en el método de Paul.	19
Tabla 1.4 Comunicación recomendada por diferentes fabricantes de robots industriales.	20
Tabla 2.1 Resultados práctica de velocidad de clasificación.....	27
Tabla 2.2 Características del envase a clasificar.	35
Tabla 2.3 Parámetros numéricos de las características geométricas.....	39
Tabla 2.4 Parámetros geométricos del brazo robótico usando D-H.	40
Tabla 2.5 Descripción PLC	44
Tabla 2.6 Especificaciones PLC MicroLogix 1500.....	44
Tabla 2.7 Características placa Arduino Uno R3.....	46
Tabla 2.8 Valores de voltaje según tipo de clasificación.	47
Tabla 2.9 Correspondencia de clases de clasificación.....	47
Tabla 3.1 Requerimientos primer servomotor.	59
Tabla 3.2 Especificaciones Servomotor Hitec HS-805BB	60
Tabla 3.3 Características regulador LM7806	62
Tabla 3.4 Características TIP-32	63
Tabla 3.5 Características transistor 2n3055 NPN	63
Tabla 3.6 Características principales MOC-3021	65
Tabla 3.7 Características TRIAC BTA06.....	65
Tabla 3.8 Estados y Transiciones del diagrama Grafcet.	72
Tabla 3.9 Condiciones para los parámetros del Modelo Geométrico Inverso.....	76
Tabla 3.10 Coordenadas cartesianas que definen las diferentes trayectorias.....	77
Tabla 4.1 Distancia entre botellas según velocidad de la planta.	84

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta el gran interés de las empresas industriales en aumentar su nivel de producción y mejorar cada vez más la calidad de sus productos, se ha incrementado el estudio e implementación de nuevas tecnologías y el mejoramiento de las ya existentes por parte de instituciones educativas y de las mismas empresas, permitiendo así la creación de nuevos proyectos que permiten generar conocimiento y desarrollo en ésta área. Temas como la disminución de accidentes industriales causados por diferentes aspectos, el incremento del nivel de producción, mejoramiento de la calidad de los productos, aumento en la eficiencia del sistema de producción, etc., hacen parte de los beneficios brindados por la utilización de máquinas automatizadas y/o robots industriales.

Actualmente las industrias están aumentando la instalación de sistemas robotizados en sus plantas, como se evidencia en [1]: “En la industria española hay 1.000 robots por cada 10.000 trabajadores, una cifra muy próxima a las 1.600 unidades de Japón”. Por ello, se muestra interesante indagar aún más en la mejora, desarrollo e implementación de tales sistemas, haciendo referencia en este documento a brazos robóticos industriales.

En la literatura se estudia extensamente los robots industriales de diferentes tipos (Cartesianos, cilíndricos, antropomórficos, poli-articulados, etc., y entre ellos el SCARA como el YK500TW de YAMAHA y el PUMA como el PUMA 560) los cuales forman parte fundamental del desarrollo económico y productivo en los sistemas industriales, así como en el entorno social. Es por esto que desde el programa de ingeniería en automática se debe conocer y comprender algunos de los robots más frecuentes en los sistemas automatizados de producción y asistencia técnica.

En este proyecto se diseñó e implementó un robot serial de articulaciones rotoides el cual permite la selección de productos en una línea de clasificación sobre una banda transportadora con la cual cuenta el laboratorio de procesos (LCP) de la Universidad del Cauca. El documento inicia con un enfoque de la robótica industrial, su impacto y principales características técnicas en el ámbito productivo, posteriormente se explica la planta de clasificación por visión artificial del laboratorio de procesos sobre la cual se implementó el sistema robótico, el diseño del brazo robótico para el espacio de trabajo y tareas a realizar. En el tercer capítulo se explica su implementación y armado tanto de la estructura física del brazo robótico como de los diferentes circuitos requeridos para su correcto funcionamiento, además se detalla su comunicación e interacción con el sistema de control de la planta. Y en el cuarto capítulo se tienen los resultados de su implementación y las conclusiones del trabajo.

1 LA ROBÓTICA INDUSTRIAL

En este primer capítulo se estudiarán conceptos básicos acerca de la temática que rodea a los robots industriales cubriendo desde el significado de la palabra *robot*, sus inicios, hasta el modelo matemático de los mismos. Se mencionan fundamentos iniciales acerca de la robótica industrial, ciencia encargada de su estudio, mostrando así algunas de las diferentes clasificaciones en las que se encuentran; además, se mostrará también los componentes principales que conforman un robot industrial.

Posteriormente se determina cuál es el estado actual de la robótica industrial haciendo análisis de estadísticas que exponen el suministro anual de robots industriales, es decir, se conocen los niveles de acogida que tiene el uso de robots en la industria y en qué área se concentra su uso y finalmente, se expondrán algunos métodos que son usados para la obtención del modelo matemático de los diferentes robots industriales.

1.1 GENERALIDADES

Dentro de las innumerables posibilidades con las que cuenta una empresa para el mejoramiento de sus niveles de producción, mejora de la calidad, aumento de la eficiencia en la elaboración de productos, etc., se encuentra una que básicamente consiste en la implementación de dispositivos mecánicos en campo que actúan de manera automática y sistemática realizando múltiples tareas cuyo número y variedad depende de la capacidad del mismo y de la programación adherida en su controlador o procesador. Tales dispositivos son conocidos en el sector industrial como robots industriales, que además de brindar factores importantes para la empresa como el aumento en la velocidad de elaboración de productos, aumentando así la capacidad productiva de una empresa, su implementación y buen uso puede generar un crecimiento considerable para la misma.

El estudio, diseño y construcción de los robots industriales está a cargo de la robótica industrial, que actualmente está siendo una de las mejores alternativas de avance para las empresas, razón por la cual, se ha ido posicionando muy bien en el mercado en los últimos años, como se mostrará posteriormente en las estadísticas de venta de robots industriales a nivel mundial.

“La palabra robot fue sugerida en 1920 por K. Kapek, autor checo, en su obra R.U.R. (Robots Industriales de Rossum); se deriva de la palabra checa ‘robota’, que significa ‘trabajo forzado’ o ‘trabajador’, pero no es eso exactamente lo que se entiende hoy en día como el significado de esta palabra. Actualmente se define como robot a un manipulador multifuncional, reprogramable, diseñado para mover

materiales, piezas, herramientas u otros dispositivos especializados, a través de distintos movimientos, para el desempeño de una variedad de tareas.” [2], [3].

La definición anterior dada por [2] y [3], hace hincapié en que un robot es una máquina que tiene la capacidad de realizar acciones o tareas de manera sistematizada y automáticamente, mediante la programación adherida en su procesador. Tareas como pintar, soldar y trasladar piezas o distintos elementos de un lugar a otro en su rango de trabajo son sus principales acciones y para las cuales presentan una excelente precisión.

Por lo general, un robot industrial lo define la organización ISO¹ de la siguiente forma: “una máquina formada por un mecanismo de motores y controladores, que incluye varios grados de libertad, generalmente tiene el aspecto de uno o varios brazos terminados en una muñeca, capaces de sujetar una herramienta, pieza o dispositivo de inspección. En particular, su unidad de control usa chips de memoria y a veces puede emplear aditamentos tipo sensores, para captar información del ambiente y las circunstancias de trabajo. Estas máquinas se suelen diseñar para ejecutar una operación repetitiva y se pueden adaptar a otras operaciones, es decir son reprogramables”. [2]

Por tanto, la principal diferencia entre un robot y una máquina es que en el robot se puede programar y reprogramar su función, cambiar de función básica cuando sea requerido y cuantas veces sea necesario, mientras que la máquina solo se diseña para una función específica. Por ello la implementación de robots en las diferentes industrias es una muy buena opción de mejorar sus niveles de producción aumentando así la flexibilidad en el sistema productivo, además de otros beneficios.

1.1.1 Componentes

Los principales componentes de un brazo robótico industrial son:

- El Manipulador
- Unidad de control
- El elemento final o herramienta del extremo.
- Fuente de poder

Las definiciones de cada componente dadas por [4], plantean que el *brazo mecánico o manipulador* es la parte del robot que se encarga de realizar los movimientos necesarios para llevar a cabo la tarea. El brazo está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones, la *unidad de control*, generalmente una computadora es la encargada de controlar los distintos

¹ ISO: Organización Internacional de Normalización.

componentes del robot. Ésta puede almacenar las trayectorias a seguir por parte del robot. También se encarga de controlar la comunicación tanto interna como externa. El brazo mecánico por sí solo poco o nada puede hacer. Necesita de una *herramienta* para poder realizar una tarea. Las herramientas varían de acuerdo al tipo de tarea, un ejemplo de éstas son las pinzas, las pistolas de pintura o de soldadura. *La fuente de poder*, no es necesariamente única ya que puede ser: eléctrica, neumática o hidráulica.

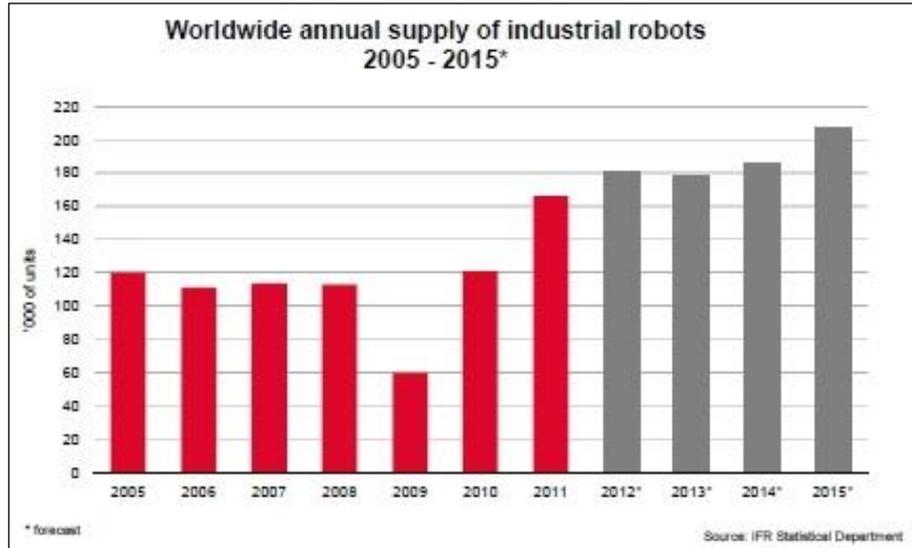
Una característica bastante importante es la de los grados de libertad que posee un robot, los cuales definen cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación del robot con respecto a la anterior. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. Hay que tener en cuenta que el número de grados de libertad del robot suele coincidir con el número de articulaciones que se compone. [5]

1.1.2 La robótica industrial en la actualidad

Actualmente, la robótica industrial se ha posicionado en los primeros lugares del mercado de tecnologías industriales que ayudan al crecimiento de las empresas, debido a que éstas empresas están incrementando el uso de la robotización industrial como tecnología de crecimiento, tal como se muestra en los resultados expuestos por la IFR (International Federation of Robotics) en el 43 Simposio Internacional en Robótica, ISR (*International Symposium on Robotics*) realizada en Taipei, Taiwan en el año 2012, en su artículo titulado “2011: El mejor año de la Robótica Industrial”: “Luego de años de baja durante el 2008 y 2009, y un buen año el 2010, los números arrojan que el 2011 ha sido el mejor año de ventas registrado desde 1961 (desde que el primer robot industrial apareció), totalizando 166.028 unidades anuales, con ventas valorizadas en 25.000 millones de dólares.” [6].

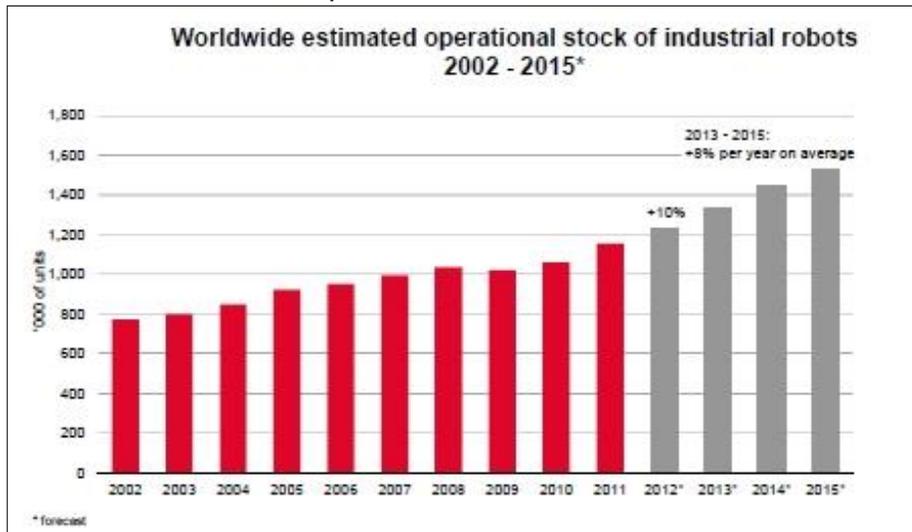
Además, en el mismo artículo, se plantea que para el período 2013-2015, se espera un crecimiento sostenido del 8% en promedio, llegando a finales de 2015 a una venta anual de más de 200.000 unidades con 1.500.000 robots industriales operativos, como se ilustra en la Figura 1.1 y la Figura 1.2:

Figura 1.1 Suministro anual de robots industriales a nivel mundial.



Fuente: Departamento de Estadísticas del IFR.

Figura 1.2 Robots industriales operativos a nivel mundial.

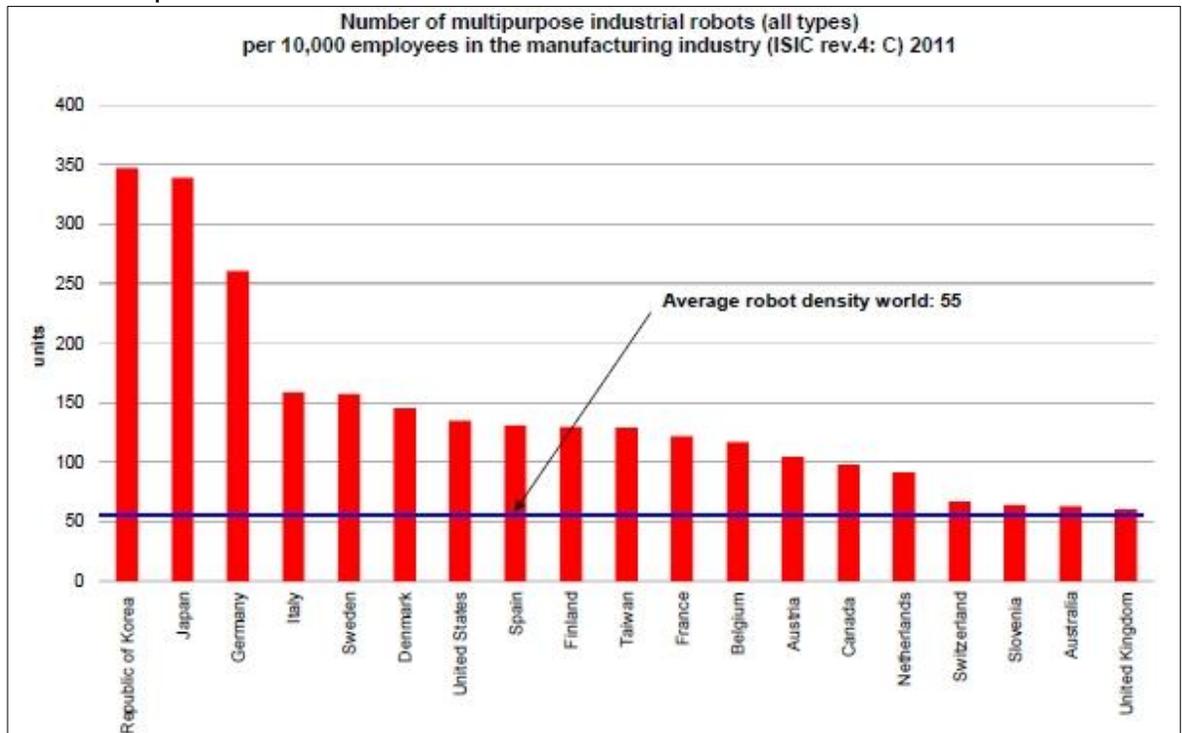


Fuente: [6].

Otro resultado importante expuesto en el simposio en Taipei, Taiwan, es que los países que cuentan con mayor número de robots operativos del mundo, es decir, los países más robotizados en el área manufacturera son: República de Corea, Japón y Alemania. “Siempre en el mismo sector industrial, podemos encontrar que cada 100 trabajadores existen cerca de 3,5 robots industriales para la República de Corea y Japón y 2,5 robots industriales en el caso de Alemania.” [6]

“El promedio mundial se establece en 55 robots industriales por cada 10.000 trabajadores del área de manufactura. Esta densidad robótica se dispara si se analiza por sector industrial, donde la industria automotriz, ligada desde los inicios a la robótica industrial, tiene cerca de 16 robots industriales por cada 100 trabajadores en el caso de Japón.” [6]

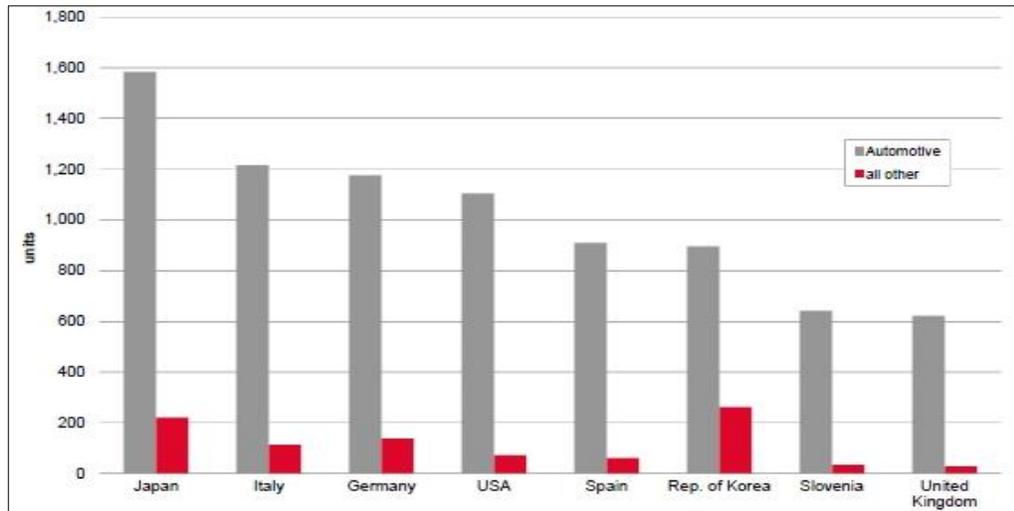
Figura 1.3 Número de robots industriales multipropósitos (de todos los tipos) por 10.000 empleados en la industria manufacturera.



Fuente: [6].

Sin embargo, el área en la que más se hace uso de los robots industriales sigue siendo la fabricación de automóviles, tal como se puede apreciar en la Figura 1.4.

Figura 1.4 Número de robots industriales multipropósitos (de todos los tipos) por 10.000 empleados en la fabricación de automóviles y en el resto de industrias 2011



Fuente: [6].

1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES

En el mundo se encuentran varias asociaciones de Robótica Industrial tales como la IFR², la AFRI³ entre otras. Dichas asociaciones clasifican los robots industriales dependiendo de sus diferentes puntos de vista, por tal motivo existen incontables tablas de clasificación de robots industriales [1], en la Tabla 1.1 se muestra las clasificaciones de Robots Industriales más adoptadas en el mundo [7]:

Tabla 1.1 Diferentes clasificaciones de robots industriales en el mundo.

Tipo de clasificación	Clasificación de robots industriales	Definición
Según Guilcaso en [5].	<i>Manipuladores</i>	<p>Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos, de los siguientes modos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Manual: Cuando el operario controla directamente la tarea del manipulador. ✓ De secuencia fija: cuando se repite, de forma invariable, el proceso de trabajo preparado previamente. ✓ De secuencia variable: Se pueden alterar algunas características de los ciclos de trabajo.

² IFR: Federación Internacional de Robótica (International Federation of Robotics).

³ AFRI: Asociación Francesa de Robótica Industrial.

	<i>De repetición y aprendizaje</i>	Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. En este tipo de robots, el operario en la fase de enseñanza, se vale de una pistola de programación con diversos pulsadores o teclas, o bien, de joysticks, o bien utiliza un maniquí, o a veces, desplaza directamente la mano del robot. Los robots de aprendizaje son los más conocidos, hoy día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de "gestual".
	<i>Con control por computador</i>	Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un computador, que habitualmente suele ser un microordenador. En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la máquina, cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por computador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con las que se puede confeccionar un programa de aplicación utilizando solo el terminal del computador, no el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea sin la intervención del manipulador.
	<i>Robots inteligentes</i>	Son similares a los del grupo anterior, pero, además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (auto programable). La visión artificial, el sonido de máquina y la inteligencia artificial, son las ciencias que más están estudiando para su aplicación en los robots inteligentes.
	<i>Micro-robots</i>	Se fabrican con fines educacionales, de entretenimiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots a un precio muy asequible y, cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.
De acuerdo a la IFR. [1]	<i>Robot secuencial</i>	
	<i>Robot de trayectoria controlable</i>	
	<i>Robot adaptativo</i>	
	<i>Robot tele manipulado</i>	
Según la AFRI. [1]	<i>Tipo A: manipuladores</i>	Manipulador con control manual o telemando: Son robots multifunción, que operan con sistemas mecánicos básicos, y permiten gobernabilidad en sus movimientos. Deben ser utilizados en funciones sencillas y repetitivas, como levantar mercancía y manipular objetos como cajas, botellas, bultos entre otros. Su operabilidad puede realizarse en forma manual, es decir se controla por una o más personas a través de control remoto y cuentan con tres y cuatro grados de libertad. Capacidad de carga

		máxima 5.0 kg. Alcance del brazo: entre 190 y 500mm.
	<i>Tipo B: computarizados de precisión por controlador lógico programable tipo plc</i>	Manipulador automático con ciclos pre ajustados: cuentan con regulación mediante fines de carrera o alcance de brazo, son muy precisos, tienen un mayor recorrido y fuerza de brazo que los Tipo A y se regulan con un control PLC. Se utilizan para paletizado, corte y soldadura. Tienen cuatro grados de libertad (SCARA). Capacidad de carga máxima 13.0 kg. Alcance del brazo: entre 190 y 1.000mm.
	<i>Tipo C: computarizados por CNC</i>	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto: Son equipos más avanzados y fuertes, que ejecutan instrucciones previamente programadas por CNC, son muy precisos y se utilizan para trabajos exigentes, durante largos períodos de trabajo y en la producción en serie. Ejemplo: mecanización, soldadura, moldeo, paletizado y fabricación de herramientas, entre otras. Modelos de cinco y seis grados de libertad. Capacidad de carga máxima 1.000 kg. Alcance del brazo hasta 3200 mm.
	<i>Tipo D: inteligentes (sensoriales)</i>	Robot capaz de adquirir datos de su entorno: Equipos que mediante avanzados sensores de calor, movimiento y espacio, recogen información de su entorno y readaptan sus tareas en función de esta. Son capaces de sortear obstáculos, interactuar con otras máquinas y realizar complejas y peligrosas tareas, como el corte y la soldadura de precisión y la manipulación de sustancias tóxicas o radioactivas. Tienen seis grados de libertad, capacidad de carga máxima 1.000 kg., alcance del brazo hasta 3200 mm, una precisión de $\pm 0,04$ mm y una velocidad máxima de 9.500 mm/s.
Por generaciones [8].	<i>1ª Generación:</i>	Repite la tarea programada secuencialmente.
	<i>2ª Generación</i>	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia.
	<i>3ª Generación</i>	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural.
De acuerdo al trabajo que realizan [8].	<i>Clase 1</i>	Coger y dejar.
	<i>Clase 2</i>	Seguir trayectoria.
	<i>Clase 3</i>	Montaje de detalles.
De acuerdo a la manera de adecuarse al ambiente interactuante [8].	<i>Robots Manuales</i>	Exigen que el movimiento de sus elementos sea controlado por el hombre.
	<i>Robots autónomos de secuencia fija</i>	Permiten gobernar el movimiento de sus elementos en forma autónoma pero no es posible alterar sus operaciones o secuencia de operaciones
	<i>Robots autónomos de secuencia variable</i>	Permite gobernar el movimiento de sus elementos en forma autónoma y además, es posible alterar algunas de las características de los ciclos de trabajo.
	<i>Robots programables</i>	Pueden ser programados mediante lenguajes específicos o mediante un proceso de aprendizaje en el cual un operador enseña inicialmente una secuencia de movimientos, el sistema las memoriza y se limita a repetirla indefinidamente.

	<i>Robots inteligentes</i>	Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales controlados por computador, capaces de relacionarse con su entorno a través de sensores y de tomar decisiones en tiempo real. Pueden analizar su entorno y reaccionar ante sus modificaciones o alteraciones, para ello requiere del concurso de sus sistemas de análisis y control, de sensores adecuados, de control de esfuerzos, de seguimiento de trayectorias, de reconocimiento de imágenes, entre otros.
Respecto al control de la trayectoria del robot [8].	<i>Control de trayectoria punto a punto</i>	Con el control punto a punto, el robot es programado para realizar una pausa en cada punto para planear el próximo paso en una trayectoria predeterminada. Un robot controlado punto a punto ofrece mayor precisión en términos de repetibilidad.
	<i>Control de trayectoria continúa</i>	Este robot tiene un movimiento más suave a lo largo de la trayectoria definida pero disminuye la velocidad en los recorridos, lo cual es una función del tamaño de los pasos calculados por el computador maestro en tiempo real, usando métodos de interpolación.
Basada en la configuración de sus articulaciones [9], [10].	<i>Robots de coordenadas cilíndricas (Robot Cilíndrico)</i>	De configuración RPP ⁴ .
	<i>Robot de coordenadas Esféricas (Robot Esférico):</i>	De configuraciones RRP.
	<i>Robot de Coordenadas Cartesianas (Robot cartesiano)</i>	De Configuración PPP.
	<i>Robot de Brazo Articulado (con articulaciones rotacionales)</i>	De configuración RRR.
	<i>Robot SCARA</i>	Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales. El SCARA también puede hacer un movimiento lineal (mediante su tercera articulación).

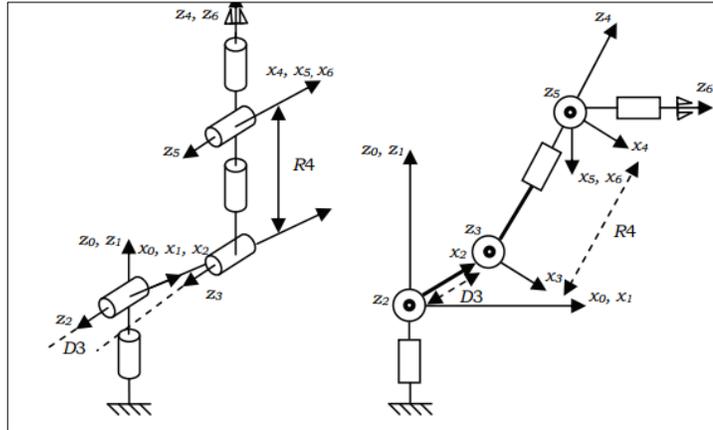
Fuente: Elaboración propia.

1.3 MODELO DE UN ROBOT SERIAL

Lo más común en la industria es encontrar un robot de configuración serial, por tanto es de gran importancia resaltar cómo se modela este tipo de robots. La Figura 1.5 muestra un robot PUMA de 6 grados de libertad que representa un claro ejemplo de un robot serial industrial.

⁴ Tipos de articulaciones de un robot: R: Rotacional, gira sobre un eje. P: Prismática, Se traslada sobre un eje.

Figura 1.5 Arquitectura Robot Tipo PUMA. (Izquierda: Vista en 3D. Derecha: Vista frontal).



Fuente: [11], Pág. 38.

El modelo de un robot representa el comportamiento de este, por tanto es de gran importancia para prever sus posibles reacciones y así mismo poder programarlo para una determinada actividad.

El modelo matemático es la estructura fundamental que sustenta de manera teórica la estructura física y dinámica del robot [12], este describe la relación entre un conjunto de ángulos de unión y las coordenadas del órgano terminal y viceversa [13]. Existen varios modelos matemáticos del robot entre ellos:

Modelo geométrico: Representa el robot a partir del estudio de los movimientos con respecto a un eje de referencia, sin considerar las fuerzas que actúan sobre el sistema. Existen dos tipos de análisis, geometría directa y geometría inversa. [8]

Modelo cinemático: El modelo cinemático describe las velocidades de las articulaciones del robot en el espacio operacional (cartesiano) en función de las velocidades de estas articulaciones expresadas en el espacio articular [11].

Modelo dinámico: El modelo dinámico contiene toda la información (geometría y dinámica) del robot. Matemáticamente se define como la relación entre las fuerzas aplicadas a los actuadores y las posiciones, velocidades y aceleraciones articulares [11].

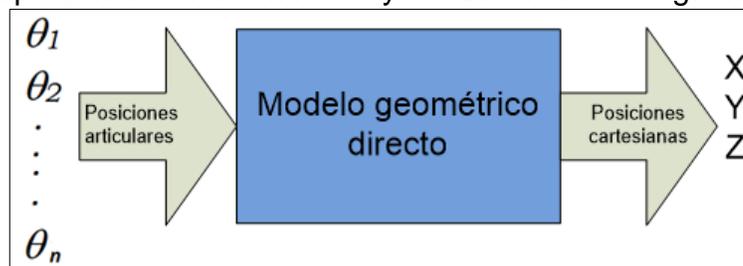
Para el diseño y construcción del brazo robótico de este trabajo se tienen en cuenta el modelo geométrico directo e inverso, pero no se hace uso de los modelos dinámico directo e inverso ni del modelo cinemático, ya que el robot será construido y las variables físicas (velocidad y aceleración) del robot ya vienen predeterminadas por la clase de servomotores a utilizar.

El modelo geométrico directo permite determinar las coordenadas cartesianas en función de las coordenadas articulares del brazo robótico, es decir, con éste modelo se puede hallar la ubicación del efector final teniendo en cuenta que se conocen los ángulos de cada articulación. Mientras que el modelo geométrico inverso permite determinar los ángulos que cada articulación debe tener para ubicar el efector final en una posición deseada, este punto deseado se encuentra en coordenadas cartesianas. Estos dos modelos se explican a continuación.

1.3.1 Modelo geométrico directo

Existen dos métodos para representar geoméricamente un robot, es decir, dos maneras de representar la distribución geométrica del robot en un sistema de coordenadas referenciado a cada articulación: el método de Denavit-Hartenberg (1955), y el método de Khalil-Kleinfinger (1986) [11]. El proceso que sigue cada uno de estos dos métodos es explicado posteriormente.

Figura 1.6 Representación de entradas y salidas de modelo geométrico directo.



Fuente: Elaboración propia. Marzo 2013.

El Modelo Geométrico Directo (MGD) expresa la posición y orientación del efector final, es decir las coordenadas operacionales⁵ del robot, en función de sus coordenadas articulares⁶. [12]

Modelo geométrico directo usando Denavit-Hartenberg D-H [14]

En general, un robot de n grados de libertad formado por n eslabones unidos por n articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le asocia un sistema de referencia solidario a él y, utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot.

⁵ *Coordenadas Operacionales*: Representan la posición de un objeto en el espacio tridimensional.

⁶ *Coordenadas Articulares*: O coordenadas cartesianas, representan la posición de un objeto en el espacio en función de la posición de las articulaciones del robot.

Cuando se consideran todos los grados de libertad, a la matriz 0A_n se suele representar como la matriz T . Así, dado un robot de tres grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dada por la matriz T :

$$MGD = U_0 = T = {}^0A_j = ({}^0A_1)({}^1A_2)({}^2A_3) \dots ({}^{j-1}A_j) \quad (1.1)$$

Según la representación D-H, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permitan relacionar el sistema de referencia del elemento i con el sistema del elemento $i - 1$. Las transformaciones en cuestión son las siguientes:

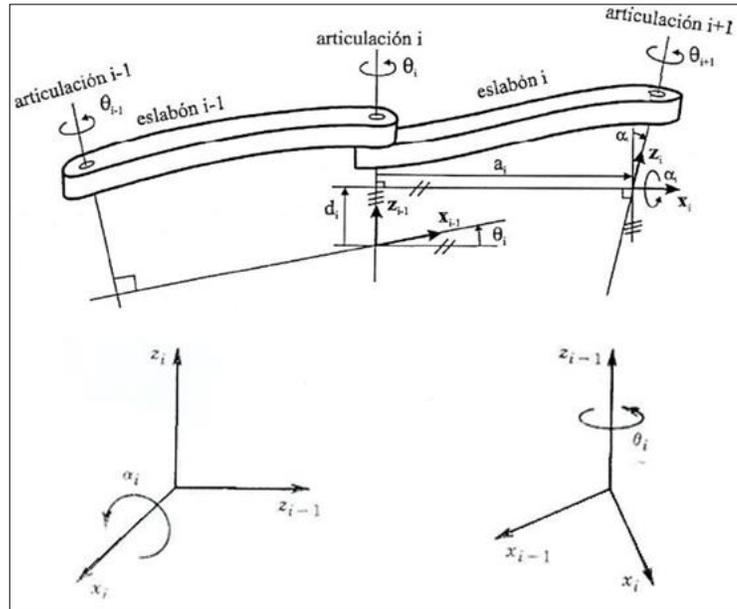
1. Rotación alrededor del eje z_{i-1} un ángulo θ_i .
2. Traslación a lo largo de z_{i-1} una distancia d_i ; vector $d_i (0,0, d_i)$.
3. Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector $a_i (0,0, a_i)$.
4. Rotación alrededor del eje x_i , un ángulo α_i .

Dónde:

- θ_i Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , usando la regla de la mano derecha. Se trata de un parámetro variable en articulaciones giratorias.
- d_i Es la distancia a lo largo de z_{i-1} desde el origen de sistema de coordenadas $(i - 1)$ –ésimo, hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . Se trata de un parámetro variable en articulaciones prismáticas.
- a_i Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i –ésimo en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .
- α_i Es el ángulo de separación entre el eje z_{i-1} y el eje z_i medido en un plano perpendicular al eje x_i , utilizando la regla de la mano derecha.

Los cuatro parámetros de D-H $(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i)$ dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y siguiente.

Figura 1.7 Convención de parámetros para la representación D-H para un eslabón giratorio.



Fuente: [14].

Algoritmo de Denavit- Hartenberg para la obtención del modelo:

DH1. Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot.

DH2. Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).

DH3. Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

DH4. Para i de 0 a $n - 1$, situar el eje z_i , sobre el eje de la articulación $i + 1$.

DH5. Situar el origen del sistema de la base (s_0) en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .

DH6. Para i de 1 a $n - 1$, situar el sistema (s_i) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría (s_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos (s_i) se situaría en la articulación $i + 1$.

DH7. Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .

DH8. Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .

DH9. Situar el sistema (s_n) en el extremo del robot de modo que z_0 coincida con la dirección de z_{i-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .

DH10. Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.

DH11. Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar (s_{i-1}) para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.

DH12. Obtener a_i ; distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo (s_{i-1}) para que su origen coincidiese con (s_i).

DH13. Obtener α_i como el ángulo que habría que girar en torno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo (s_{i-1}) coincidiese totalmente con (s_i).

DH14. Obtener las matrices de transformación ${}^{i-1}A_i$.

DH15. Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1 {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$

DH16. La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

Una vez obtenidos los parámetros D-H, el cálculo de las relaciones entre los eslabones consecutivos viene dado por la matriz que se obtiene como producto de un conjunto de matrices A .

Modelo geométrico directo usando Khalil-Klienfinger

Antes de utilizar este método se debe realizar la ubicación tanto de los ejes x como z sobre las articulaciones del robot (el eje y depende de la ubicación de estos dos). Para esto se deben tener en cuenta dos consideraciones [11]:

- El eje z_j es el eje de la articulación j , es decir el eje sobre el cual rota o se traslada la articulación.
- El eje x_j es perpendicular común a los ejes z_j y z_{j+1} (esto implica que el eje x_j forma un ángulo de 90° con cada uno de los ejes z_j y z_{j+1} , y que además los toque directamente).

Se definen cinco parámetros geométricos para cada una de las articulaciones del robot:

σ_j : Tipo de articulación ($\sigma_j = 0$ si la articulación es rotoide; $\sigma_j = 1$ si la articulación es prismática).

α_j : Ángulo entre los ejes z_{j-1} y z_j correspondiente a una rotación alrededor de x_{j-1} .

d_j : Distancia entre z_{j-1} y z_j a lo largo de x_{j-1} .

θ_j : Ángulo entre los ejes x_{j-1} y x_j correspondiente a una rotación alrededor de z_j .

r_j : Distancia entre x_{j-1} y x_j a lo largo de z_j .

Lo anterior con el fin de encontrar la Tabla 1.2 de parámetros del robot serie definida así:

Tabla 1.2 Parámetros geométricos de un robot serie.

j	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	σ_1	α_1	d_1	θ_1	r_1
2	σ_2	α_2	d_2	θ_2	r_2
3	σ_3	α_3	d_3	θ_3	r_3
...
n	σ_n	α_n	d_n	θ_n	r_n

Fuente: [12], pág. 23.

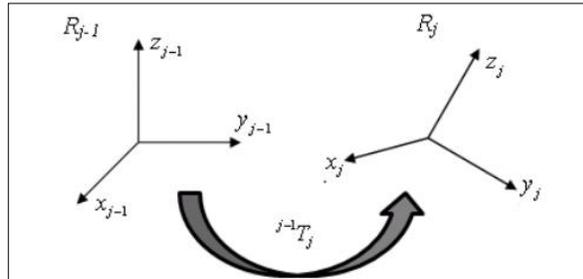
Donde n representa el número de articulaciones del robot.

Estos datos dan lugar a la matriz de transformación⁷:

$${}^{j-1}T_j \quad (1.2)$$

La cual es la matriz de transformación del marco de coordenadas R_j ⁸ en el marco R_{j-1} . En la Figura 1.8 se presenta un esquema de transformación de coordenadas, para mayor claridad se puede acudir a [12].

Figura 1.8 Esquema de transformación de coordenadas.



Fuente: [12], pág. 24.

Por tanto, la matriz que define R_j en R_{j-1} según [12] es:

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \text{Cos}\theta_j & -\text{Sen}\theta_j & 0 & d_j \\ \text{Cosa}_j\text{Sen}\theta_j & \text{Cosa}_j\text{Cos}\theta_j & -\text{Sen}\alpha_j & -r_j\text{Sen}\alpha_j \\ \text{Sen}\alpha_j\text{Sen}\theta_j & \text{Sen}\alpha_j\text{Cos}\theta_j & \text{Cosa}_j & r_j\text{Cosa}_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

⁷ Matriz ${}^{j-1}T_j$: Matriz de transformación. Transformación de coordenadas entre dos sistemas de referencia.

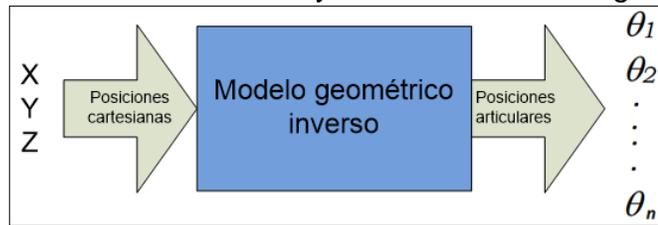
⁸ Matriz R_j : Matriz de rotación que define la orientación del sistema vectorial con respecto al origen.

Ya teniendo las matrices ${}^{j-1}A_j$ para la j articulaciones, es necesario multiplicarlas para obtener la matriz 0A_j y así obtener el MGD del robot serie.

$$MGD = {}^0T_j = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \dots {}^{j-1}A_j \quad (1.4)$$

1.3.2 Modelo geométrico inverso

Figura 1.9 Representación de entradas y salidas del modelo geométrico inverso.



Fuente: Elaboración propia.

Este modelo provee todas las soluciones posibles del cálculo de las coordenadas articulares, correspondientes a una situación cartesiana determinada. Es decir, para una posición y orientación deseadas del órgano terminal, el modelo geométrico inverso entrega todas las posibles soluciones de las posiciones articulares con el fin de alcanzar esa situación deseada. [11]

Para hallar el modelo geométrico inverso existen varios métodos (Buchberger, 1987; Raghavan and Roth, 1990; Manocha and Canny, 1992), el más general y conveniente a la mayoría de robots industriales es el método de Paul (1981). Para la obtención del MDI⁹ se utilizara el método de Paul utilizado en el libro de Oscar Vivas como se ve en [11].

MÉTODO DE PAUL

Este método trata de manera simple cada articulación por separado, obteniéndose todas las posibles soluciones angulares para cada articulación [15]. Dado un robot serial con la matriz de transformación:

$$U_0 = {}^0T_j = {}^0A_1 \cdot {}^1A_2 \cdot {}^2A_3 \dots {}^{j-1}A_j \quad (1.5)$$

Y sea U_0 la situación deseada, es decir la posición y orientación que se desea tenga el órgano terminal. Esta matriz es por lo tanto perfectamente conocida:

⁹ MGI: Modelo Geométrico Inverso.

$$U_0 = \begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x & P_x \\ S_y & n_y & a_y & P_y \\ S_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Dónde:

- s_x : Rotación del eje x actual respecto al eje x anterior.
- s_y : Rotación del eje x actual respecto al eje y anterior.
- s_z : Rotación del eje x actual respecto al eje z anterior.
- n_x : Rotación del eje y actual respecto al eje x anterior.
- n_y : Rotación del eje y actual respecto al eje y anterior.
- n_z : Rotación del eje y actual respecto al eje z anterior.
- a_x : Rotación del eje z actual respecto al eje x anterior.
- a_y : Rotación del eje z actual respecto al eje y anterior.
- a_z : Rotación del eje z actual respecto al eje z anterior.

Se busca entonces hallar las posiciones de las articulaciones del robot con el fin de que el órgano terminal se sitúe en U_0 . La mayoría de veces las ecuaciones que resultan mediante la aplicación de este método son difíciles de resolver, por tanto se recomienda contar con un software especializado para llegar a las soluciones deseadas.

Por ejemplo para un robot de 6 grados de libertad se procede como sigue:

- 1) Se multiplica a la izquierda de cada parte de la ecuación (1.5) por 1A_0 . Con esto se logra eliminar la matriz 0A_1 en la parte derecha de la ecuación, quedando así:

$${}^1A_0 U_0 = {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \quad (1.7)$$

De esta forma el término de la izquierda estará en función de los elementos de U_0 y de la variable q_1 . Se despeja entonces esta variable igualando los elementos de las matrices resultantes a ambos lados de la igualdad.

- 2) Una vez despejada la variable q_1 se multiplica a la izquierda de cada ecuación por 2A_1 , obteniéndose por despeje la variable q_2 . Se continúa sucesivamente con las multiplicaciones a la izquierda de cada ecuación hasta que todas las variables hayan sido despejadas.
- 3) La sucesión completa del cálculo para un robot de seis grados de libertad será:

$$U_0 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6$$

$$\begin{aligned}
{}^1A_0U_0 &= {}^1A_2{}^2A_3{}^3A_4{}^4A_5{}^5A_6 \\
{}^2A_1U_1 &= {}^2A_3{}^3A_4{}^4A_5{}^5A_6 \\
{}^3A_2U_2 &= {}^3A_4{}^4A_5{}^5A_6 \\
{}^4A_3U_3 &= {}^4A_5{}^5A_6 \\
{}^5A_4U_4 &= {}^5A_6
\end{aligned}
\tag{1.8}$$

La metodología aconseja que cada vez se comparen solamente los vectores de posición de cada lado de la igualdad, tratando de despejar la variable buscada. Si no es posible despejar, realizar una nueva multiplicación a la izquierda, y así sucesivamente. En caso de quedar variables por encontrar, volver a la primera multiplicación pero esta vez comparar los términos de la matriz de orientación. En cada caso lo que se pretende es, o bien despejar completamente la variable, o bien obtener una ecuación a partir de la cual sea posible el despeje utilizando algún tipo de software especializado. En la Tabla 1.3 se muestran los 8 tipos de ecuaciones que pueden resultar de la implementación del método de Paul.

Tabla 1.3 Tipos de ecuaciones encontradas en el método de Paul.

Tipo 1	$Xr_j = Y$
Tipo 2	$XS\theta_i + YC\theta_i = Z$
Tipo 3	$X1S\theta_i + Y1C\theta_i = Z1$ $X2S\theta_i + Y2C\theta_i = Z2$
Tipo 4	$X1r_jS\theta_i = Y1$ $X2r_jC\theta_i = Y2$
Tipo 5	$X1S\theta_i = Y1 + Z1r_j$ $X2C\theta_i = Y2 + Z2r_j$
Tipo 6	$WS\theta_j = XC\theta_i + YS\theta_i + Z1$ $WC\theta_j = XS\theta_i - YC\theta_i + Z2$
Tipo 7	$W1C\theta_j + W2S\theta_j = XC\theta_i + YS\theta_i + Z1$ $W2S\theta_j - W2C\theta_j = XS\theta_i - YC\theta_i + Z2$
Tipo 8	$XC\theta_i + YC(\theta_i + \theta_j) = Z1$ $XS\theta_i + YS(\theta_i + \theta_j) = Z2$

Con r_i como la variable de una articulación prismática y $S\theta_i, C\theta_i$ como el seno y coseno de la variable de articulación rotoide respectivamente.

1.4 COMUNICACIÓN DE LOS ROBOTS INDUSTRIALES

“Otro importante factor a considerar al implementar sistemas robóticos, es el sistema de comunicaciones con que se cuente. La función de este sistema es el ingreso de programas, grabarlos y recuperarlos desde un computador y el intercambio de información con otros computadores o máquinas”. [8]

Actualmente en la industria la comunicación más comúnmente usada en los robots industriales como lo presenta COGNEX¹⁰ en su informe de guía de ventas [16] son el Ethernet y la comunicación Serial, en tal informe se presenta la siguiente tabla en la que se identifican el tipo de comunicación recomendada para robots industriales de diferentes fabricantes.

Tabla 1.4 Comunicación recomendada por diferentes fabricantes de robots industriales.

Fabricante	Comunicación Recomendada
ABB	Serial o Ethernet
Adept	Ethernet
Denso	Serial o Ethernet
Epson	Ethernet
Fanuc	Serial o Ethernet
IAI	Ethernet
Kuka	Serial
Motoman	Serial
Mitsubishi	Serial o Ethernet
Nachi	Serial o Ethernet
Kawasaki	Ethernet
Staubli	Ethernet

Fuente: [16], Pág. 5.

Para la comunicación que corresponde a este proyecto se pretende implementar el tipo de comunicación serial, debido a que el PLC que controla la planta en donde se implantara el Robot, cuenta con un puerto serie libre para su uso.

¹⁰ COGNEX, Brinda dispositivos y sistemas de visión industrial a nivel mundial.

2 DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO

En éste segundo capítulo se mostrarán las consideraciones de diseño establecidas en la planta de clasificación que se tomarán como base para la realización del diseño de cada una de las piezas del brazo robótico determinando sus longitudes y formas haciendo uso de software especializado de diseño y se expondrán tales piezas, se mostrarán las diferentes velocidades a las cuales se transportan los elementos en la planta de clasificación para determinar la velocidad de funcionamiento del brazo y así mismo los requerimientos de funcionamiento de los tres servomotores. Finalmente se dará a conocer la forma en la cual se hará comunicar el brazo robótico con el PLC de la planta.

2.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

2.1.1 Espacio de trabajo

Debido a que el brazo robótico será ubicado en la planta de clasificación del laboratorio de control de procesos, el espacio de trabajo estará limitado por el que la planta brinde para ello y por tanto, se expondrá algunos aspectos importantes de la misma, la cual es un proyecto realizado por María Fernanda Pérez y Oscar Duvier Velasco, estudiantes del programa de Ingeniería en Automática Industrial de la Universidad del Cauca en el año 2011, tal como se muestra en la monografía del proyecto que se muestra en [17]. Allí se muestra toda la información correspondiente al diseño, elaboración y construcción de la planta de clasificación, incluyendo sus diferentes sistemas para su correcto funcionamiento. De la monografía mencionada, del artículo elaborado por los mismos autores acerca del mismo proyecto, denotado en [18], y de la monografía del proyecto de tesis expuesta en [19] que desarrolla una optimización del sistema de visión para la planta, se tomará toda la información más relevante que servirá de apoyo para el presente proyecto, información que se mostrará posteriormente.

La planta de clasificación del laboratorio de control de procesos consiste en un sistema automatizado de clasificación de piezas que permite realizar prácticas con elementos de visión de máquina, elementos de control de velocidad y posición; y realizar control local del sistema por medio una PanelView conectada a la red DeviceNet del laboratorio. La planta permite la clasificación de botellas y piezas de PVC entre cuatro tipos preestablecidos, aunque para efectos de este proyecto, solo se tomará como producto a clasificar las botellas. La distancia entre cada pieza para un mejor funcionamiento debe ser de 40cm y la velocidad de transporte de la planta entre 16 y 26 cm/sg. La tapa de cada botella presenta un color entre azul, rojo, blanco o verde para su clasificación, véase la Figura 2.1.

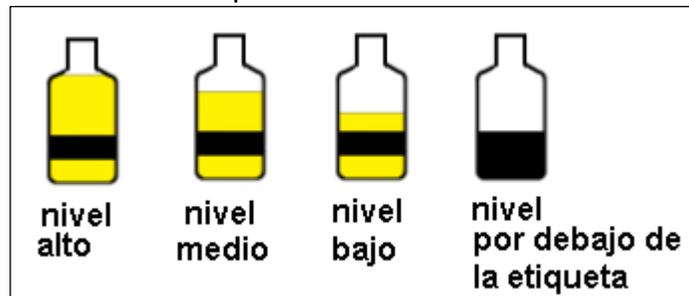
Figura 2.1 Grupo de botellas a clasificar (Color tapa: azul, rojo, blanco y verde)



Fuente: [19], pág. 48.

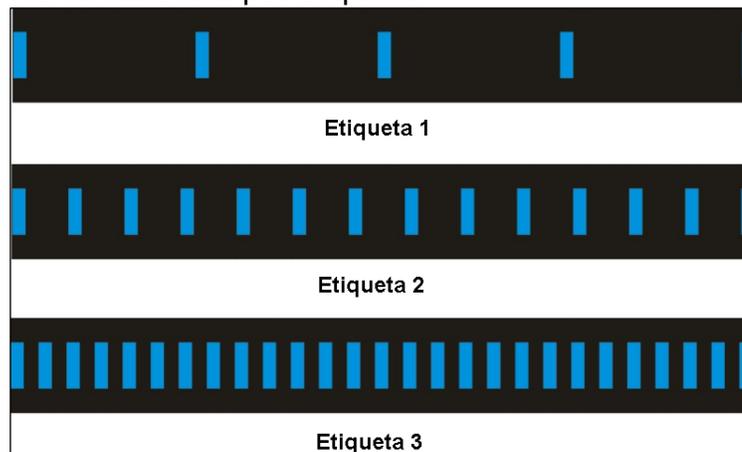
Además de éste tipo de clasificación para las botellas, en [19] se implementó dos tipos más de clasificación, una de ellas es la clasificación por nivel de líquido y la otra por tipo de etiqueta, la Figura 2.2 muestra los cuatro niveles en cada tipo de clasificación. En el caso de la clasificación por etiquetas, la Figura 2.3 muestra solo tres tipos, el cuarto tipo corresponde a las botellas que están sin etiqueta.

Figura 2.2 Tipos de clasificación por nivel de llenado.



Fuente: [19], pág. 48.

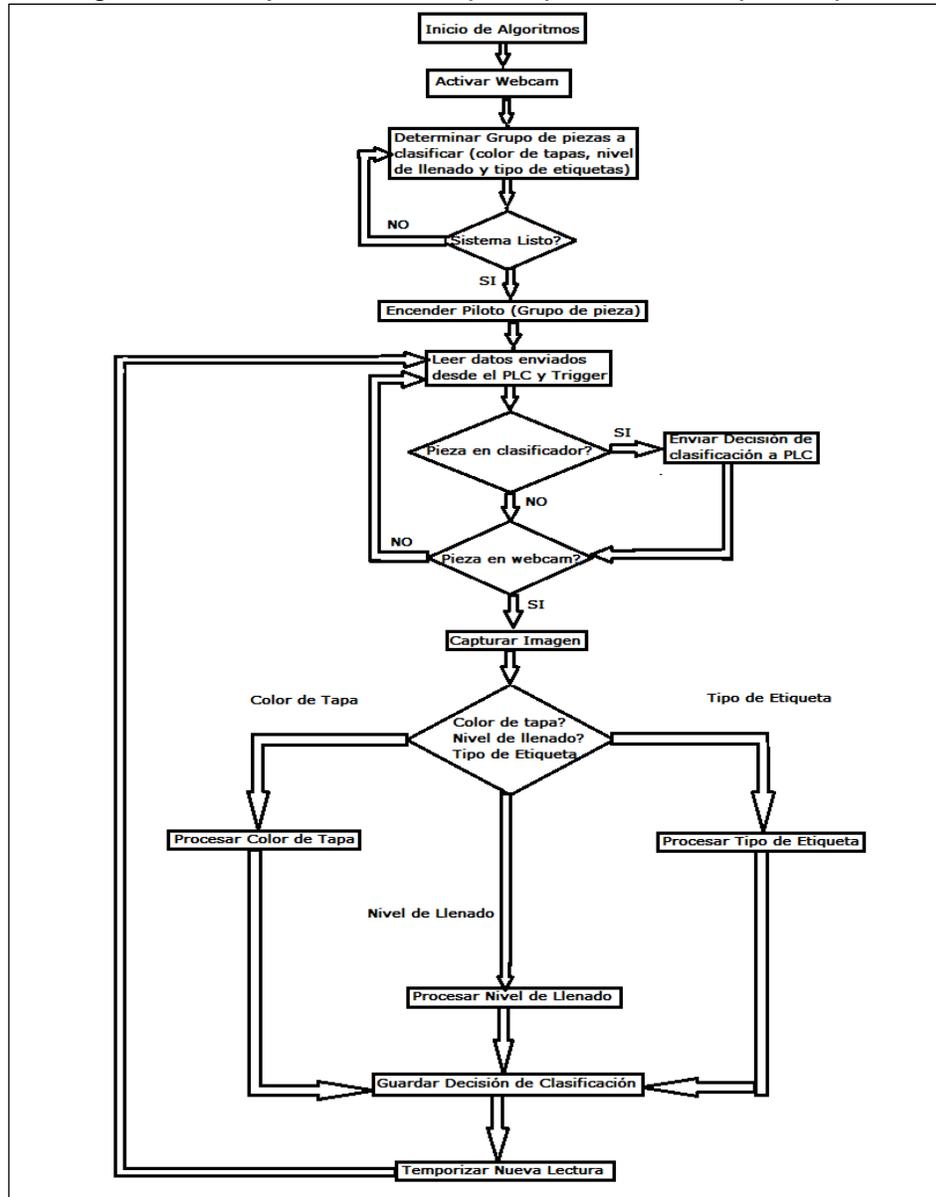
Figura 2.3 Tipo de clasificación por etiqueta.



Fuente: [19], pág. 49.

La descripción general del proceso de clasificación se muestra en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 2.4. Tal proceso empieza con la inicialización de los algoritmos requeridos, con la activación de la cámara que se encargará de tomar las imágenes, posteriormente se realizan algoritmos que se encargan de realizar y verificar que el proceso se esté realizando correctamente y finalmente culmina con la pieza clasificada según color de tapa, etiqueta o nivel de líquido¹¹.

Figura 2.4 Diagrama de flujo de la rutina principal de los scripts de procesamiento.



Fuente: [19], pág. 52.

¹¹ Para mayor información acerca del funcionamiento de la planta, diríjase a [17], [18] y [19].

Los scripts de procesamiento digital de imágenes están diseñados en lenguaje C++, están compuestos por una rutina de activación de la cámara y reinicio del puerto paralelo, una subrutina principal, tres subrutinas de procesamiento de imágenes, que se ejecutan según el algoritmo que se seleccione (color de tapas, nivel de llenado o tipo de etiquetas), una subrutina de almacenamiento de la decisión de clasificación y otras rutinas para el desarrollo de la interfaz gráfica. [19]

La planta de clasificación completamente terminada se muestra en la Figura 2.5. En ella se muestra el resultado del trabajo realizado por la ingeniera Pérez y el ingeniero Velasco, además se puede apreciar el trabajo realizado por los ingenieros Legarda y Meza con la optimización del sistema de visión.

Figura 2.5 Sistema final implementado.

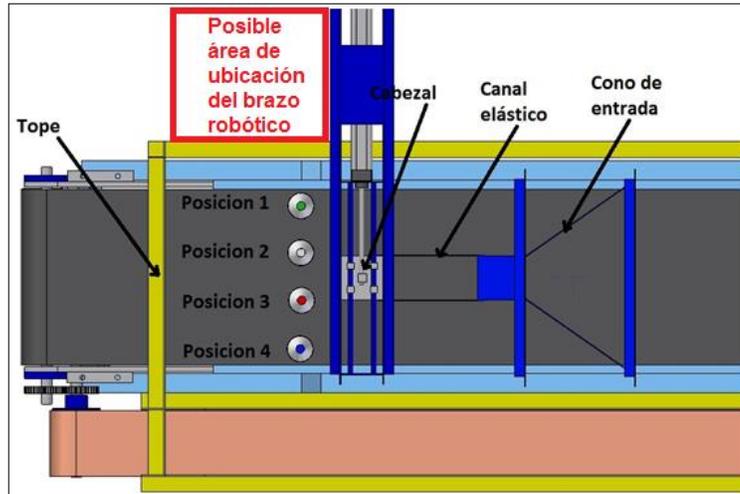


Fuente: Elaboración propia, Junio 2013.

Para lograr determinar el espacio de trabajo en la cual se desempeñará el brazo robótico de éste proyecto, nos centraremos en el lugar donde será ubicado, y ese lugar se encuentra sobre el módulo clasificador mostrado en la Figura 2.6.

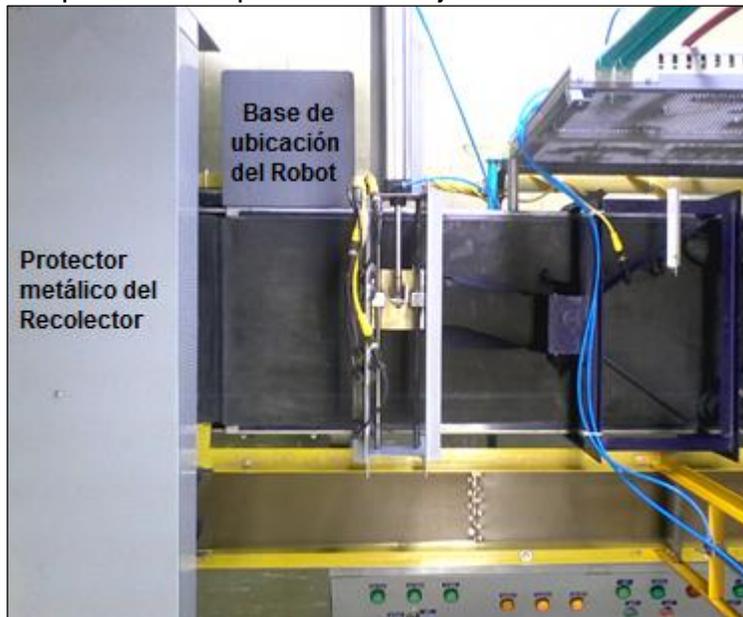
El brazo robótico será ubicado en el área comprendida desde el lugar donde se encuentra el cabezal con el sistema de clasificación hasta el tope. Se ubicará de manera externa a la banda principal, tal como se muestra en la Figura 2.6. La posible área de ubicación se encuentra remarcada con el cuadro rojo y mide 28cm de ancho (horizontalmente) por 45cm de largo (verticalmente), pero debido a que el área de la base cuadrada del brazo robótico tendrá 20cm x 20cm, se establece que la base extra adecuada para la ubicación del brazo, será de 27cm x 27cm.

Figura 2.6 Posiciones de clasificación sobre la banda principal (vista superior)



Fuente: Editado de [17], pág. 39.

Figura 2.7 Vista superior del espacio de trabajo. Clasificador



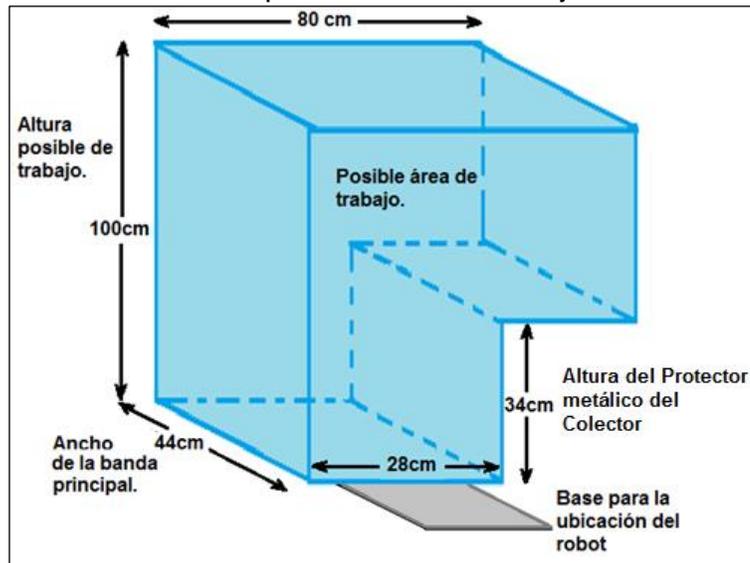
Fuente: Elaboración propia, Abril de 2013

Debido a que la planta presenta un protector metálico que cubre el recolector, que es el encargado de regresar las piezas al sistema de clasificación como se aprecia en la Figura 2.7, se debe tener en cuenta su altura, ya que no permite el libre movimiento del brazo en sentido horizontal convirtiéndose en un obstáculo para el brazo, así que para el desplazamiento del efector final, se debe desplazar por encima de tal protector. Otra longitud que se debe notar, es el ancho de la banda

principal, que es de 44cm, ya que en ella se desplazan los diferentes elementos, por tanto la distancia máxima desde el borde de la base del robot hacia el extremo de la banda debe ser cubierta por el movimiento del efector final del brazo.

Finalmente, teniendo en cuenta lo anterior, el área posible de trabajo se muestra en la Figura 2.8. En ella se expone las diferentes dimensiones que se deben tener en cuenta para determinar el área en la cual se puede desplazar el efector final del brazo robótico.

Figura 2.8 Posibles dimensiones para el área de trabajo.



Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2013.

2.1.2 Velocidad de clasificación

Es de gran importancia determinar la velocidad de respuesta del brazo robótico, es decir, la velocidad de movimiento que debe presentar. Por ello se realizó una práctica que buscaba determinar precisamente la velocidad máxima y la velocidad mínima con la que el sistema de clasificación puede trabajar satisfactoriamente. Tal práctica consistió en determinar el tiempo que tarda un elemento en ir desde el punto donde se encuentra el sistema de visión (la cámara), hasta el punto donde se hace la clasificación, cuya distancia es de 122cm. La velocidad se hace variar iniciando desde 5cm/sg y aumentándola cada vez en 5cm/sg hasta llegar a la velocidad máxima de 40cm/sg, que es con la que el sistema permite funcionar.

La práctica se realizó 2 veces, la primera se realizó incrementando la velocidad y la segunda disminuyéndola. Los resultados son mostrados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Resultados práctica de velocidad de clasificación.

Aumentando la Velocidad			Disminuyendo la Velocidad		
Iteración	Velocidad (cm/sg)	Tiempo (sg)	Iteración	Velocidad (cm/sg)	Tiempo (sg)
1	5	39,6	9	40	4,42
2	10	20,17	10	35	5,31
3	15	11,39	11	30	6,15
4	20	9,5	12	25	7,10
5	25	7,26	13	20	9,3
6	30	5,95	14	15	11,45
7	35	5,46	15	10	20,03
8	40	5	16	5	40,2

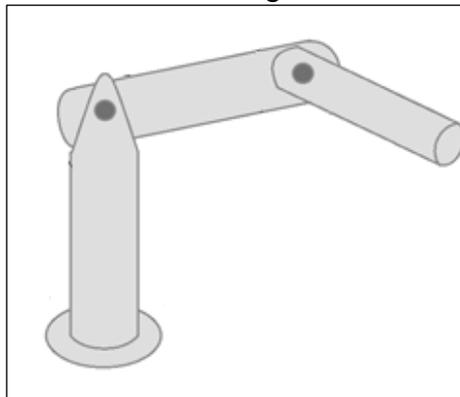
Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

En conclusión, de la tabla anterior se puede decir que el tiempo máximo en que el brazo robótico debe responder para el agarre de la pieza es aproximadamente de 5sg, que es el menor tiempo tomado por la pieza en recorrer la trayectoria mencionada. En ese tiempo el brazo debe estar posicionado para el agarre de la pieza, ubicarla en su lugar final establecido y además posicionarse para el agarre de la siguiente pieza. Por ello, la selección de los motores y del efector final deben tener en cuenta que el sistema debe tener una velocidad de respuesta bastante rápida.

2.1.3 Torque del brazo robótico en configuración estática.

Para realizar el análisis de las fuerzas influyentes en el sistema robótico, se utilizó el esquema básico de un brazo robótico de tres grados de libertad que se muestra en la Figura 2.9.

Figura 2.9 Esquema brazo robótico de tres grados de libertad



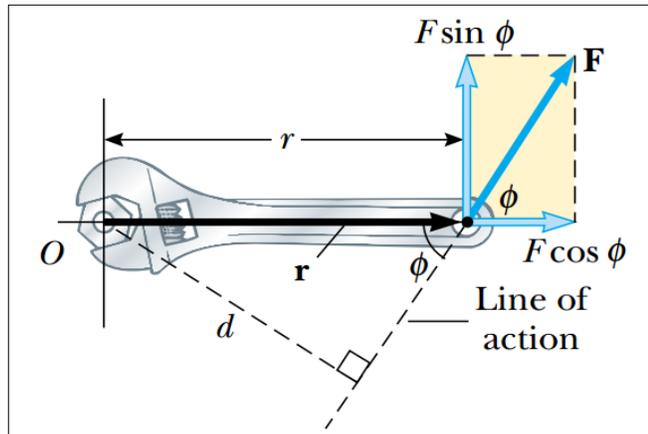
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el brazo robótico es un sistema que consta de motores que se encargarán de realizar los diferentes movimientos, es necesario tener en cuenta el peso de cada elemento del brazo con el objetivo de determinar el par necesario de los motores, es decir, se deben determinar los torques mínimos requeridos de cada motor para que éste pueda levantar el peso del eslabón correspondiente y demás objetos que ejercen peso al mismo. Por ello, se realizan los siguientes cálculos de diseño con el objetivo de obtención de los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot.

Se define el par mecánico τ de una fuerza \mathbf{F} que actúa sobre algún punto del cuerpo rígido, en una posición r respecto de cualquier origen O , por el que puede pasar un eje sobre el cual se produce la rotación del cuerpo rígido, al producto vectorial entre la posición r y la fuerza aplicada \mathbf{F} , según la siguiente expresión [20]:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.1)$$

Figura 2.10 Par mecánico.



Fuente: [20], pág. 306.

De la Figura 2.10, se tienen que la fuerza \mathbf{F} tiene mayor tendencia a la rotación alrededor de O cuando aumenta \mathbf{F} y cuando aumenta el brazo de momento d . El componente $\mathbf{F} * \sin \phi$ tiende a hacer girar la llave alrededor de O .

Considere la llave de tuercas que hace pivote en el eje que pasa por O en la Figura 2.10 La fuerza aplicada \mathbf{F} actúa a un ángulo ϕ con respecto a la horizontal. Se define la magnitud del momento de torsión τ asociado con la fuerza \mathbf{F} por la expresión:

$$\tau = r * F * \sin \phi \quad (2.2)$$

Donde r es la distancia entre el punto de pivote y el punto de aplicación de F , y d es la distancia perpendicular desde el punto de pivote a la línea de acción de F . (la línea de acción de una fuerza es una línea imaginaria que se prolonga desde ambos extremos del vector que representa la fuerza. La línea punteada que se prolonga desde la cola de F de la Figura 2.10 es parte de la línea de acción de F .)

Del triángulo recto de la Figura 2.10 que tiene la llave de tuercas como su hipotenusa, vemos que:

$$d = r * \sin \phi. \quad (2.3)$$

La cantidad d se denomina brazo de momento (o brazo de palanca) de F . [20]

En la Figura 2.10, el único componente de F que tiende a causar rotación es $F * \sin \phi$, el componente perpendicular a la línea trazada del eje de rotación al punto de aplicación de la fuerza. El componente horizontal $F * \cos \phi$, debido a que su línea de acción pasa por O , no tiene tendencia a producir rotación alrededor de un eje que pasa por O . De la definición de momento de torsión¹², vemos que la tendencia de rotación aumenta cuando F aumenta y cuando d aumenta. [20]

Por tanto se alcanza el mayor torque cuando $\phi=90^\circ$, esto es cuando la fuerza es totalmente perpendicular a r (en este punto $r=d$).

Para el caso particular de este proyecto se pretende calcular los pares mínimos que tienen que tener los motores para que la estructura pueda moverse por el espacio de trabajo definido sin dificultad alguna. El cálculo de los torques necesarios para el accionamiento de cada motor parte del cálculo de los máximos torques presentes en cada eje.

2.1.3.1 Par necesario para el accionamiento del primer motor.

Para definir el par necesario para el accionamiento del primer motor se mira el ejemplo de la página 307 de [20], torque neto en un cilindro, del cual sacamos que el torque en el motor 1 tendrá que ser:

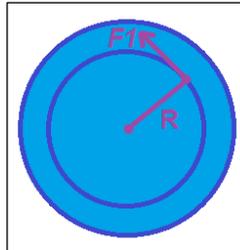
$$\tau_1 = R * F_1 \quad (2.4)$$

En donde R es el radio y F_1 la fuerza que se opone al movimiento del eje del servomotor, que para el caso, hace referencia a la fuerza de fricción en el sistema

¹² *Momento de torsión*: Tendencia a producir un cambio en el movimiento rotacional.

giratorio debido al peso del brazo que descansa en la base giratoria del primer eslabón.

Figura 2.11 Vista superior del eje de rotación del motor.

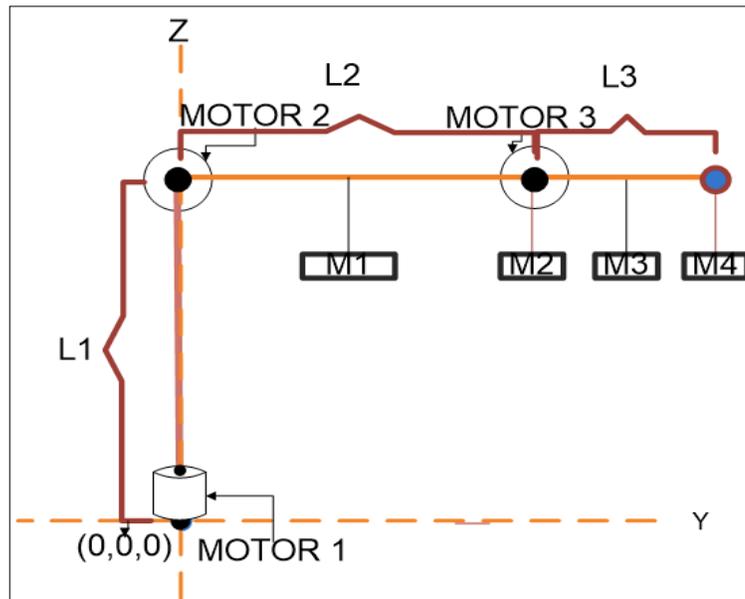


Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

2.1.3.2 Par necesario para el accionamiento del segundo y tercer motor

A partir del análisis de la Figura 2.12, donde se muestra el diagrama del brazo robótico con sus tres eslabones cuyas longitudes son $L1$, $L2$ y $L3$, y las masas que intervienen en los cálculos de los pares de cada uno de los motores, se calcula el par necesario para el segundo y tercer motor.

Figura 2.12 Esquema de masas que intervienen en el cálculo de pares del segundo y tercer motor.



Fuente: Elaboración propia, Abril 2013.

En donde:

$M1$: Masa del segundo eslabón.

$M2$: Masa del motor tres.

$M3$: Masa del tercer eslabón.

$M4$: Masa del efector final.

El par necesario para el motor 2 analizando la Figura 2.12 es el siguiente:

$$\tau_2 = M1 * g * \frac{L2}{2} + M2 * g * L2 + M3 * \left(L2 + \frac{L3}{2} \right) + M4 * g * (L2 + L3) \quad (2.4)$$

El par necesario para el motor 3 se calcula de la siguiente manera:

$$\tau_3 = M3 * g * \frac{L3}{2} + M4 * g * L3 \quad (2.5)$$

$$\tau_3 = g * L3 * \left(M3 * \frac{1}{2} + M4 \right) \quad (2.6)$$

Donde g es la constante de gravedad.

El par motor se podrá calcular cuando se tenga la estructura física del robot, ya que en el momento son desconocidas las masas de los eslabones, del efector final, entre otras masas que influyen en cada torque de los puntos indicados.

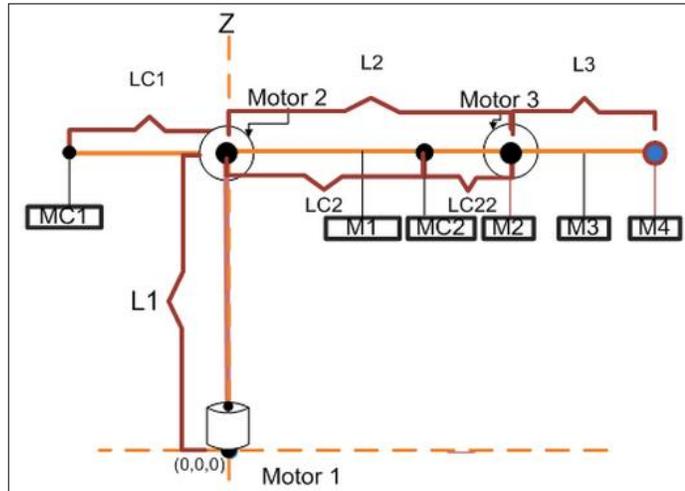
Adicionalmente, con el objetivo de ayudar al segundo y tercer motor y disminuir la fuerza que deben realizar para cargar el peso correspondiente, se diseñará un sistema de contrapesos en los eslabones adecuados, es decir, se ubicarán pesos en los extremos contrarios a cada eslabón a una distancia de 20cm para el segundo eslabón y 10cm para el tercer eslabón. En la Figura 2.13 se muestra el diagrama de masas que intervienen para el cálculo del par de los motores además de mostrar la ubicación de los contrapesos que ayudarán al movimiento de los 2 motores mencionados.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, los pares mínimos para accionar cada motor son:

$$\tau_2 = M1 * g * \frac{L2}{2} + M2 * g * L2 + M3 * \left(L2 + \frac{L3}{2} \right) + M4 * g * (L2 + L3) - Mc1 * g * Lc1 \quad (2.7)$$

$$\tau_3 = M3 * g * \frac{L3}{2} + M4 * g * L3 - Mc2 * g * Lc2 \quad (2.8)$$

Figura 2.13 Esquema de masas del sistema y contrapesos.



Fuente: Elaboración propia, Abril 2013.

En donde:

Mc1: Masa del contrapeso para el eslabón 2.

Mc2: Masa del contrapeso para el eslabón 3.

Lc1: Distancia del contrapeso 1 con respecto al eje de rotación del motor 2.

Lc2: Distancia del contrapeso 1 con respecto al eje de rotación del motor 3.

2.2 DISEÑO POR SOFTWARE

Como aspecto importante en la realización de un proyecto de ingeniería, se encuentra el diseño asistido por computador (CAD¹³), en la cual se hace uso de diferentes herramientas computarizadas o software especializado para el diseño en 2D o 3D de los diferentes componentes o partes del sistema. Para nuestro caso: diseño de los diferentes eslabones del robot, de la base y demás piezas que hacen parte del dispositivo físico final.

Para realizar el diseño CAD existen múltiples herramientas como AutoCAD, Inventor¹⁴ [21], DraftSight¹⁵, MicroStation¹⁶ [22], Solid Edge¹⁷ [23], etc. Pero para términos de éste proyecto, se hará uso de la herramienta Solid Edge, la cual presenta un grado de dificultad no muy alto y además porque en el transcurso de

¹³ CAD: Computer-aided Design. Diseño asistido por computador.

¹⁴ AutoCAD e Inventor son programas diseñados por la empresa desarrolladora de software de diseño 2D y 3D llamada Autodesk. Para mayor información visite [21].

¹⁵ DraftSight es software gratuito de diseño CAD.

¹⁶ MicroStation es un programa de CAD desarrollado por Bentley Systems. Para mayor información visite [22].

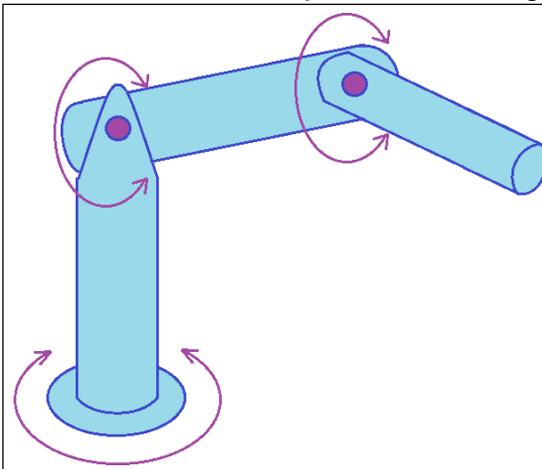
¹⁷ Solid Edge, inicialmente desarrollado por Intergraph ahora pertenece y es desarrollado por Siemens AG. Para mayor información visite [23].

la carrera se ha ido adquiriendo conocimientos básicos de ella gracias a la temática de algunas asignaturas.

Como lo denota Siemens AG en su página oficial acerca de Solid Edge: “es un componente principal del portafolio Velocity Series™¹⁸, es el sistema CAD 2D/3D híbrido más completo que utiliza synchronous technology¹⁹ para diseños más rápidos, cambios más rápidos, y una mayor reutilización de datos importados. Con un modelado de partes y ensambles superior, planos de taller, administración visible de datos, y análisis de elemento finito integrado, Solid Edge facilita la complejidad creciente del diseño del producto.” [23]

Por ello, el uso de ésta excelente herramienta de diseño nos ayudará en gran manera a la realización de este proyecto, facilitando todo lo referente al planteamiento de diferentes posibilidades de diseños para el brazo robótico industrial al que hace referencia este proyecto. El esquema básico sobre el cual se desea dar inicio al diseño, se muestra en la Figura 2.14, en donde se puede apreciar un esquema de robot del tipo antropomórfico, que son aquellos que están constituidos por dos componentes rectos que simulan el brazo o antebrazo humano sobre una columna giratoria [11], que para el caso presenta tres grados de libertad.

Figura 2.14 Esquema básico de robot antropomórfico de 3 grados de libertad.



Fuente: Tomado y editado de [11], pág. 24.

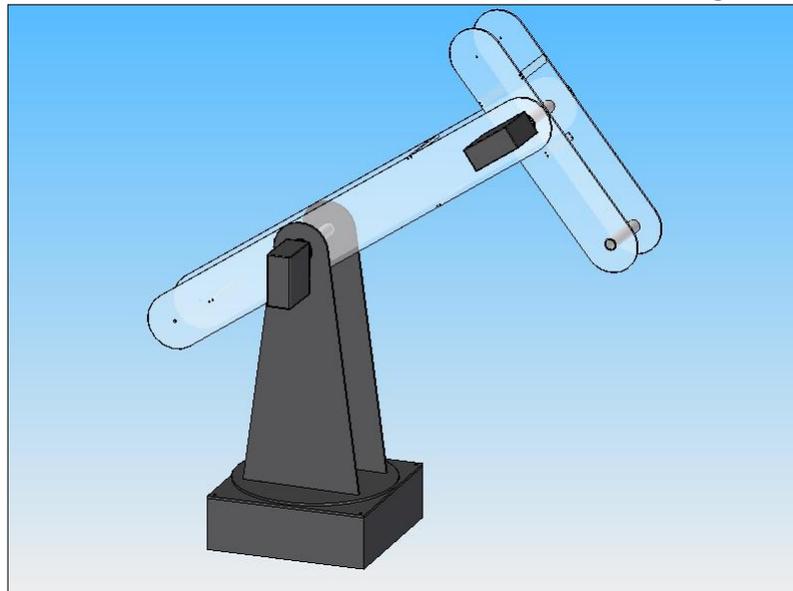
En la Figura 2.15 se muestra el modelo CAD final del brazo realizado haciendo uso de la herramienta descrita, tomando como base el esquema mencionado

¹⁸ Velocity Series es una completa familia de soluciones modulares e integradas para abordar el ciclo de vida del producto (PLM) en el mercado medio.

¹⁹ *synchronous technology* de Siemens PLM software, conecta todos los dispositivos Siemens sin ningún tipo de limitaciones.

anteriormente, el cual fue escogido debido a que es uno de los esquemas de robots industriales que presenta un mayor volumen de trabajo [11]. En ella se muestra el diseño completo del brazo robótico, logrando apreciar la forma de cada una de las articulaciones y partes del mismo. También se logra detallar que las articulaciones 2 y 3 presentan una proyección hacia la parte posterior del mismo, que serán usadas para la implementación de un sistema de contrapesos que será explicado detalladamente en el siguiente capítulo. Para mayor detalle de éste proceso de diseño, dirijase al Anexo A del presente proyecto.

Figura 2.15 Modelo final del brazo robótico en entorno Solid Edge.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

2.3 DISEÑO DEL EFECTOR FINAL

El extremo de la muñeca de un robot tiene adjunto un efector final, denominado también herramienta de extremo de brazo. Según el tipo de operación, los dispositivos finales pueden estar equipados con: sujetadores, ganchos, palas, electroimanes, campanas de vacío y dedos adhesivos, para manejar materiales; pistolas de aspersión para pintar; accesorios para soldar por puntos y con arco; herramientas motorizadas como: taladros, llaves de tuerca y pulidoras; instrumentos de medición como: indicadores y calibradores. Para la manipulación de materiales frágiles o para facilitar trabajos de ensamblaje, los efectores finales pueden estar provistos de mecanismo elásticos para disminuir la fuerza de sujeción y hacer más delicados los movimientos. [2]

El objetivo principal de este proyecto es clasificar productos en una línea de producción a través de la implementación de un brazo robótico, y para la obtención de este objetivo se decidió tomar un producto de referencia, el cual tiene las siguientes características:

Tabla 2.2 Características del envase a clasificar.

Producto	Características	
Botella	Altura: 10cm.	
	Diámetro tapa: 2cm.	
	Diámetro botella: 6cm.	
	Peso: 50g (sin líquido)	
	Tapa metálica.	

Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Teniendo en cuenta las características del producto y los requerimientos de la velocidad de accionamiento que debe tener el efector final, se optó por diseñar un efector tipo electroimán, capaz de soportar el peso de la botella más su contenido, se escogió el efector tipo electroimán por la rapidez de accionamiento, por su sencilla elaboración y por los costos bajos que implica su fabricación.

Para la fabricación del electroimán se debe tener en cuenta:

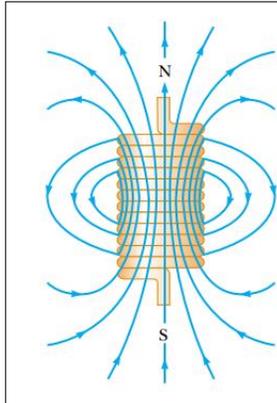
- ✓ Que su fuerza sea mayor a 300 g-f, que es el peso de la botella llena y equivale a 2.9420 Newton.
- ✓ Que sea liviano.
- ✓ Que tenga tamaño ajustable a la estructura robótica.

Por ello es necesario hacer uso de conceptos de teoría electromagnética para lograr el diseño del electroimán requerido, así que se explicará brevemente el cálculo para su diseño.

2.3.1 Campo magnético debido a un solenoide. [20]

Un solenoide es un alambre largo enrollado en forma de hélice. Con esta configuración puede producirse un campo magnético razonablemente uniforme en el espacio rodeado por vueltas del alambre (interior del solenoide) cuando este lleve a cabo una corriente.

Figura 2.16 Líneas de campo magnético para un solenoide.



Fuente: [20], pág. 8.

En la Figura 2.16 se muestran las líneas de campo magnético para un solenoide de vueltas muy apretadas de longitud finita, que lleva una corriente estable. El campo en el espacio interior es poderoso y casi uniforme. Esta distribución de las líneas de campo es similar a la que rodea un imán de barra. En consecuencia, un extremo del solenoide se comporta como el polo norte del imán, y el extremo opuesto se comporta como el polo sur.

Y para el cálculo matemático de la fuerza magnética se tiene que según [20] el campo magnético debido a un solenoide viene dado por:

$$B = \mu_0 * \frac{N}{L} * I \quad (2.9)$$

En donde:

B: Densidad del campo magnético en teslas.

N: número de vueltas del solenoide.

μ_0 : es la permeabilidad del espacio libre ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

I: es la corriente en amperios (A).

L: es la longitud del circuito magnético.

Como la fuerza magnética según [20], sobre un material ferromagnético está dada por:

$$F = \frac{B^2 * A}{2 * \mu_0} \quad (2.10)$$

En donde:

F: es la fuerza del campo magnético (en Newtons).

A: es el área de las caras de los polos (en m²).

Luego, sustituyendo la ecuación 2.9 en la ecuación 2.10, se tiene que:

$$F = \frac{\mu_0 * N^2 * I^2 * A}{2 * L^2} \quad (2.11)$$

La ecuación anterior aplica si el interior del solenoide es espacio libre, en el caso del electroimán no se usa la permeabilidad del espacio libre, si no la permeabilidad magnética²⁰ absoluta (μ) que está definida como:

$$\mu = \mu_r * \mu_0 \quad (2.12)$$

En donde:

μ_r : Permeabilidad relativa

Por tanto la ecuación para encontrar la fuerza magnética del electroimán sería:

$$F = \frac{\mu * N^2 * I^2 * A}{2 * L^2} \quad (2.13)$$

De lo anterior se definen los siguientes parámetros:

- ✓ El núcleo del entrehierro será de hierro dulce, debido a su alta μ_r lo cual eleva la fuerza magnética.
- ✓ $\mu_r(\text{Hierro dulce}) = 5000$
- ✓ El núcleo tendrá 6 cm de longitud, debido a condiciones de diseño de la estructura mecánica.
- ✓ El núcleo tendrá un diámetro de 2.54 cm, porque se encuentra comercialmente fácilmente además de ajustarse al diseño previo de la estructura mecánica.
- ✓ Se cuenta con una fuente de 2.5 A, 10 v.

De acuerdo a los parámetros definidos anteriormente se tiene:

$$A = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{1.27}{100}\right)^2 = 0.0005067m^2 \quad (2.14)$$

$$\mu = \mu_0 * \mu_r = 4 * \pi * 10^{-7} * 5000 = 0.0063 \quad (2.15)$$

²⁰ *Permeabilidad magnética*: capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella campos magnéticos.

Luego se tienen todos los parámetros excepto N, por tanto será el parámetro a hallar.

$$N = \frac{2 * L^2 * F}{\mu * N^2 * I^2 * A} \quad (2.16)$$

$$N = \frac{2 * (0.06)^2 * 2.9420}{0.0063 * 4 * 0.0005067} \quad (2.17)$$

$$N = 1061 \text{ vueltas} \quad (2.18)$$

Entonces para que el electroimán pueda levantar el peso de la botella con líquido, el número de vueltas N tiene que ser mayor a 1061.

2.3.2 Sistema de sujeción

Debido a que el elemento final de robot será un electroimán, el elemento que va a sujetar debe ser de un material ferromagnético para que se adhiera al mismo, pero teniendo en cuenta que un envase de hierro, de lata o de algún otro elemento ferromagnético, además del líquido en su interior, es mucho más pesado que los que actualmente se encuentran disponibles en la planta, se hará uso de esos mismos envases de plástico, por tanto, a cada tapa se le fijará una arandela de hierro cuyo diámetro es el mismo de las tapas. Tal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 2.17 Envases con su respectiva arandela.



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

2.4 MODELO GEOMÉTRICO DEL BRAZO ROBÓTICO

La importancia del modelo geométrico a la hora de obtener con precisión la ubicación del robot es fundamental para desplazar el efector final a través del plano operacional y realizar el trabajo que se quiere conseguir, como operaciones

de manipular un objeto, aplicar puntos de soldadura, pintar, pulir entre otros. En esta sección se plantea el diseño del modelo geométrico directo e inverso del brazo robótico utilizando los métodos mencionados en la sección 1.3 del presente proyecto. Además, se tiene en cuenta la Tabla 2.3 que muestra las longitudes de los tres eslabones del brazo robótico y los rangos de trabajo para cada articulación dadas por el espacio físico de trabajo en donde se implementará.

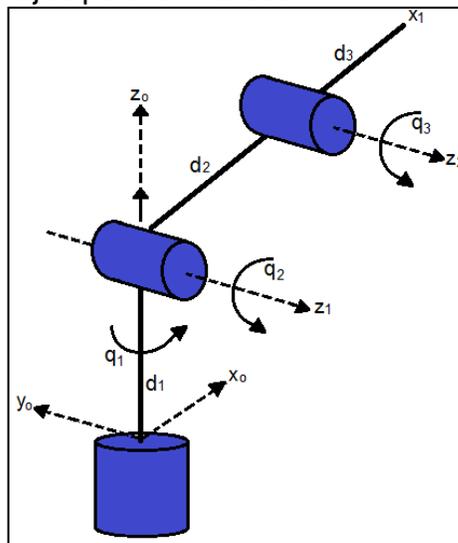
Tabla 2.3 Parámetros numéricos de las características geométricas

Eslabones l_i	Longitud (cm)	Articulación θ_i	Rango de trabajo ($^\circ$)
l_1	41	θ_1	$0 \leq \theta_1 \leq 90$
l_2	35	θ_2	$0 \leq \theta_2 \leq 110$
l_3	17,6	θ_3	$0 \leq \theta_3 \leq 150$

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1 Modelo geométrico directo

Figura 2.18 Ubicación de ejes para el método D-H



Fuente: Elaboración propia.

Para encontrar el diseño del modelo geométrico directo se hizo uso del algoritmo planteado por Denavit-Hartenberg ubicando los respectivos ejes tal como lo muestra la Figura 2.18. Se llega a la obtención de los parámetros que se muestran en la Tabla 2.4 y las matrices de transformación respectivas a cada articulación encontradas son (2.19), (2.20) y (2.21). La multiplicación de estas tres matrices genera la matriz de transformación general del brazo robótico mencionada en (2.22)

Tabla 2.4 Parámetros geométricos del brazo robótico usando D-H.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	l_1	0	90°
2	θ_2	0	l_2	0°
3	θ_3	0	l_3	0°

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo que l_1 , l_2 y l_3 hacen referencia a la longitud del primero, segundo y tercer eslabón respectivamente.

Con los valores de parámetros mencionados en la anterior tabla, se obtienen las diferentes matrices de transformación correspondiente a cada articulación 0A_1 , 1A_2 y 2A_3 como sigue:

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C1 & 0 & S1 & 0 \\ S1 & 0 & -C1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & l2 * C2 \\ S2 & C2 & 0 & l2 * S2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & l3 * C3 \\ S3 & C3 & 0 & l3 * S3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Y la matriz que representa el modelo geométrico directo $U_0 = {}^0T_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3$ es:

$$U_0 = \begin{bmatrix} C1C2C3 - C1S2S3 & -C1S2S3 - C1S2S3 & S1 & l_3C1C2C3 - l_3C1S2S3 + l_2C1C2 \\ S1C2C3 - S1S2S3 & -S1C2C3 - S1S2S3 & -C1 & l_3S1C2C3 - l_3S1S2S3 + l_2S1C2 \\ S2C3 + C2S3 & -S2CC3 + C2S3 & 0 & l_3S2C3 - l_3C2S3 + l_2S2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Por lo tanto, las ecuaciones que representan las coordenadas cartesianas en función de las coordenadas articulares, es decir el modelo geométrico directo, haciendo uso el método D-H son los tres primeros elementos de la cuarta columna así:

$$P_x = l_3C1C2C3 - l_3C1S2S3 + l_2C1C2 \quad (2.23)$$

$$P_y = l_3S1C2C3 - l_3S1S2S3 + l_2S1C2 \quad (2.24)$$

$$P_z = l_3 S_2 C_3 - l_3 C_2 S_3 + l_2 S_2 + l_1 \quad (2.25)$$

2.4.2 Modelo geométrico inverso

El modelo geométrico inverso fue obtenido inicialmente haciendo uso del método de Paul. Dicho método se explica a continuación.

Modelo geométrico inverso mediante el método de Paul.

Para obtener el modelo geométrico inverso mediante el método de Paul, se procede de la siguiente manera:

Se parte de tener la matriz U_0 (1.6) y la matriz (2.22) obtenida en el modelo geométrico directo. Además, teniendo en cuenta la ecuación (1.5) aplicándola al robot de tres articulaciones que presenta este proyecto, se obtiene la ecuación (2.26)

$$U_0 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^1A_3 \quad (2.26)$$

Posteriormente, multiplicando a la izquierda en ambos lados de (2.26) por cada una de las inversas de las matrices de transformación de la parte derecha de esa ecuación una por una, es decir, primero se multiplica a ambos lados por la matriz inversa de 0A_1 , la cual es la matriz 1A_0 , se tiene U_1 :

$$\begin{aligned} {}^1A_0 U_0 &= {}^1A_2 x {}^1A_3 \\ U_1 &= {}^1A_2 x {}^1A_3 \end{aligned} \quad (2.27)$$

Obteniendo así la siguiente igualdad tomando la cuarta columna de las 2 matrices:

$$\begin{bmatrix} C_1 * px + S_1 * py \\ pz - l_1 \\ s_1 * px - py * c_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 * C_2 + l_3 C_2 * C_3 - l_3 * S_2 S_3 \\ l_2 * S_2 + l_3 C_2 * S_3 + l_3 * C_3 S_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Por lo tanto, se obtiene la ecuación (2.29) al igualar el tercer elemento de la columna de la izquierda con el tercer elemento de la columna de la derecha, y resolviendo esta ecuación, se obtiene el valor de θ_1 , como se ve en (2.30).

$$s_1 * px - py * c_1 = 0 \quad (2.29)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1}(py/px) \quad (2.30)$$

Luego, continuando con el método, se multiplica a ambos lados de la igualdad mencionada en (2.27) por la inversa de 1A_2 , o sea 2A_1 , y se tiene U_2 :

$${}^2A_1 U_1 = {}^2A_3$$

$$U_2 = {}^2A_3 \quad (2.31)$$

E igualando las cuartas columnas de las matrices resultantes en (2.31) se tiene la siguiente igualdad:

$$\begin{bmatrix} (C1 * px + S1 * py) * C2 + S2 * (pz - l_1) - l_2 \\ -S2 * (C1 * px + S1 * py) + C2 * (pz - l_1) \\ s1 * px - py * c1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3 * C3 \\ l_3 * S3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

De donde se sacan las ecuaciones (2.33) y (2.34) como sigue:

$$(C1 * px + S1 * py) * C2 + S2 * (pz - l_1) - l_2 = l_3 * C3 \quad (2.33)$$

$$-S2 * (C1 * px + S1 * py) + C2 * (pz - l_1) = l_3 * S3 \quad (2.34)$$

Se puede calcular θ_2 y θ_3 considerando las primeras dos ecuaciones que resultan de igualar término a término en (2.32), las ecuaciones (2.33) y (2.34). Para esto se elevan al cuadrado y se suman con el fin de eliminar el ángulo θ_3 y tener una ecuación sólo en función de θ_2 . El procedimiento es el siguiente: Se define B1 como una constante, ya que θ_1 fue hallado en el punto anterior.

$$B1 = C1 * px + S1 * py \quad (2.35)$$

Reemplazando este valor de B1 en (2.33) y (2.34) se tienen las ecuaciones:

$$C2 * B1 + S2 * (pz - l_1) - l_2 = l_3 * C3 \quad (2.36)$$

$$-S2 * B1 + C2 * (pz - l_1) = l_3 * S3 \quad (2.37)$$

Se eleva al cuadrado cada ecuación (hay dos binomios en la ecuación (2.36)) y se suman, con lo cual se cancela θ_3 . La ecuación resultante es:

$$XS2 + YC2 = Z \quad (2.38)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} X &= -2 * (pz - l_1) * l_2 \\ Y &= -2 * B1 * l_2 \\ Z &= l_3^2 - l_2^2 - (pz - l_2)^2 - B1^2 \end{aligned}$$

Como se logra apreciar en (2.38), se llegó a una de las ocho tipos de ecuaciones que se mencionan en Tabla 1.3 como posible resultado del método de Paul. Por medio de software especializado se deduce que:

$$C2 = \xi \frac{(\xi YZ + \sqrt{X^4 + Y^2 X^2 - Z^2 X^2})}{X^2 + Y^2} \quad (2.42)$$

$$S2 = \xi \frac{\xi \frac{Y(\xi YZ + \sqrt{X^4 + Y^2 X^2 - Z^2 X^2})}{X^2 + Y^2} - Z}{X} \quad (2.43)$$

Con $\xi = \pm 1$. Se obtienen dos soluciones dependiendo del valor de ξ :

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{S2}{C2} \quad (2.44)$$

Es decir que θ_2 se define mediante (2.45) ó (2.46):

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\xi \frac{\xi YZ + \sqrt{X^4 + Y^2 X^2 - Z^2 X^2}}{X^2 + Y^2} \right) \quad (2.45)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\xi \frac{\xi \frac{Y(\xi YZ + \sqrt{X^4 + Y^2 X^2 - Z^2 X^2})}{X^2 + Y^2} - Z}{X} \right) \quad (2.46)$$

A partir de (2.36) y (2.37) se obtiene θ_3 , despejando S3 y C3 así:

$$C3 = \frac{C2 * B1 + S2 * (pz - l_1) - l_2}{l_3} \quad (2.47)$$

$$S3 = \frac{-S2 * B1 + C2 * (pz - l_1)}{l_3} \quad (2.48)$$

Luego θ_3 es:

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{S3}{C3} \quad (2.49)$$

Por tanto, θ_3 se encuentra a partir de (2.50) ó (2.51).

$$\theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{C2 * B1 + S2 * (pz - l_1) - l_2}{l_3} \right) \quad (2.50)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{-S2 * B1 + C2 * (pz - l_1)}{l_3} \right) \quad (2.51)$$

2.5 COMUNICACIÓN

Para la comunicación entre el brazo robótico y la planta, se cuenta con un PLC Micrologix 1500 de Allen Bradley, el cual es el controlador encargado del correcto funcionamiento en la clasificación. Éste PLC cuenta con tres módulos adicionales como se muestra en la Tabla 2.6.

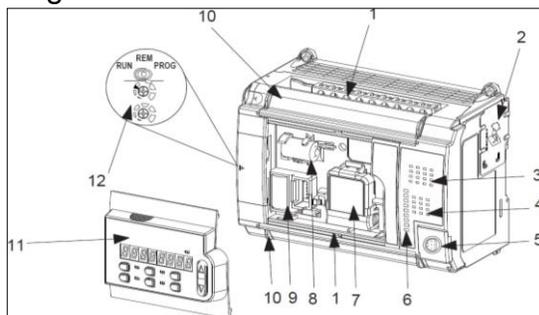
Tabla 2.5 Descripción PLC

<p>El PLC se utiliza para realizar los algoritmos de control de las variables de proceso. Cuenta con tres módulos adicionales: un contador de alta velocidad 1769-HSC, un módulo de señales analógicas 1769-IF4XOF2 y un scanner de DeviceNet 1769-SDN</p>		<p>Micrologix 1500 Allen Bradley con módulos:</p> <p>1769-IF4XOF2 1769 HSC 1769 SDN</p>
--	--	---

Fuente: [17], pág. 64.

El MicroLogix 1500 es un controlador programable compuesto de una unidad base, la cual contiene una fuente de poder, circuitos de entrada y salida, y un procesador. El controlador es disponible con 24 o 28 puntos de Inputs/Outputs (I/O) embebidas. Adicionalmente, se pueden aumentar las I/O añadiendo nuevos módulos. Las características principales del hardware son expuestas en la Figura 2.19 y en la Tabla 2.7 se muestran sus especificaciones.

Figura 2.19 PLC MicroLogix 1500.



Fuente: [24].

Tabla 2.6 Especificaciones PLC MicroLogix 1500

Feature	Description	Feature	Description
1	Removable Terminal Blocks	7	Memory Module/Real-Time Clock ⁽¹⁾
2	Interface to Expansion I/O, Removable ESD Barrier	8	Replacement Battery ⁽¹⁾
3	Input LEDs	9	Battery
4	Output LEDs	10	Terminal Doors and Label
5	Communication Port	11	Data Access Tool ⁽¹⁾
6	Status LEDs	12	Mode Switch, Trim Pots

(1) Optional.

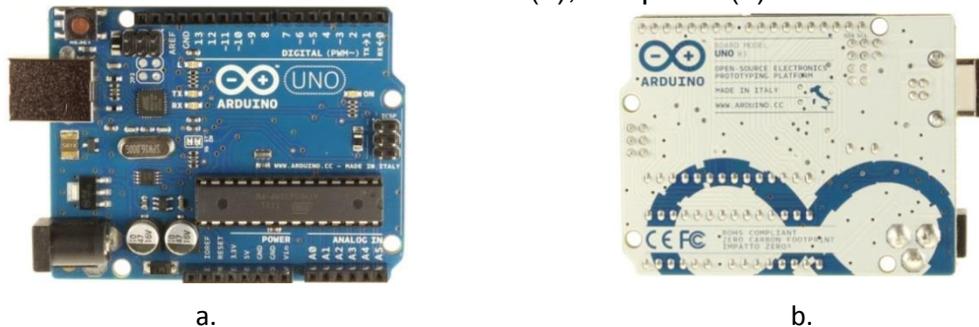
Fuente: [24].

Los módulos adicionales con los que cuenta este PLC son: un módulo contador de alta velocidad 1769-HSC, un módulo escáner de DeviceNet 1769-SDN y un módulo de señales analógicas 1769-IF4XOF2.

El primero es un módulo contador inteligente con su propio microprocesador e I/O que es capaz de reaccionar ante señales de entrada de alta velocidad. El módulo cuenta pulsos hasta 1 MHz (250 KHz para los controladores compactos) desde dispositivos tales como interruptores de velocidad, generadores de pulso, medidores de flujo en turbinas y codificadores de cuadratura, etc. Dispone de 4 salidas de alta velocidad de conmutación incluidas y 12 bits virtuales. Todas las 16 salidas pueden ser individualmente controladas por el módulo o por el programa de control de usuario. El segundo, en una configuración típica, el módulo escáner actúa como una interfaz entre dispositivos DeviceNet y el controlador programable. Y el último, es un módulo de señales analógicas. Cuenta con 4 puntos de entradas analógicas y 2 puntos de salidas analógicas, con rangos de entrada y salida de 0 a 10V DC y 0 a 20 mA, con 8 bits de resolución.

Adicionalmente, debido a que en éste caso, el PLC será utilizado para la comunicación con el brazo robótico, se puede decir que el MicroLogix 1500 puede ser conectado a un computador personal a través de cable serial, también puede ser conectado a la red DH-485 usando una interfaz de conversión avanzada (1761-NET-AIC), a una red Ethernet usando una interface Ethernet (1761-NET-ENI), o a una red DeviceNet usando una interface DeviceNet (1761-NET-DNI) o a través del módulo escáner DeviceNet (1761-NET-SDN). El controlador también se puede conectar a redes SCADA Modbus como un esclavo RTU.

Figura 2.20 Placa Arduino Uno R3. Frontal (a), Respaldo (b).



Fuente: [25].

Además del PLC, el otro dispositivo con el que se cuenta para la comunicación es la tarjeta Arduino²¹ Uno R3, la cual es una tarjeta electrónica que cuenta con un

²¹ Arduino: Es una plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar.

micro-controlador. Tiene 14 pines de entradas y salidas digitales de las cuales 6 pueden ser usadas como salidas PWM²², 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16MHz, una conexión USB, un conector de poder y un botón de reinicio. Ésta placa se muestra en la Figura 2.21.

Ésta tarjeta presenta muy buenas características de funcionamiento para el desarrollo de tareas electrónicas, tales como el encendido y apagado de cargas, control de motores, lectura de valores analógicos como por ejemplo el valor de un potenciómetro o la temperatura en algún elemento, etc. Algunas de las principales características de la placa Arduino Uno R3 se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.7 Características placa Arduino Uno R3

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Fuente: [25].

Con respecto a la comunicación, en [25], se encuentra que ésta tarjeta tiene un número de facilidades para la comunicación con un computador, otra tarjeta Arduino u otros micro-controladores. El ATmega328, procesador de la Arduino Uno, brinda comunicación serial UART TTL (5v), la cual es disponible en los pines 0 (RX (recepción)) y 1 (TX (Transmisión)). De cualquier forma, para que Windows reconozca la tarjeta, se debe contar con un archivo de instalación que se puede descargar de la página de internet principal de Arduino²³. El software Arduino incluye un monitor serial que permite que los datos de texto simple puedan ser enviados desde y hacia la placa Arduino. Los bombillos de RX y TX parpadearán cuando los datos se están siendo transmitidos vía chip USB-serial y USB conectado al computador, pero no para la comunicación serial en los pines 0 y 1.

²² PWM: Pulse-Width Modulation. Modulación por ancho de pulso.

²³ Arduino, la página de internet principal es www.arduino.cc

El ATmega también soporta el protocolo de comunicación I2C (TWI)²⁴ y el bus de comunicación SPI²⁵.

2.5.1 Comunicación PLC-Arduino Uno R3.

Como se mencionó anteriormente, se cuenta con un PLC MicroLogix 1500 que es el encargado del control de la planta y todo su sistema de clasificación y también se cuenta con la tarjeta Arduino Uno R3, que es la que se encarga de manipular el sistema del brazo robótico que se implementa en el presente proyecto, por tanto, para la integración entre la planta de clasificación y el brazo robótico es necesario hacer la unión entre éstos dos importantes componentes.

La forma de integrarlos se establecerá mediante la identificación de la salida del PLC que se encarga de dar la clasificación de las botellas, dando la posición al clasificador. Luego, se toma esa salida y se envía a la tarjeta Arduino a través de una de sus entradas analógicas. Realizando éste proceso de identificación, se logró determinar que la señal que le llega al clasificador, señal que envía el PLC, para su posicionamiento era un valor entre 3000 y 12000 que haciendo un proceso de escalización²⁶ se lleva a un valor de voltaje entre 1 y 5v. En la Tabla 2.9 se resume tal proceso de identificación de dichas salidas. Y en la Tabla 2.10 la correspondencia del tipo de clasificación a cada clase.

Tabla 2.8 Valores de voltaje según tipo de clasificación.

BIT	TIPO CLASIFICACIÓN	VALOR DIGITAL ASOCIADO A LA SALIDA ANALÓGICA DEL PLC	VALOR EN VOLTIOS (v)
B3:4:0	Clase 1	4500	1.22
B3:4:1	Clase 2	5500	2.44
B3:4:2	Clase 3	7500	3.66
B3:4:3	Clase 4	10000	4.57

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

Tabla 2.9 Correspondencia de clases de clasificación

Clase	Color tapa	Etiqueta	Nivel líquido
Clase 1	Verde	Sin Etiqueta	Por debajo de la etiqueta.
Clase 2	Blanco	Etiqueta 1	Nivel Bajo
Clase 3	Rojo	Etiqueta 2	Nivel Medio
Clase 4	Azul	Etiqueta 3	Nivel Alto

Fuente: Elaboración Propia, Junio de 2013.

²⁴ I²C (TWI) es un protocolo de comunicación serie diseñado por Philips que se utiliza esencialmente entre dispositivos que pertenecen al mismo circuito, por ejemplo, sensores con un micro-controlador.

²⁵ El Bus SPI (Serial Peripheral Interface) es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos

²⁶ Escalar: tomar un número y convertirlo a otro equivalente pero en una escala diferente.

Teniendo ese valor entre 1 y 5 voltios que sale del PLC y que viene de la señal que le llega del sistema de visión, se envía a la tarjeta Arduino a través del pin A0, posteriormente, mediante la programación en lenguaje Arduino, que se menciona anteriormente, el brazo robótico se desplazará hacia la posición indicada según ese valor de entrada, toma la botella y la ubica en su posición final.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO

En el presente capítulo se expondrá la implementación de cada ítem mencionado en el anterior capítulo, mostrando así los resultados de ejecutar cada uno de ellos y realizando el montaje y armado del brazo robótico. Inicia sustentando la realización de la estructura mecánica, es decir, la construcción de cada una de las piezas del brazo robótico de manera física, posteriormente se expondrán los contrapesos necesarios para disminuir la fuerza de los servomotores, se expondrán los servomotores escogidos y las razones de escogencia, los diferentes circuitos necesarios para el funcionamiento tanto de los servomotores como del electroimán y demás elementos electrónicos importantes. Finaliza mencionando su modo de programación y la forma en que se comunicará el robot con los diferentes dispositivos de la planta.

3.1 ESTRUCTURA MECÁNICA

Teniendo en cuenta el diseño mostrado en el capítulo anterior del brazo robótico, se realizó un bosquejo en madera MDF del mismo, con el objetivo de confirmar que las longitudes establecidas de cada uno de las articulaciones eran las adecuadas para el funcionamiento y trabajo al cual iba a ser sometido el brazo, además también ayuda a determinar y a corroborar los contrapesos que se requieran. Ésta maqueta permite adicionalmente comprobar que los demás cálculos también sean realizados adecuadamente. La siguiente figura muestra la maqueta del brazo robótico mencionada.

Figura 3.1 Maqueta inicial.



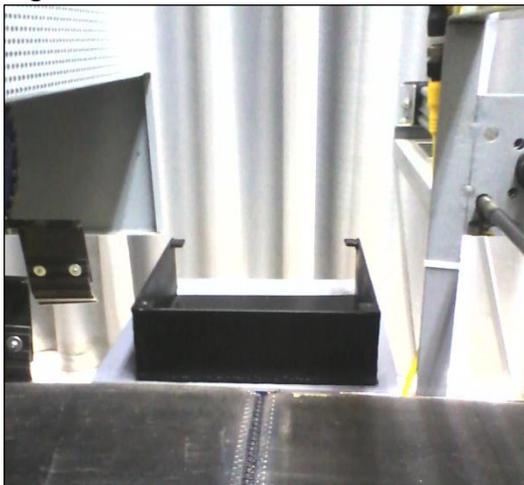
Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

Luego de haber construido la maqueta, que representa una idea de la construcción final del robot, se procede a la elaboración de cada una de las piezas, iniciando con la construcción de la base, los tres eslabones y finalmente la unión de todas ellas. Los diseños iniciales de cada una de las piezas son mostradas detalladamente en el Anexo A del presente documento.

3.1.1 Construcción de la base.

La base del robot, presenta una forma cuadrada cuyas dimensiones son de 20cmx20cm, y tiene una altura de 6,5 cm. El material en el cual es realizado es hierro, debido a que ésta va a estar fija por medio de tornillos en una base metálica adherida al borde de la planta, por tanto, el peso de ésta pieza no afecta al sistema robótico, pues su peso recae en tal base metálica. La Figura 3.2 expone la base del brazo ubicada sobre la base metálica. En la Figura 3.2.b. se puede apreciar la fijación de la base por medio de tornillos sobre la base metálica de color gris que sobresale y se encuentra igualmente fija por medio de tornillos en la estructura de la planta.

Figura 3.2 Base del Robot.



a. Vista frontal



b. Vista Posterior

Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

Ésta base, además está conformada por una tapa de hierro, cuyas dimensiones son 20cmx20cm para encajar en la base, presenta orificios para ser fijada en la base por medio de tornillos, también presenta una guía donde serán ubicados los balines de acero de 9mm de diámetro que hacen parte del sistema de giro para el primer eslabón. En la Figura 3.3 se puede apreciar lo mencionado.

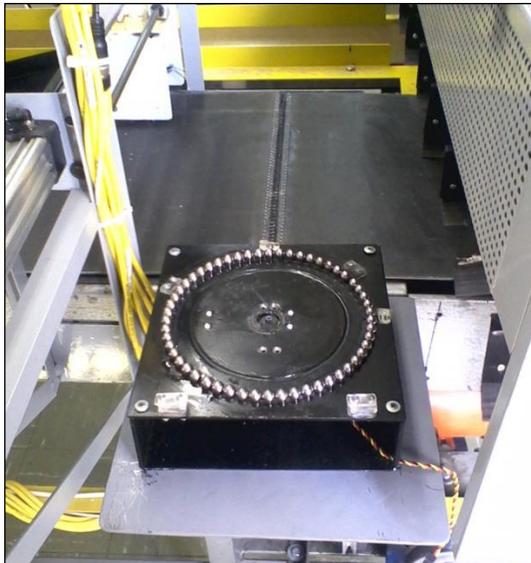
Figura 3.3 Tapa de la base.



Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

Como se puede apreciar en la anterior figura, la tapa presenta un orificio en su centro de aproximadamente 2cm el cual permite el paso del eje del primer servomotor. También se detallan dos topes para limitar el movimiento del primer eslabón y dejándole un rango de 90 grados. La ubicación final de ésta tapa sobre la base se puede apreciar en la Figura 3.4.

Figura 3.4 Ubicación base y respectiva tapa.



a. Vista Posterior



b. Vista frontal

Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

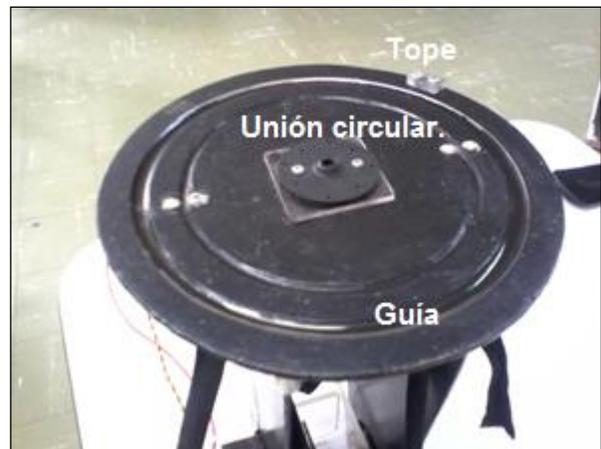
3.1.2 Construcción primera articulación.

Ésta primera articulación o eslabón, consta de una base circular de diámetro 20cm en la que se fijan dos plaquetas paralelas, cuya altura total es de 33,5cm, como se aprecia en la Figura 3.5.a. El material escogido para éste es hierro, debido a que el peso de éste eslabón recae sobre la base metálica, además porque presenta características que brindan al eslabón resistencia y firmeza. En la parte inferior de la base, al igual que la tapa de la base, presenta una guía en la cual se moverán los balines depositados sobre la tapa de la base para el sistema giratorio, tal como se expone en la Figura 3.5.b.

Figura 3.5 Primer eslabón.



a. Vista lateral primer eslabón



b. Vista inferior primer eslabón

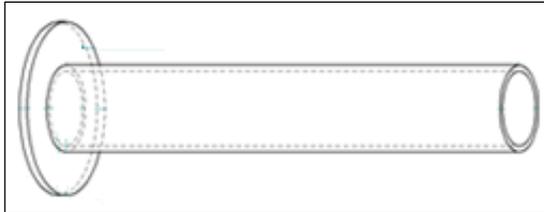
Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

Adicionalmente, en la Figura 3.5.b, se puede apreciar un tope, el cual, en conjunto con los toques que tiene la tapa de la base mencionados anteriormente, limitan el movimiento giratorio de éste eslabón. La utilización de estos toques es debido a que el sistema robótico presenta un peso considerable, por tanto, al girar sobre este primer eslabón, se presenta un grado de inercia que puede generar daños en el eje del servomotor. Tal inercia se reduce disminuyendo la velocidad de movimiento de los servomotores, y esto se logra implementando tiempos de espera muy pequeños en la rutina del código programado, además, al tener un límite en su rango de desplazamiento también se disminuyen las posibilidades de daños en el mismo. En ésta misma figura, se detalla la fijación de una unión circular que presenta un engrane pequeño en su centro, el cual se conecta al

engrane que tiene el eje del primer servomotor, con el objetivo de que éste eslabón gire con base al giro del eje del servomotor.

En la parte superior de éste eslabón, se encuentran dos orificios, uno en cada plaqueta, en los cuales se ubican dos balineras correspondientemente a cada orificio. Sobre tales balineras se hace pasar un eje de hierro que presenta la forma mostrada en la Figura 3.6. Éste eje servirá como extensión del eje del segundo servomotor que será fijado a la segunda articulación, así, la segunda articulación girará con base a los movimientos de tal servomotor. La fijación de éste servomotor y el eje ubicado en las balineras mencionadas, se detallan en la Figura 3.7.

Figura 3.6 Eje de unión.



Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

Figura 3.7 Extremo superior del primer eslabón.



Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

3.1.3 Construcción de la segunda y tercera articulación.

La construcción de estas dos articulaciones es similar, debido a que presentan diseño y características similares y el material en el cual se construyen es el

acrílico. Éste material fue escogido, debido a que se requería que tal material presentara dureza y a su vez fuera liviano. Inicialmente se planteó el aluminio, que cumple con esas dos condiciones, sin embargo, es mucho más complicado trabajar con él y su costo es relativamente alto. Por ello, el acrílico fue en conclusión la opción tomada.

La segunda articulación tiene una longitud total de 62cm, y debido a que son dos plaquetas de acrílico que se deben fijar una con otra, cuenta con uniones rectangulares que sirven como refuerzo. Cuenta con un orificio para fijar el eje del tercer eslabón en un extremo, y en el otro extremo tiene un orificio para ubicar el contrapeso que se encargará de disminuir la fuerza que debería hacer el servomotor correspondiente ayudándole a levantar el peso de las articulaciones 2 y 3 y además de elementos que penden de éstas; y finalmente cuenta con un orificio a 23,5cm de uno de los extremos que se usa para fijar éste segundo eslabón al primer eje que se ubica en el primer eslabón, en éste orificio no se ubicará balinera.

La tercera articulación o eslabón es más corta que la segunda, igualmente está compuesto de dos plaquetas que se fijan entre si y a su vez se fijan a un eje que se asegura al segundo eslabón y al tercer servomotor. Éste tercer servomotor es el encargado del movimiento de éste eslabón. La Figura 3.8 muestra éstas dos articulaciones implementadas, corroborando lo dicho anteriormente.

Figura 3.8 Segunda y tercera articulación



Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

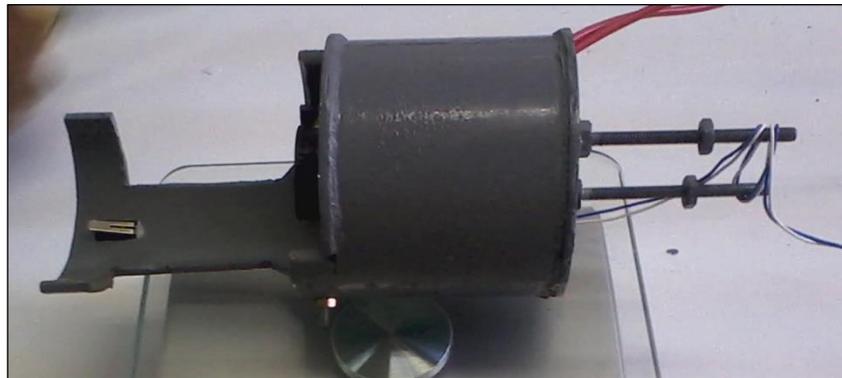
3.1.4 Construcción elemento final.

Siguiendo las especificaciones de diseño caracterizadas en la sección 2.3, los materiales utilizados en la construcción del electroimán fueron:

- ✓ 500 gr de alambre de cobre calibre 22.
- ✓ Núcleo ferromagnético; para el caso hierro dulce, de forma cilíndrica cuyo diámetro es de 2,5cm y longitud de 6cm.
- ✓ El recubrimiento del electroimán será en tubo PVC de diámetro interno de 5cm y longitud 5,5cm.
- ✓ También en tubo PVC se realizó una paleta adherida al recubrimiento del electroimán que hará que las botellas se detengan justo en su punto de atracción.

La Figura 3.9 expone el contenedor con el electroimán en su interior y se puede apreciar la paleta mencionada. Ésta paleta en su extremo contiene un switch que se activará cuando la botella llegue al punto de selección y activará a su vez el electroimán. El electroimán terminado tiene un peso de 0.9 Kg, éste peso se tendrá en cuenta para el cálculo de los contrapesos.

Figura 3.9 Electroimán



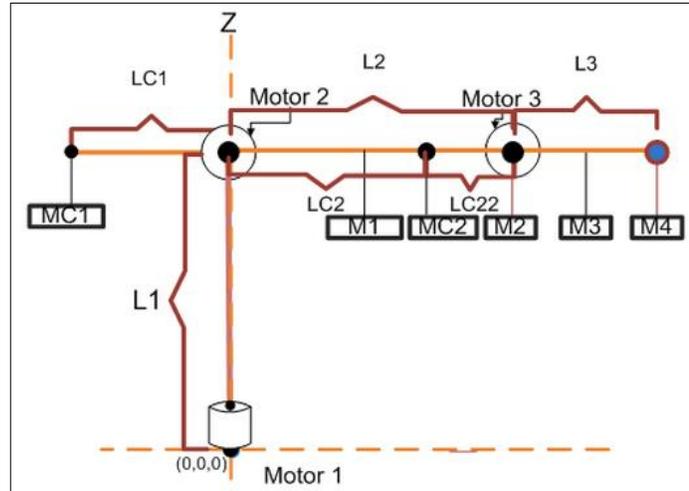
Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

3.1.5 Elección de contrapesos.

El objetivo que se pretende con la implementación de contrapesos en los extremos de las articulaciones 2 y 3, es reducir el par requerido en la posición inicial y ayudar a los servomotores en su movimiento evitando que realicen una fuerza elevada para ello, aumentando así su vida útil y además disminuyendo la posibilidad de daños en los engranajes internos. Para calcular el peso de estos contrapesos se acude a las formulas expresadas en el segundo capítulo de este proyecto, sin embargo, en la Figura 3.10 se expresa nuevamente el esquema de

masas que intervienen en el sistema robótico para facilitar el entendimiento de estos cálculos.

Figura 3.10 Esquema del sistema robótico y masa intervinientes



Fuente: elaboración propia, Abril 2013.

En donde:

$M1$: Masa del segundo eslabón.

$M2$: Masa del motor tres.

$M3$: Masa del tercer eslabón.

$M4$: Masa del efector final.

$Mc1$: Masa del contrapeso para el eslabón 2.

$Mc2$: Masa del contrapeso para el eslabón 3.

$L1$, $L2$ y $L3$: longitudes eslabones 1, 2 y 3 respectivamente.

$Lc1$: Distancia del contrapeso 1 con respecto al eje de rotación del motor 2.

$Lc2$: Distancia del contrapeso 1 con respecto al eje de rotación del motor 3.

3.1.5.1 Contrapeso de la tercera articulación.

Además de tener en cuenta la Figura 3.10 para el cálculo, también se requiere partir de la ecuación (2.8), la cual se repite para un mayor entendimiento. El torque del tercer motor se iguala a cero para que la tercera articulación parta desde su posición inicial en equilibrio como se ve en (3.2).

$$\tau_3 = M3 * g * \frac{L3}{2} + M4 * g * L3 - Mc2 * g * Lc2 \quad (3.1)$$

Igualando a cero:

$$0 = M3 * \frac{L3}{2} * g + M4 * L3 * g - Mc2 * g * Lc22 \quad (3.2)$$

Reemplazando los valores de los diferentes elementos:

$$0 = 0.2 \text{ kg} * \frac{17.5}{2} \text{ cm} + 0.8 \text{ kg} * 17.5 \text{ cm} - Mc2 * 10 \text{ cm} \quad (3.3)$$

$$Mc2 = \frac{0.2 \text{ Kg} * 17.5 \text{ cm} + 0.8 \text{ Kg} * 17.5 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} \quad (3.4)$$

$$Mc2 = \frac{3.5 \text{ kg} * \text{cm} + 14 \text{ kg} * \text{cm}}{10 \text{ cm}} = 1.75 \text{ kg} \quad (3.5)$$

Por tanto,

$$Mc2 = 1.75 \text{ kg} \quad (3.6)$$

Como se puede observar en los cálculos anteriores, el contrapeso necesario para el trabajo adecuado de ayuda al tercer servomotor es de 1,75Kg. Ése contrapeso está conformado de 5 discos de hierro fundido, tres de ellos de diámetro 3,3cm y dos de 2,3cm, los cuales están adheridos a un eje cilíndrico, tal como se puede apreciar en la Figura 3.11.

Figura 3.11 Contrapeso de la articulación 3.



Fuente: Elaboración propia, Marzo 2013.

3.1.5.2 Contrapeso segunda articulación

Al igual que para el cálculo del contrapeso de la tercera articulación, éste se basa en el esquema de la Figura 3.10, además de la ecuación (2.7) que se muestra a continuación. El torque del segundo motor se iguala a cero para que la tercera articulación parta desde su posición inicial en equilibrio.

$$\tau_2 = M1 * g * \frac{L2}{2} + M2 * g * L2 + M3 * \left(L2 + \frac{L3}{2} \right) + M4 * g * (L2 + L3) - Mc1 * g * Lc1$$

Igualando a cero:

$$0 = M1 * g * \frac{L2}{2} + M2 * g * L2 + M3 * \left(L2 + \frac{L3}{2} \right) + M4 * g * (L2 + L3) + Mc2 * g * Lc2 - Mc1 * g * Lc1 \quad (3.7)$$

Reemplazando los valores de las diferentes variables:

$$0 = 0,3 \text{ kg} * \frac{35}{2} \text{ cm} + 0,2 \text{ kg} * 35 \text{ cm} + 0,2 \text{ kg} * \left(35 + \frac{17,5}{2} \right) \text{ cm} + 0,8 \text{ kg} * (17,5 + 35) \text{ cm} + 1,75 \text{ kg} * 42 \text{ cm} - Mc1 * 20 \text{ cm} \quad (3.8)$$

$$Mc1 = \frac{0,3 \text{ kg} * 17,5 + 0,2 \text{ Kg} * 35 \text{ cm} + 0,2 \text{ kg} * 43,75 \text{ cm} + 0,8 \text{ Kg} * 52,5 \text{ cm} + 1,75 * 42 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} \quad (3.9)$$

$$Mc1 = \frac{5,25 \text{ kg} * \text{cm} + 7 \text{ kg} * \text{cm} + 8,75 \text{ kg} * \text{cm} + 42 \text{ Kg} * \text{cm} + 73,5 \text{ kg} * \text{cm}}{20 \text{ cm}} \quad (3.10)$$

$$Mc1 = \frac{136,5}{20 \text{ cm}} = 6,825 \text{ kg} \quad (3.11)$$

Por lo tanto,

$$Mc1 = 6,825 \text{ kg} \quad (3.12)$$

Así que, el contrapeso requerido como ayuda para el segundo servomotor debe ser de aproximadamente 6,8Kg. Éste contrapeso, debido a que es bastante considerable, y además teniendo en cuenta el espacio donde se ubicará se optó por hacerlo de plomo fundido en un disco de diámetro 8cm y 6cm de ancho. Este disco de plomo se muestra en la Figura 3.12.

Figura 3.12 Contrapeso de la articulación 2.



Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013.

3.1.6 Elección de los servomotores.

Como criterio principal para la escogencia de los tres servomotores que se encargarán de mover respectivamente las tres articulaciones, se tuvo en cuenta el torque necesario para su trabajo, por ello, la selección de ellos se hizo basándose en la ecuación de torque para cada uno. Para el primer servomotor, como el movimiento y fuerza se da verticalmente sobre un mismo eje, la ecuación para determinar el torque es la del torque rotacional. Dirijase a la ecuación (2.4).

La fuerza que debe ser ejercida por el primer servomotor en éste punto es relativamente pequeña, debido a que el peso del brazo robótico recae sobre el sistema de balines que cuenta con una lubricación adecuada. Por lo tanto, el torque rotacional con una fuerza de 0.5Kg-f a un radio de 3cm es:

$$\tau_1 = 3cm * 0,5Kg = 1,5Kg * cm \quad (3.13)$$

$$\tau_1 = 1,5Kg * cm \quad (3.14)$$

Así que el torque requerido para el primer motor, debido al sistema de giro, es pequeño, de 1.5kg*cm. Analizando las posibilidades que habían, teniendo en cuenta los requerimientos mostrados en la Tabla 3.1 para la elección del primer servomotor, se llega a que la mejor elección es el servomotor HITEC HS-755HB, puesto que se analizaron otros servomotores, pero su marca no era recomendada, además de que sus fabricantes no daban garantía de funcionamiento. Las características de funcionamiento de este servomotor, además de su imagen se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Requerimientos primer servomotor.

Característica	Requerido	Servo HS-755HB HITEC
Tipo de Motor	Servo	Servomotor 3 pole
Velocidad (4.8V /6 V)	--	0.28 y 0.23 s
Torque Kg-cm (4.8V /6 V)	1.5 mínimo.	11 y 13.2
Tamaño (mm)	Adecuado para el robot, no muy grande	58.93 x 28.96 x 49.78
Peso en gramos	--	110
Tipo piñonería	Resistente.	Carbonita



Fuente: Elaboración propia, Marzo de 2013. Datasheet Hitec Hs-755HB.

Para la elección del segundo servomotor, se realizan los cálculos del torque respectivo tomando como base la ecuación (2.7) del torque y para ello, se analiza la Figura 3.10, en este caso, se analizará el punto de ubicación del Motor 2, pero adicionando a esta figura la del peso de la botella con agua en el extremo derecho cuyo peso aproximado es de 250gr, quedando la ecuación del torque así:

$$\tau_2 = M1 * g * \frac{L2}{2} + M2 * g * L2 + M3 * \left(L2 + \frac{L3}{2} \right) + (M4 + Mb) * g * (L2 + L3) - Mc1 * g * Lc1 \quad (3.15)$$

Donde Mb es la masa de la botella. Reemplazando se tiene:

$$\tau_2 = 0,3 \text{ kg} * \frac{35}{2} \text{ cm} + 0,2 \text{ kg} * 35 \text{ cm} + 0,2 \text{ kg} * \left(35 + \frac{17,5}{2} \right) \text{ cm} + (0,8\text{kg} + 0,25\text{kg}) * (17,5 + 35)\text{cm} + 1,75\text{kg} * 42\text{cm} - Mc1 * 20 \text{ cm} \quad (3.16)$$

$$\tau_2 = 149,625\text{kg} * \text{cm} - 6,825 * 20 \text{ cm} \quad (3.17)$$

$$\tau_2 = 13,125\text{Kg} * \text{cm} \quad (3.18)$$

De lo anterior se deduce que el torque mínimo requerido para el segundo servomotor debe ser de 13,125Kg*cm. Y teniendo en cuenta esto, y las mismas consideraciones que se tuvieron en la escogencia del primer motor, se llegó a que el servomotor que mejor características presenta para ésta articulación es el que se muestra en la Tabla 3.2. En ella se muestran las características y la imagen del mismo. Éste mismo servomotor será usado para la tercera articulación debido a sus características de trabajo.

Tabla 3.2 Especificaciones Servomotor Hitec HS-805BB

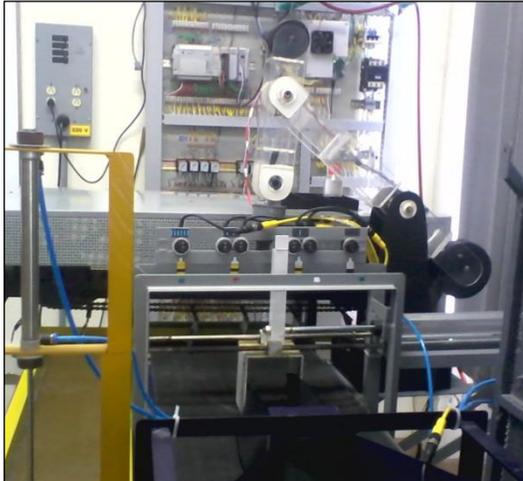
Tipo de Motor:	3 Pole
Velocidad (4.8v/6.0v):	0,19 y 0,14 s
Torque kg.cm. (4.8v/6.0v):	20 y 25
Tamaño en milímetros:	65,79 x 29,97 x 57,40
Peso en gramos:	156 gr
Piñonería :	Nylon doble.



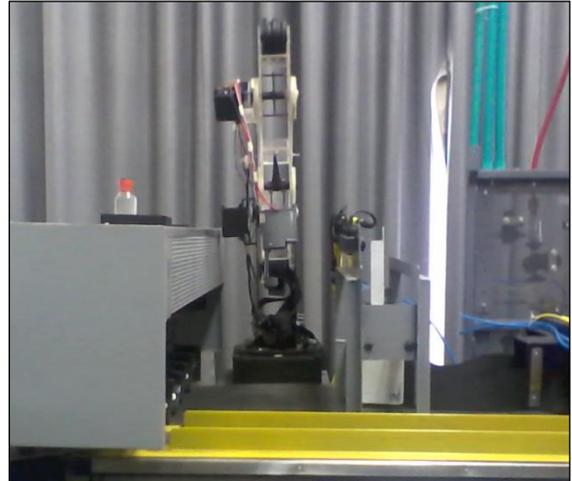
Fuente: Datasheet Servomotor Hitec Hs-805BB.

Luego de mostrar el proceso de construcción de cada uno de los componentes del brazo robótico, finalmente, en la Figura 3.13 se muestra la estructura del brazo completamente finalizada e implementada en la banda transportadora.

Figura 3.13 Brazo robótico implementado



a. Vista Lateral



b. Vista frontal.



c. Planta de clasificación finalizada.

Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

3.2 CIRCUITOS DE ACONDICIONAMIENTO

Los circuitos de acondicionamiento hacen referencia a los circuitos necesarios para el correcto funcionamiento de los dispositivos electrónicos usados en la

implementación del brazo robótico, tales como servomotores, electroimán, etc. Los cálculos que se muestran posteriormente acerca de los valores de las resistencias para el disparo de las diferentes etapas de potencia, son tomados de [26], donde se explica los parámetros que se deben tener en cuenta para los diferentes cálculos de resistencias presentes en la etapa de potencia de los TRIAC y SCR

3.2.1 Circuitos reguladores del voltaje de alimentación de los servomotores

El sistema robótico cuenta con tres servomotores que necesitan un voltaje constante de 6v y 2A para poder llegar a su torque máximo, por tanto es necesario diseñar un regulador que permita ese voltaje constante en la alimentación de cada servomotor y poder aprovechar el máximo par de estos. El regulador tiene que mantener a su salida tal voltaje constante a pesar de las exigencias de corriente por parte de los servos. Como alimentación de los reguladores se cuenta con una fuente DC de 12v y 10 A. En la Figura 3.13 se muestra el circuito regulador de voltaje diseñado con los cálculos que se muestran posteriormente. En esa misma figura se puede apreciar un LM7806, el cual se encarga de mantener a la salida 6v constantes. Según el datasheet de éste dispositivo electrónico, las características más relevantes para el cálculo de la resistencia R1 que está asociada a la entrada de este, son las mostradas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Características regulador LM7806

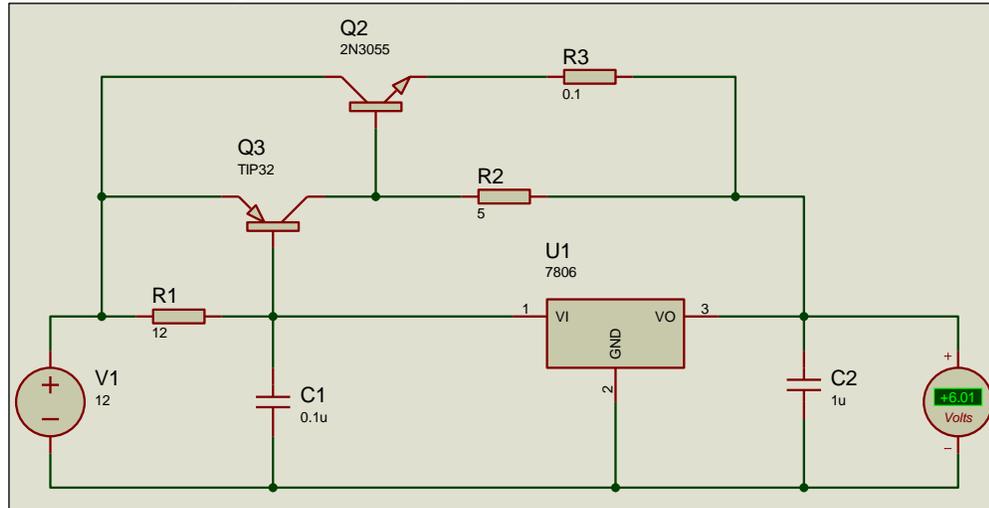
Símbolo	Significado	Rango	Unidad
Vs	Voltaje de salida	6 (4% de tolerancia)	V
Vin	Voltaje de alimentación	8 a 21	V
I(Max)	Corriente máxima	1	A

Fuente: Datasheet LM7806.

Según la Tabla 3.3, la corriente máxima que maneja el LM7806 es de 1A, pero para que toda la corriente no recaiga sobre este dispositivo y que no se dañe, se pretende que la corriente máxima a través de este sea de 50mA (que es el 5% de la máxima corriente [26]), eso se logra calculando el valor de R1 teniendo en cuenta la ley de Ohm mostrada en (3.19), así:

$$V = I * R \quad (3.19)$$

Figura 3.14 Circuito regulador de voltaje



Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2013.

$$R1 = \frac{V}{I} = \frac{0.6v}{50mA} * 1000 = 12 \Omega \quad (3.20)$$

Los 0.6v son para que cuando el servomotor exija más de 50mA se dispare el Tip-32 y con esto el circuito de potencia asociado, y así la corriente restante recaigan en este circuito. El cálculo de las resistencias asociadas a los transistores Tip32 y 2N3055, parte de las características más relevantes de estos semiconductores mostradas en la Tabla 3.4 y en la Tabla 3.5 respectivamente.

Tabla 3.4 Características TIP-32

Símbolo	Significado	Rango	Unidad
I(Max)	Corriente máxima	3	A
V(max)	Voltaje máximo de operación	100	v

Fuente: Datasheet TIP-32.

Tabla 3.5 Características transistor 2n3055 NPN

Símbolo	Significado	Rango	Unidad
I(Max)	Corriente máxima	15	A
V(max)	Voltaje máximo de operación	60	v

Fuente: Datasheet 2n3055 NPN.

Se quiere que por el TIP-32 pase un 20% de su capacidad de corriente, y que el resto lo solvente el transistor 2N3055 a un 40% de su capacidad, por tanto la corriente máxima que entregará el regulador será de 6,6A. Así que, el cálculo de las resistencias R2 y R3 de la Figura 3.14 es:

$$R2 * I2 = 0.6 + R3 * I3 \quad (3.21)$$

Por tanto

$$R2 = \frac{0.6v + R3 * I3}{I2} \quad (3.22)$$

Se escogió una resistencia R3 de alta potencia (P_{R3}), cuya potencia soportada es 5W, para la alta corriente que va a manejar, por tanto, comercialmente se encuentra la de valor 0,1Ω.

$$\text{Entonces sí } I2 = 0.6A, I3 = 6A \text{ y } R3 = 0.1\Omega \quad (3.23)$$

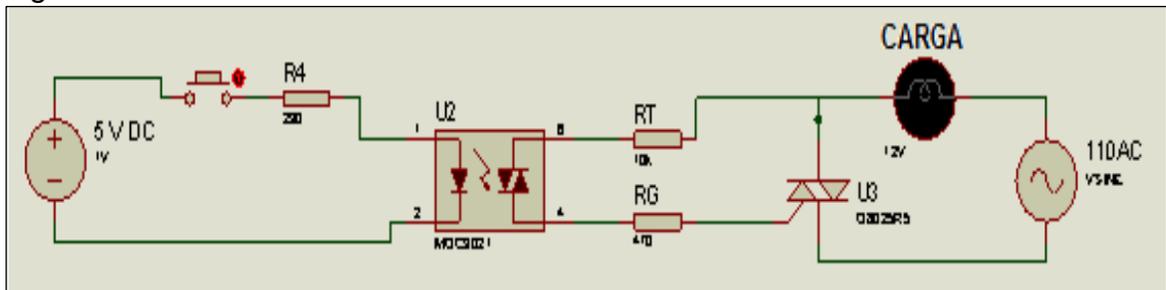
Reemplazando los valores de (3.23) en (3.22) se tiene:

$$R2 = \frac{0.6v + 0.1\Omega * 6A}{0.6A} = 2\Omega \quad (3.24)$$

3.2.2 Circuito de disparo del electroimán.

El circuito encargado de activar y desactivar el electroimán se muestra en la Figura 3.15. En ella se aprecian los diferentes elementos necesarios para su diseño y construcción y el electroimán es referenciado como la carga, además que se hace uso del circuito integrado MOC3021, sus características principales se muestran en la Tabla 3.6.

Figura 3.15 Circuito de diseño del activador del electroimán



Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2013.

Tabla 3.6 Características principales MOC-3021

Símbolo	Significado	Rango	Unidad
VR	Voltaje de conducción	3	V
IF	Corriente de conducción	10	mA
IFT(Max)	Corriente máxima de conducción	15	mA

Fuente: Datasheet MOC3021.

Según la tabla anterior, el cálculo de la resistencia de disparo del optoacoplador sería la siguiente [26]:

$$R4 = \frac{5v}{0.015 A} = 333.33\Omega \quad (3.25)$$

El cual se puede llevar a un valor comercial de 330 Ω .

Para el cálculo de la resistencia de puerta (R_G) del circuito mostrado en la Figura 3.14 [26] se tiene:

$$R_G = \frac{3v-2v}{0.05A} = 20\Omega \quad (3.26)$$

El cual se aproxima al valor comercial teniendo $R_G= 22\Omega$. Los valores de (3.26) fueron dados teniendo en cuenta los datos mostrados en la Tabla 3.6 y la Tabla 3.7, donde se puede determinar que $VR = 3v$. Para el cálculo de la resistencia R_T se tiene en cuenta la información suministrada por la Tabla 3.6 donde se divide el voltaje de conducción sobre la corriente de conducción del MOC3021 [26], haciendo uso de la ecuación (3.19) obteniendo el siguiente resultado:

$$R_T = \frac{3v}{0.01 A} = 300 \Omega \quad (3.27)$$

Aproximándose al valor comercial se tiene que $R_T= 330\Omega$.

Tabla 3.7 Características TRIAC BTA06.

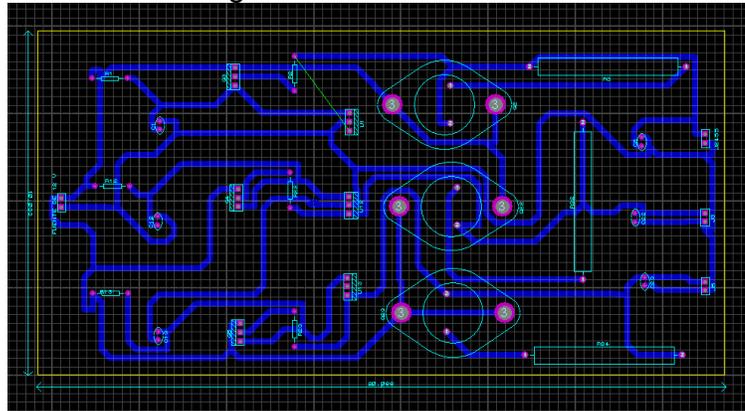
Símbolo	Significado	Rango	Unidad
IG	Corriente de disparo de puerta	50	mA
VG	Voltaje disparo de puerta	2	V

Fuente: Datasheet TRIAC BTA06.

3.2.3 Diseño de la Tarjeta impresa

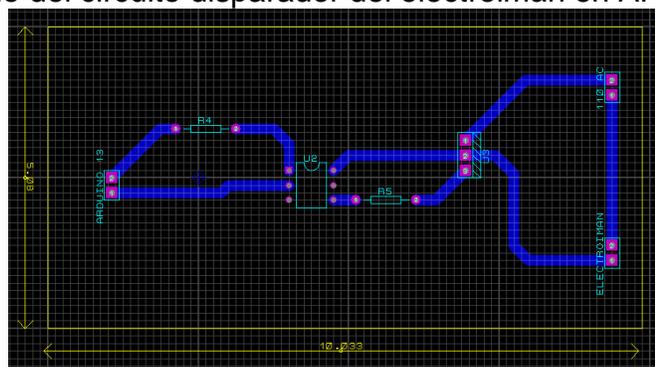
Teniendo en cuenta los diferentes circuitos de regulación de los tres servomotores y el circuito de disparo del electroimán, se procede a integrarlos todos en una sola tarjeta. Para ello se hizo uso del programa de diseño de circuitos electrónicos ISIS Proteus²⁷, también haciendo uso de su complemento ARES, el cual es el programa para el diseño de circuitos integrados permitiendo ver las diferentes piezas en la tarjeta en modo tridimensional. En las siguientes figuras se muestra el proceso de diseño de la tarjeta a imprimir. Finalmente se muestra el circuito final impreso en la Figura 3.19.a, y en la 3.19.b se muestra el mismo circuito ubicado en el panel respectivo.

Figura 3.16 Diseño circuitos reguladores en ARES Proteus.



Fuente: Elaboración propia, Mayo 2013.

Figura 3.17 Diseño del circuito disparador del electroimán en ARES Proteus



Fuente: Elaboración propia, Mayo 2013.

²⁷ ISIS Proteus e ARES Proteus son programas de diseño de circuitos electrónicos y diseño de tarjetas impresas de la marca LABCENTER. Para mayor información, diríjase a www.labcenter.com.

Figura 3.18 Vista 3D de la tarjeta electrónica

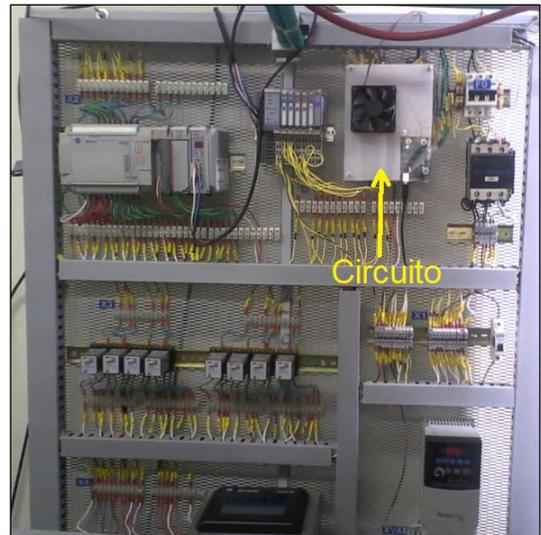


Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2013.

Figura 3.19 Circuito Impreso



a. Circuito impreso



b. Circuito impreso en panel (bajo el protector blanco).

Fuente: Elaboración propia, Mayo de 2013.

3.2.4 Interfaz Robot-Usuario

Además de los circuitos de adecuación mostrados anteriormente, se implementó una interfaz que a través de 5 switches enciende el robot y se le da la orden acerca de la característica de clasificación que se requiere para el armado del pack. Esa interfaz se muestra en la Figura 3.20, donde se logra apreciar los 5 botones o switches mencionados. El botón verde cuadrado se encarga del encendido y apagado del brazo robótico. Éste se usa para activar o desactivar el brazo en el momento de uso de la planta. Los cuatro botones siguientes representan las 4 clases de clasificación que se dispone. Importante resaltar que

únicamente debe estar activado un solo botón de las clases al momento de realizar la práctica con el brazo robótico, y que éste se debe desactivar una vez el robot empieza con la tarea de posicionamiento de botellas. El botón número 1 de color verde, representa la clase 1, el botón 2, de color amarillo, la clase 2, el botón 3, de color rojo, la clase 3, y el botón 4, de color negro, para armar el pack con la clase 4. Para determinar a qué tipo de clasificación corresponde cada clase, diríjase a la Tabla 2.8.

Figura 3.20 Interfaz brazo robótico



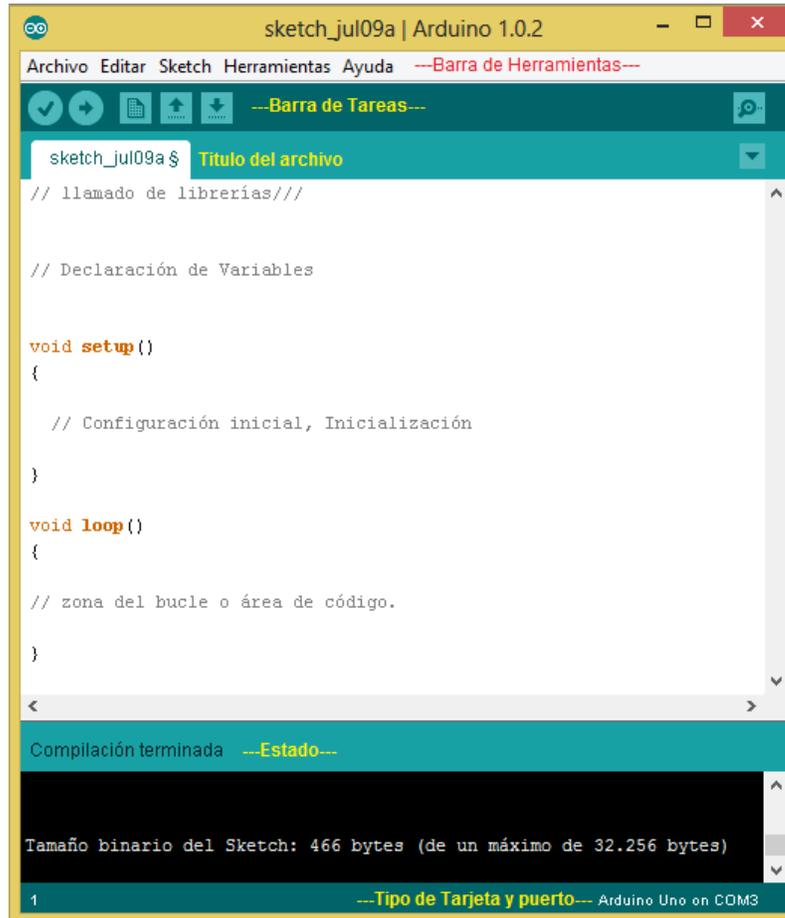
Fuente: Elaboración propia, Junio 2013.

3.3 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN DEL ROBOT.

Debido a que se hará uso de la Tarjeta Arduino Uno R3, su programación está regida por la programación que maneja ésta tarjeta, es decir la programación brindada por el lenguaje Arduino, que está basado en lenguaje C/C++.

La interfaz de programación que presenta el lenguaje Arduino, es la que se muestra en la Figura 3.21. En ella se identifica los diferentes componentes de ésta. En su parte intermedia se encuentra el área de scripts o área de código, donde se escribirán las diferentes rutinas. Los programas hechos con Arduino se dividen en tres partes principales: estructura, valores (variables y constantes), y funciones [25]. El código realizado se puede apreciar en el Anexo C de éste documento.

Figura 3.21 Interfaz Arduino

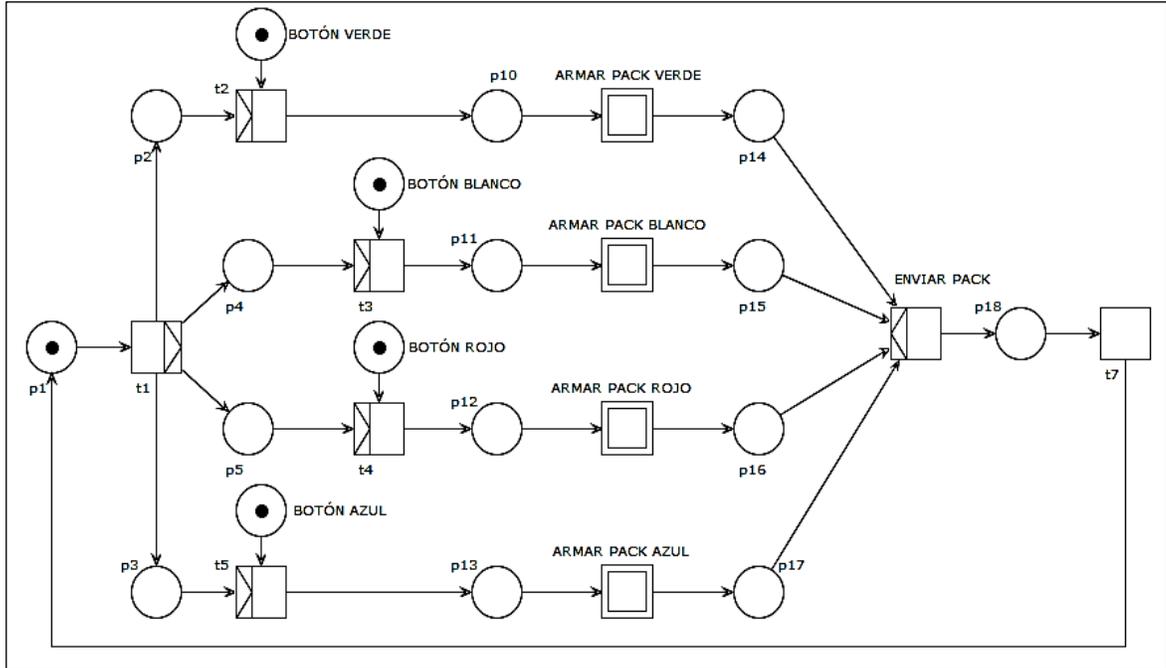


Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

3.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL BRAZO ROBÓTICO

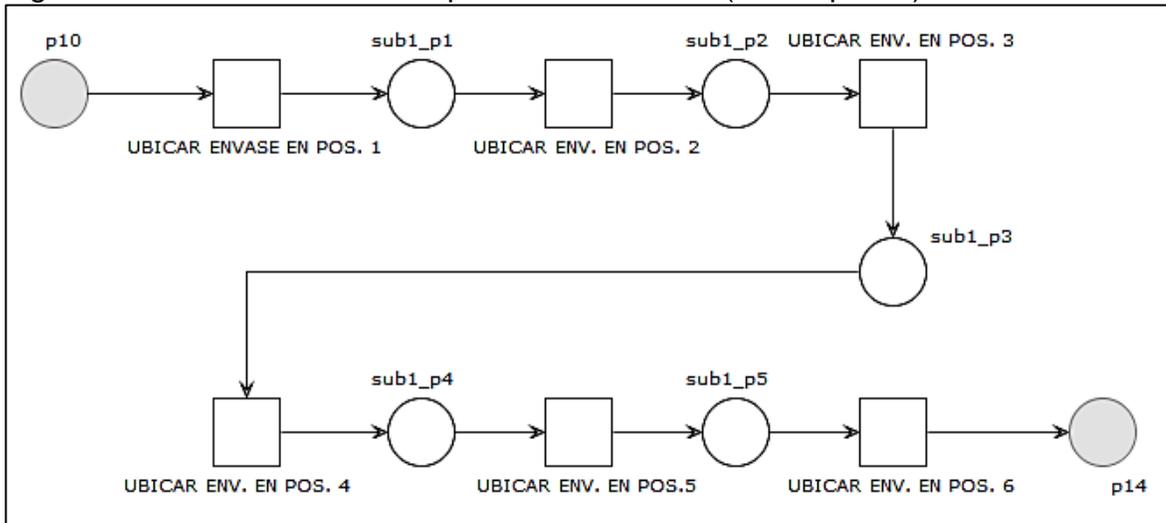
La Figura 3.22 muestra el proceso general en redes de Petri de Work-Flow, con el cual se pone a prueba el robot en la línea de producción. Representa la dinámica como tal de este proceso. En la parte izquierda de la imagen se puede observar que el proceso comienza agregándole marcaje en un lugar determinado, que para el caso de este proyecto representa el botón de ON/OFF del Robot clasificador, luego se pasa a la decisión de qué producto se desea clasificar de los cuatro tipos antes mencionados; dependiendo del marcaje que se agregue en el lugar determinado, se optara por armar *six-pack's* de un tipo específico de producto, estos marcajes en estos lugares representan las opciones que tiene el Robot (4 botones) para escoger el tipo de producto a embalar en el six-pack, por último se termina con el pack lleno, y se vuelve al inicio para seguir el ciclo de embalaje del robot.

Figura 3.22 Modelo en red de Petri del proceso General.



Fuente: Elaboración propia, Junio 2013.

Figura 3.23 Modelos de los subprocessos anidados (Armar packs).

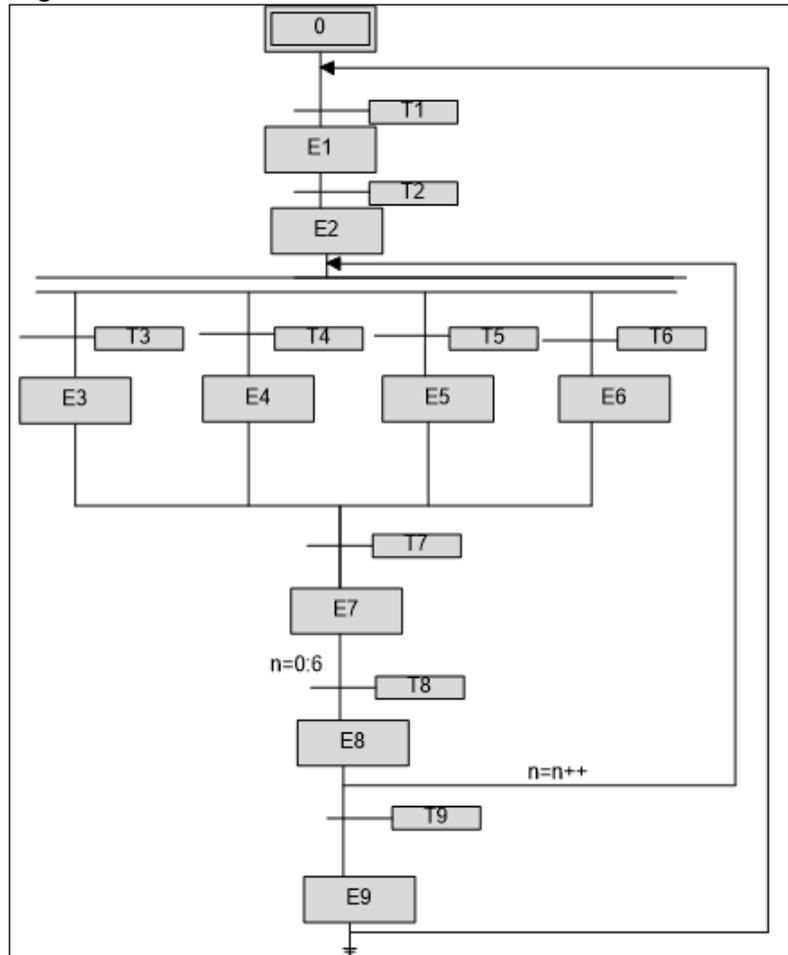


Fuente: Elaboración propia, Junio 2013.

Los cuatro subprocessos anidados en el proceso de embalaje de envases, tienen la misma finalidad y es ubicar secuencialmente cada producto en un *six-pack* o matriz de 3X2 en un orden específico y ordenado. Tal subprocesso se detalla en la

Figura 3.23. En ella, se especifica que la ubicación final de las botellas se hace en orden sobre la matriz de 3X2 mencionada, hasta llegar a la sexta y última posición.

Figura 3.24 Diagrama Grafcet del funcionamiento del Robot.



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

Posteriormente, se muestra el diseño del diagrama Grafcet del comportamiento del brazo robótico, como se ve en la Figura 3.24, en donde se aprecia el flujo de información y ejecución de funciones de manera consecutiva. El proceso comienza con el accionamiento del botón ON/OFF integrado en la banda transportadora, una vez éste es accionado, comienza el proceso ubicándose el Robot en la posición inicial definida, luego de esto se corrobora que haya una señal desde el PLC a la entrada del sistema robótico para que luego el robot lea la tarea de clasificación que debe realizar. El robot realiza la lectura del botón presionado y comienza el proceso de embalaje de un pack correspondiente ubicándose en la posición A, B, C ó D, según la selección del usuario. Hecho esto, se enciende el electroimán o efector final del sistema robótico, toma el envase y

luego lo lleva a la posición asignada. Este proceso se realiza seis veces. Una vez lleno el six-pack, el proceso termina y vuelva al inicio. Los estados y transiciones correspondientes al diagrama mostrado en la Figura 3.24 se exponen en la Tabla.

Tabla 3.8 Estados y Transiciones del diagrama Grafcet.

Estados	
Nombre	Acción
E1	Ubicar Robot en posición inicial.
E2	Leer ubicación de envase desde el PLC.
E3	Ubicar Robot en posición A.
E4	Ubicar Robot en posición B.
E5	Ubicar Robot en posición C.
E6	Ubicar Robot en posición D.
E7	Encender electroimán.
E8	Ubicar envase n en posición n (desde n=0 hasta n=5)
E9	Enviar mensaje de pack lleno.
Transiciones	
Nombre	Acción
T1	Botón de Start= on.
T2	PLC=on.
T3	Botón de Clasificar_Verde= on.
T4	Botón de Clasificar_Blanco = on.
T5	Botón de Clasificar_Rojo= on..
T6	Botón de Clasificar_Azul = on.
T7	Sensor de presencia = on.
T8	n<5 y electroimán=on.
T9	n>5.

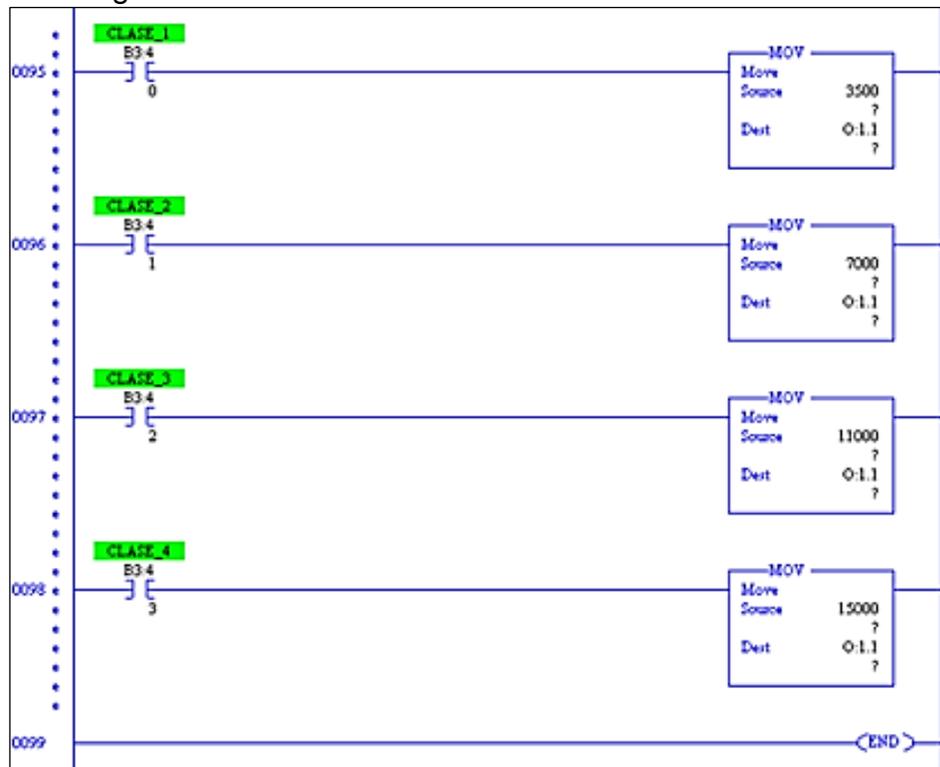
Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

3.5 COMUNICACIÓN PLC-ROBOT

El diagrama en escalera para que el PLC envíe la señal de acuerdo al tipo de clasificación es el mostrado en la Figura 3.25. Lo que se pretende con la implementación de éste algoritmo en programación ladder es transferir el valor fuente correspondiente a cada instrucción MOV hacia el bit de salida (en este caso O:1.1) que se conecta a la entrada A0 de la tarjeta Arduino. El valor enviado será el correspondiente a la posición en la que debe ubicarse el brazo robótico para tomar la botella. Por ejemplo, si se activa el bit de clase 1, quiere decir que la botella a clasificar corresponde a esa clase, y por tanto, se enviará el valor 3500 a la entrada analógica A0 de la tarjeta Arduino, ésta tarjeta lo toma y con código adecuado, transformará ese valor recibido en un valor de voltaje entre 1 y 5v, valor

que le dará la posición al brazo robótico para que éste tome la botella y la ubique en su posición final. La Tabla 2.7 muestra los valores dados por el PLC que son leídos por la tarjeta Arduino y su respectiva conversión a voltaje para su interpretación por parte del brazo robótico acerca de la posición en la que debe recoger las botellas.

Figura 3.25 Diagrama Ladder



Fuente: Elaboración propia, Junio de 2013.

3.6 TRAYECTORIAS EN EL ESPACIO ARTICULAR

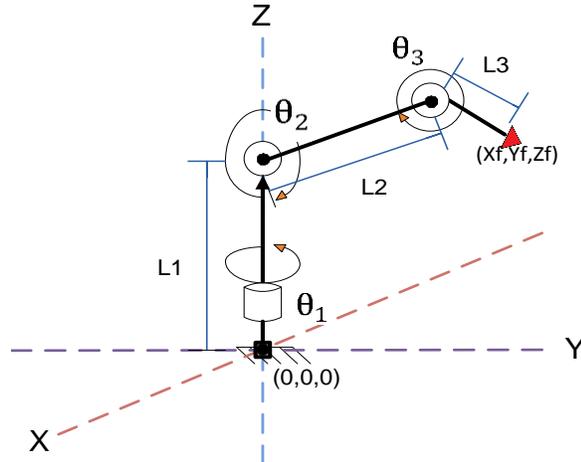
Para definir el recorrido que el robot tiene que hacer para lograr el objetivo de tomar todas las clases de botellas de la línea de producción, se parte de identificar el espacio donde se encuentra situado este sistema robótico y los obstáculos que tiene que evadir para llegar cómodamente a una posición final deseada.

En la Figura 3.26 se puede apreciar que para que el sistema robótico tome el envase y lo ubique en la respectiva posición asignada en el six-pack, el robot tiene que evadir un obstáculo presentado por el protector metálico del recolector, impidiendo el movimiento en sentido horizontal hacia la parte derecha del mismo, por tanto es necesario definir puntos medios para asegurar que el brazo pueda

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{Y_f}{X_f} \quad (3.28)$$

$$\theta_2 = a + b \quad (3.29)$$

Figura 3.27 Representación del robot en el plano cartesiano.



Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Teniendo para a y b que si $Z_f > l_1$:

$$a = \cos^{-1} \left(\frac{(-l_3^2 + l_2^2 + C^2)}{(2 * l_2 * C)} \right) \quad (3.30)$$

Y

$$b = \tan^{-1} \frac{Z_f - l_1}{r} \quad (3.31)$$

Pero si $Z_f < l_1$ se tiene que:

$$a = - \left(\cos^{-1} \left(\frac{(-l_3^2 + l_2^2 + C^2)}{(2 * l_2 * C)} \right) \right) \quad (3.32)$$

Y

$$b = - \left(\tan^{-1} \frac{l_1 - Z_f}{r} \right) \quad (3.33)$$

Y para la tercera articulación se tiene:

$$\theta_3 = - \left(\tan^{-1} \left(\frac{Z_1 - (Z_f - l_1)}{r - r_1} \right) + \theta_2 \right) \quad (2.58)$$

Para mayor detalle acerca del proceso realizado para hallar éstas coordenadas articulares, diríjase al Anexo B del presente documento.

Debido a la presencia de la función coseno en el cálculo de θ_2 , como lo muestra la ecuación (3.32), que es una función trigonométrica par, existen pequeños

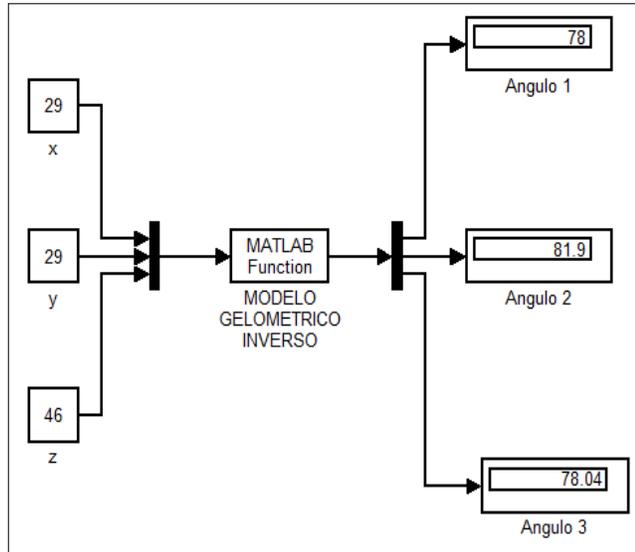
cambios en la obtención de los ángulos, por tanto analizando las posiciones necesarias para que el robot haga su recorrido satisfactoriamente y cumplir con el objetivo planteado se tiene la Tabla 3.9 para el modelo geométrico inverso:

Tabla 3.9 Condiciones para los parámetros del Modelo Geométrico Inverso.

Condición	θ_2	θ_3
si $Z_f > l_1, r > r1$ y $(Z1+l_1) > Z_f$	$\theta_2 = a + b$	$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{Z1 - (Z_f - l_1)}{r - r1}\right) + \theta_2\right)$
si $Z_f > l_1, r < r1$ y $(Z1+l_1) > Z_f$	$\theta_2 = a + b$	$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{r1 - r}{Z1 - (Z_f - l_1)}\right) + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)$
si $Z_f > l_1, r > r1$ y $(Z1+l_1) < Z_f$	$\theta_2 = a + b$	$\theta_3 = -\left(\theta_2 - \tan^{-1}\left(\frac{Z_f - (Z_f + l_1)}{r - r1}\right)\right)$
si $Z_f < l_1, r < r1$ y $(l_1 - Z1) > Z_f$ ($\theta_2 < 0$)	$\theta_2 = -(b - a)$	$\theta_3 = -\left(\tan^{-1}\left(\frac{ r1 - r }{l_1 - Z1 - Z_f}\right) + \theta_2 + \frac{\pi}{2}\right)$
si $Z_f < l_1, r > r1$ y $(l_1 - Z1) > Z_f$ ($\theta_2 < 0$)	$\theta_2 = -(b - a)$	$\theta_3 = -\left(\theta_2 - \tan^{-1}\left(\frac{l_1 - Z1 - Z_f}{ r - r1 }\right)\right)$

Fuente: Elaboración propia. Abril 2013.

Figura 3.28 Aplicación MGI



Fuente: Elaboración propia, Septiembre de 2013

Para la correcta ubicación en el recorrido del robot se partió de identificar las posiciones cartesianas involucradas en el recorrido y haciendo uso del modelo geométrico inverso del robot hallado por análisis geométrico detallado, como se explica anteriormente, se obtuvieron las coordenadas articulares para que los servomotores del robot tengan un adecuado posicionamiento y alcance las posiciones cartesianas deseadas.

Utilizando la aplicación mencionada en la Figura 3.27 realizada con el MGI, se determinan las diferentes coordenadas articulares para cada una de las posiciones cartesianas en las que se debe ubicar el brazo robótico, generando posteriormente las trayectorias correspondientes, mostradas en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Coordenadas cartesianas que definen las diferentes trayectorias.

Posiciones a alcanzar	Coordenadas Cartesianas			Coordenadas Articulares		
	x	y	z	θ_1	θ_2	θ_3
Posición inicial	0	35	42	33	80	55
Posición botella tapa verde	0	8.5	20	33	17	13
Posición botella tapa blanca	0	16	22	33	28	21
Posición botella tapa roja	0	25	22	33	42	43
Posición botella tapa azul	0	36	22	33	47	76
Posición de giro	0	36	65	33	95	64
Posición 1 six pack	38	12	46	105	83	73
Posición 2 six pack	29	12	46	100	89	44
Posición 3 six pack	38	20	46	95	79	85
Posición 4 six pack	29	20	46	88	86	57
Posición 5 six pack	38	29	46	85	72	109
Posición 6 six pack	29	29	46	78	71	78

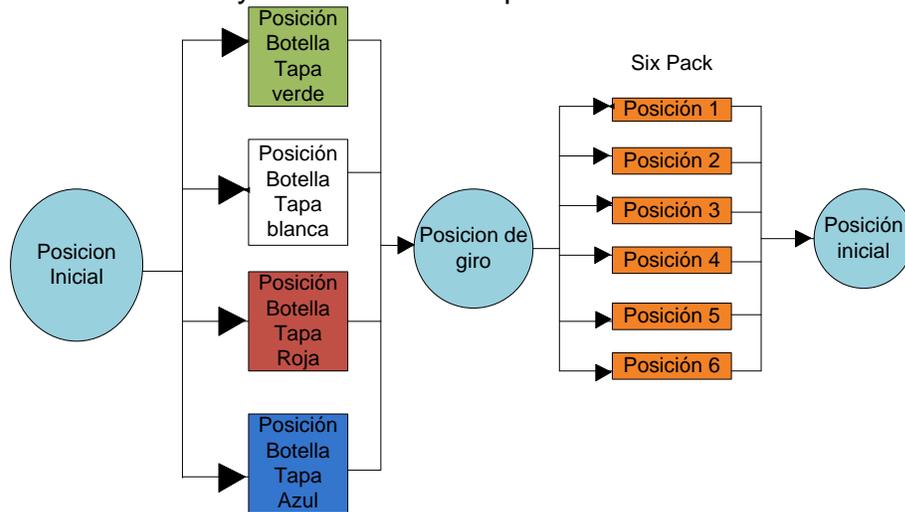
Fuente: Elaboración propia, Septiembre de 2013.

Definición de trayectorias para el brazo robótico implementado

Una vez identificadas las coordenadas articulares y cartesianas para las posiciones deseadas del sistema robótico, se definen los recorridos que debe realizar, obteniendo así 24 trayectorias diferentes para que el sistema robótico cumpla con el objetivo del proceso de armado de six-paks.

Tales trayectorias se muestran en el diagrama mostrado en la Figura 3.30. En ella se aprecia que el brazo inicia su recorrido en una posición inicial, posteriormente se dirige a una de las cuatro posiciones donde recoge cada botella, luego se ubica en la posición de giro para poder sobrepasar el obstáculo mencionado anteriormente, seguidamente se ubica en una de las seis posiciones finales dadas por el pack y finalmente, se devuelve hacia la posición inicial.

Figura 3.29 Diferentes trayectorias tomadas por el brazo robótico.



Fuente: Elaboración propia. Septiembre de 2013.

Desplazamiento punto a punto del sistema robótico.

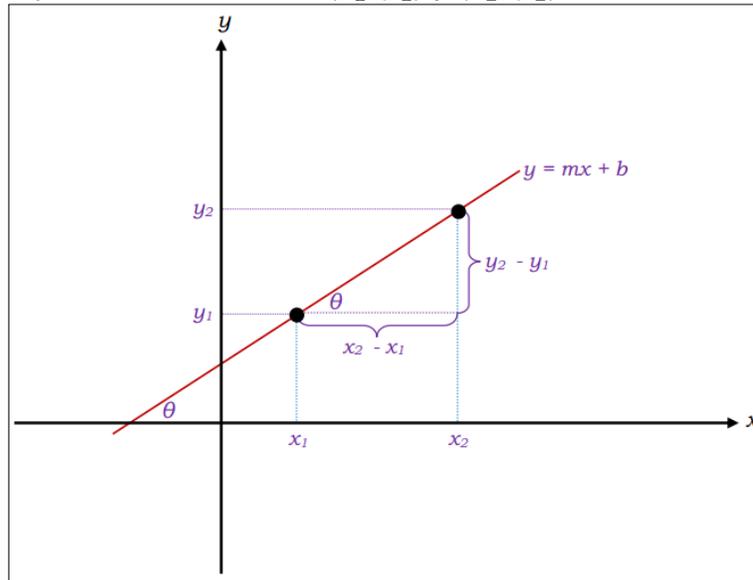
Interpolación lineal [27]

La interpolación lineal es el método más simple en uso hoy. Es el método usado por los programas de generación de gráficos, donde se interpola con líneas rectas entre una serie de puntos que el usuario quiere graficar. La idea básica es conectar los 2 puntos dados en x_i , es decir (x_1, y_1) y (x_2, y_2) . La función interpolante es una línea recta entre los dos puntos.

Para el desplazamiento punto a punto del robot, se utilizó la interpolación lineal haciendo uso de líneas rectas entre los puntos de partida y de llegada. En la Figura 3.31 se muestra el comportamiento de los servomotores realizando una trayectoria de la tarea armado de six-packs.

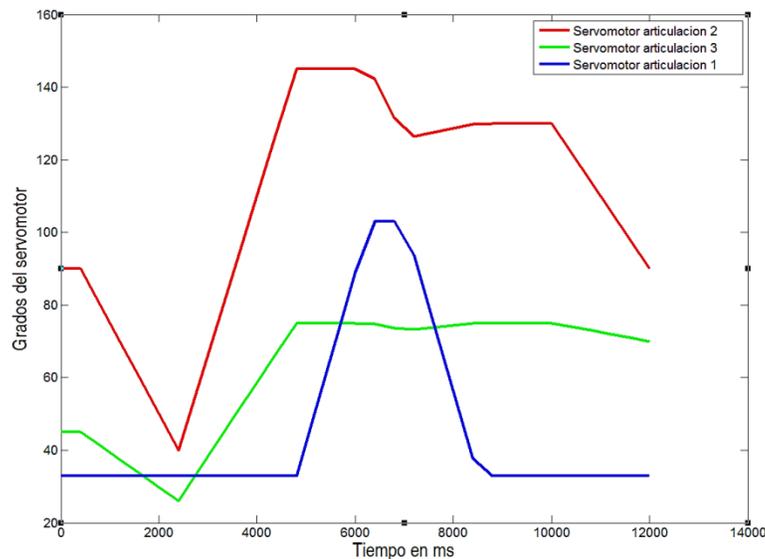
En la Figura 3.32 se puede apreciar que los servomotores asignados para cada articulación, realizan recorrido en línea recta haciendo uso de una función lineal, obtenida por una interpolación lineal. Cabe resaltar que al utilizar este tipo de interpolación para las diferentes trayectorias del robot, se está obteniendo una trayectoria no deseada, debido a los cambios bruscos de pendiente, además de obtener una función cuya derivada es una función escalón y segunda derivada una función impulso, como se aprecia en la Figura 3.33, respuesta que se ve reflejada proporcionalmente en la velocidad obteniendo una función no continua para esta variable y una aceleración tendiendo a infinito en los puntos de cambio de velocidad, colocando en riesgo la estructura interna de los actuadores, en este caso la piñonera de los servomotores.

Figura 3.30 Interpolación lineal entre (x_1, y_1) y (x_2, y_2) .



Fuente: [27].

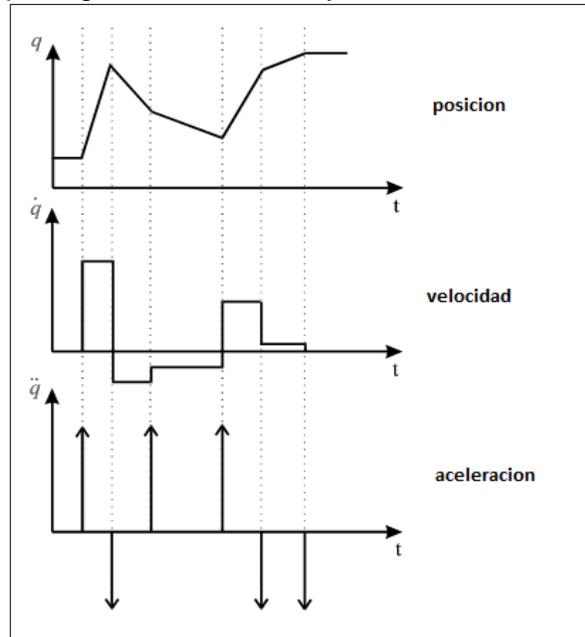
Figura 3.31 Posicionamiento de los servomotores en una trayectoria.



Fuente: Elaboración propia. Septiembre de 2013.

Se recomienda realizar trayectorias suaves utilizando tipos de interpolación que utilicen polinomios de grado 3 o superior, logrando así una respuesta en posicionamiento y velocidad suaves, así como una función aceleración continua. (Interpolación spline cubica que utiliza un polinomio de grado tres o tipo bang – bang que utiliza un polinomio de grado 5)

Figura 3.32 Comportamiento de un sistema de posicionamiento utilizando interiorización lineal para generación de trayectorias.



Fuente: Elaboración propia. Septiembre de 2013

4 RESULTADOS IMPLEMENTACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO

En este último capítulo del proyecto se presentan los resultados de las pruebas realizadas haciendo uso del brazo robótico implementado en la planta de clasificación del laboratorio de control de procesos de la Universidad del Cauca. Se detallarán los diferentes propósitos de las pruebas realizadas así como su procedimiento respectivo y luego se exponen los resultados en gráficos para un posterior análisis. Finalmente, se mostrarán los resultados de la encuesta sobre la ejecución del manual de usuario y puesta en marcha a cargo de diferentes estudiantes. Para mayor información acerca de las tablas de resultados obtenidos, diríjase al Anexo E del presente proyecto y el formato usado como encuesta acerca del manual de usuario se muestra en el Anexo F.

4.1 PRUEBAS FUNCIONALES

Luego de terminar con la implementación del brazo robótico, se procede con las pruebas que determinarán la funcionalidad tanto del brazo estructural como de los algoritmos implementados en la tarjeta Arduino y en el PLC. Tales pruebas consistieron en el armado de *six-packs* con botellas del mismo color de tapa que es establecido por el usuario. Así, se realizaron pruebas para el cumplimiento de tres propósitos que se mencionan a continuación. Cabe resaltar que las pruebas mencionadas se realizaron a una velocidad de 20cm/s.

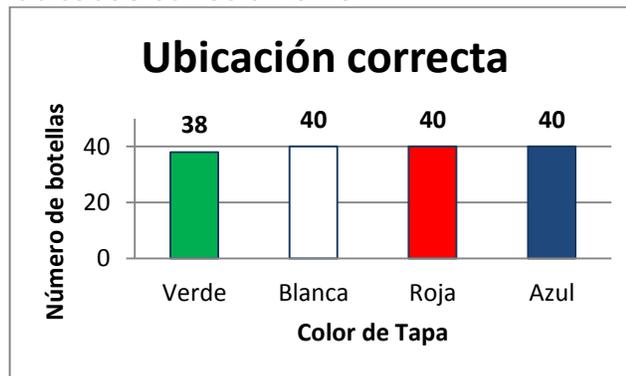
- **Primer propósito:** Identificar el porcentaje de error en el armado de los diferentes packs.

Procedimiento: Armar 7 packs de cada color de tapa y tomar datos para verificar si presenta error en la ubicación de las botellas. Se pone en marcha la planta, igualmente a 20cm/s, y el robot se inicia para armar cada pack de botellas con el color de tapa requerido. Se realiza 7 packs, es decir, 42 botellas por cada color de tapa y en total 168 botellas. Se determinan los errores en la ubicación y en el agarre de cada botella y finalmente se establece su porcentaje con respecto al total.

Resultados: En la Figura 4.1 se muestran los resultados de armar 7 packs de cada color. En ella se determina cuántas botellas en cada pack dependiendo del color de tapa se posicionaron satisfactoriamente. De aquella figura, se obtiene que de 168 botellas que el brazo robótico debía tomar y ubicar en cada posición final respectiva, logró hacerlo correctamente con 158, obteniendo así un error de posicionamiento de

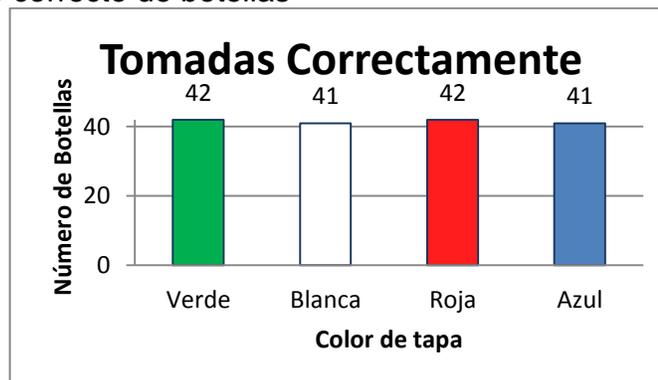
5.9%. Además, también se puede apreciar que el error de posicionamiento para cada color de tapa es de 9,5% para las de tapa verde y 4,7% para las demás botellas respectivamente. Con respecto al agarre, en la Figura 4.2 se puede apreciar que para las botellas de tapa color verde y rojo, no tuvo ningún problema en tomar las 42 botellas, generando un error de 0%, mientras que para las botellas cuya tapa son de color blanco y azul, presentaron error en una botella para cada caso, por tanto presenta un error de 2% respecto a las 42 botellas.

Figura 4.1 Botellas ubicadas correctamente.



Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

Figura 4.2 Agarre correcto de botellas



Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

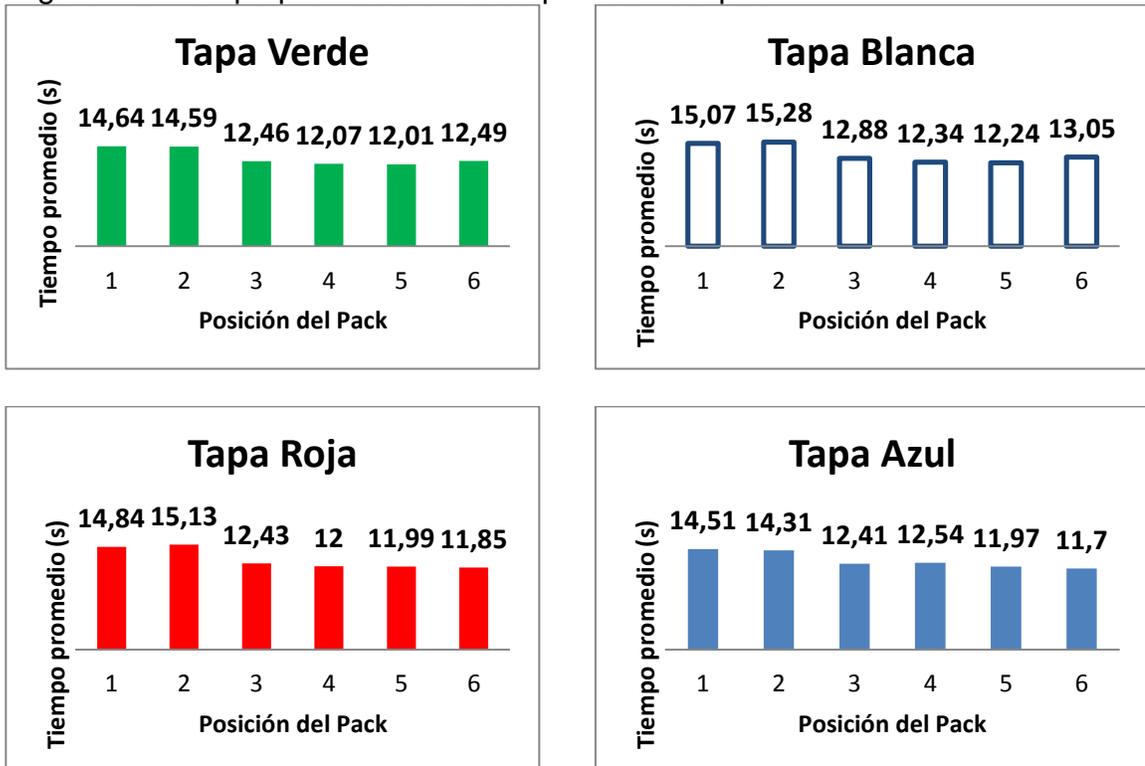
- **Segundo propósito:** Identificar el tiempo promedio en el que el brazo robótico toma la botella y la ubica en la posición específica y regresa al punto a tomar la siguiente.

Procedimiento: Ejecutar los algoritmos de clasificación de la planta y poner en marcha el brazo para que realice su trabajo de traslado de las botellas al

pack correspondiente. Registrar el tiempo desde el momento en que toma la botella hasta que regresa a la posición requerida para sujetar la siguiente. Esto se hace para cada uno de los colores de tapa y para cada posición final del pack, que son 6, además, este procedimiento se realiza 3 veces por cada color de tapa.

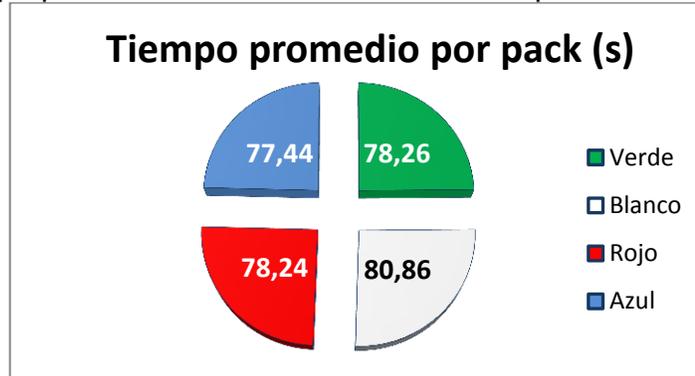
Resultados: En Figura 4.3 se exponen los resultados de realizar el procedimiento con el objetivo de cumplir el segundo propósito. En ella se muestran los tiempos promedios tomados por el brazo robótico en sujetar cada botella en su lugar inicial, dejarla en la posición final respectiva en el pack y regresar a la posición a sujetar la siguiente botella. En la Figura 4.4 se logra observar el tiempo promedio total en el armado de un pack correspondiente a cada color, que es el tiempo en el que el robot realiza la ubicación completa de las seis botellas. Tomando estos datos, se puede apreciar que en promedio, el brazo robótico tarda 78,7 segundos o 1,19 minutos en armar completamente un pack. (Esto se logra teniendo en cuenta que la botella es tomada inmediatamente cuando el brazo llega a la posición requerida para ello).

Figura 4.3 Tiempo promedio en cada posición del pack.



Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

Figura 4.4 Tiempo promedio en el armado total de un pack de cada color.



Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

- **Tercer propósito:** Determinar la distancia (o tiempo) en que deben estar separadas las botellas que serán tomadas para el pack.

Procedimiento: Calcular el tiempo de ida y regreso del brazo robótico y mediante cálculos matemáticos, determinar dicha distancia o tiempo, este valor depende de la velocidad de trabajo configurada para la planta. Debido a que ya se tienen datos acerca del tiempo en que se tarda el brazo en la ubicación de las botellas en cada posición, ver Tabla 4.1, sólo se deben realizar cálculos teniendo en cuenta la ecuación 4.1, en donde se establece que la velocidad v depende de la distancia recorrida d en un determinado tiempo t . Por ello, si se tiene la velocidad, que es de la que se establezca para el movimiento de las botellas en la banda (tal velocidad debe estar entre 10cm/s y 40cm/s), la distancia y tiempo se calculan con la ecuación 4.1 y se muestran en la siguiente tabla.

Resultados: Además de la ecuación mencionada, se debe tener en cuenta también los datos promedios totales en que tarda el brazo en ubicar las botellas para cada posición, tales datos se toman de la Tabla 4.2.

$$v = \frac{d}{t} \quad (4.1)$$

Tabla 4.1 Distancia entre botellas según velocidad de la planta.

Velocidad planta (cm/s)	Tiempo promedio total en cada posición (s).						
	Posición 1	Posición 2	Posición 3	Posición 4	Posición 5	Posición 6	Prom.
	14,76	14,83	12,55	12,24	12,05	12,27	13,12
10	147,6	148,3	125,50	122,4	120,5	122,7	131,17
15	221,4	222,45	188,25	183,6	180,75	184,05	196,75

20	295,2	296,6	251,00	244,8	241	245,4	262,33
25	369	370,75	313,75	306	301,25	306,75	327,92
30	442,8	444,9	376,50	367,2	361,5	368,1	393,50
35	516,6	519,05	439,25	428,4	421,75	429,45	459,08
40	590,4	593,2	502,00	489,6	482	490,8	524,67

Fuente: Elaboración propia, Julio 2013.

Debido a que las pruebas se realizaron a una velocidad de 20cm/s, y teniendo en cuenta el valor promedio de los tiempos en que tarda el brazo robótico en ubicar las botellas y volver a la posición, que es de 13,12 segundos, se determina que la distancia entre botellas debe ser de aproximadamente 263cm, y en tiempo corresponde a ubicar la siguiente botella a 13 segundos aproximadamente a partir de la ubicación de la primera. Este cálculo también se toma de la ecuación 4.1.

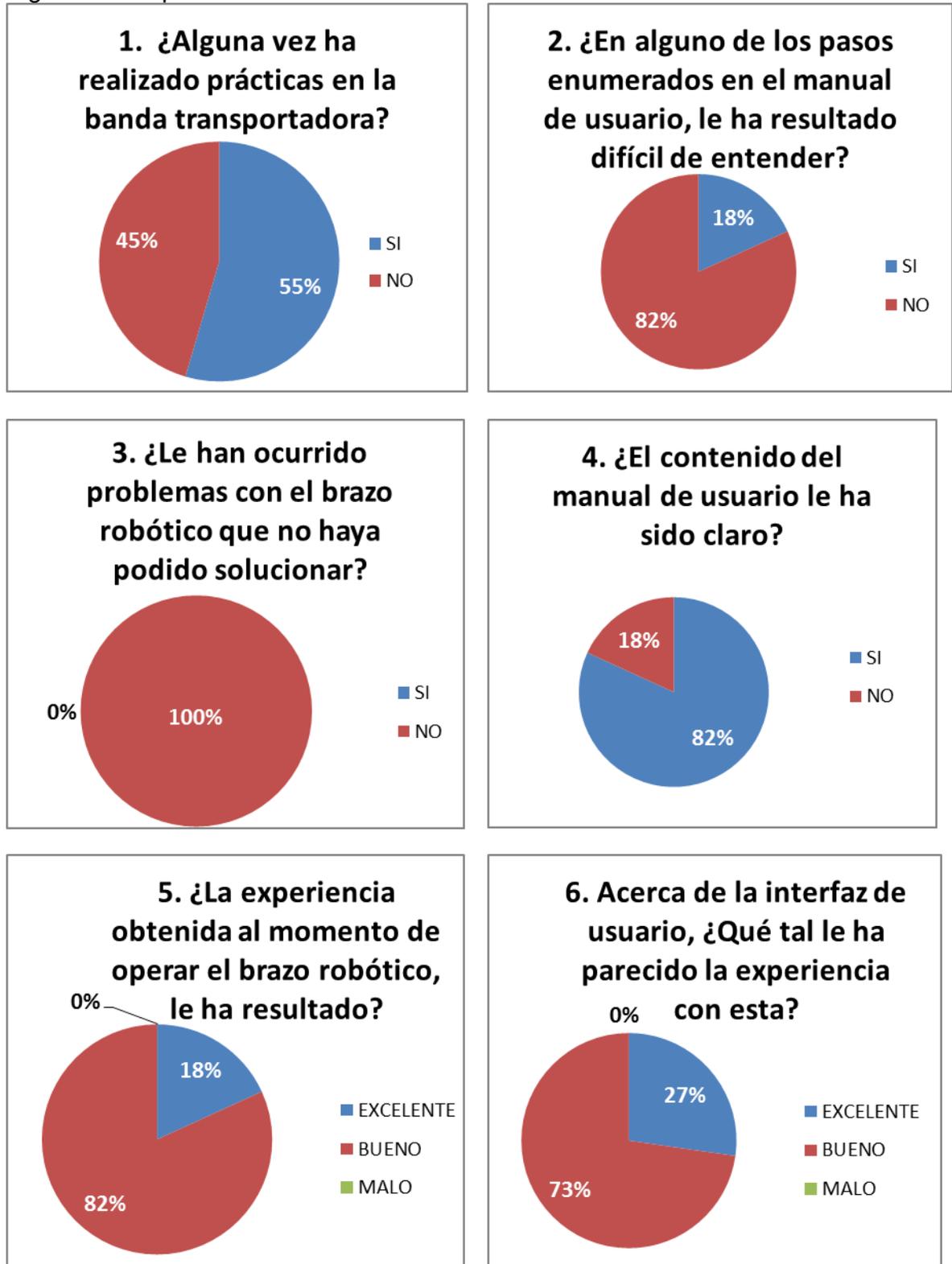
4.2 PRUEBAS CON ESTUDIANTES

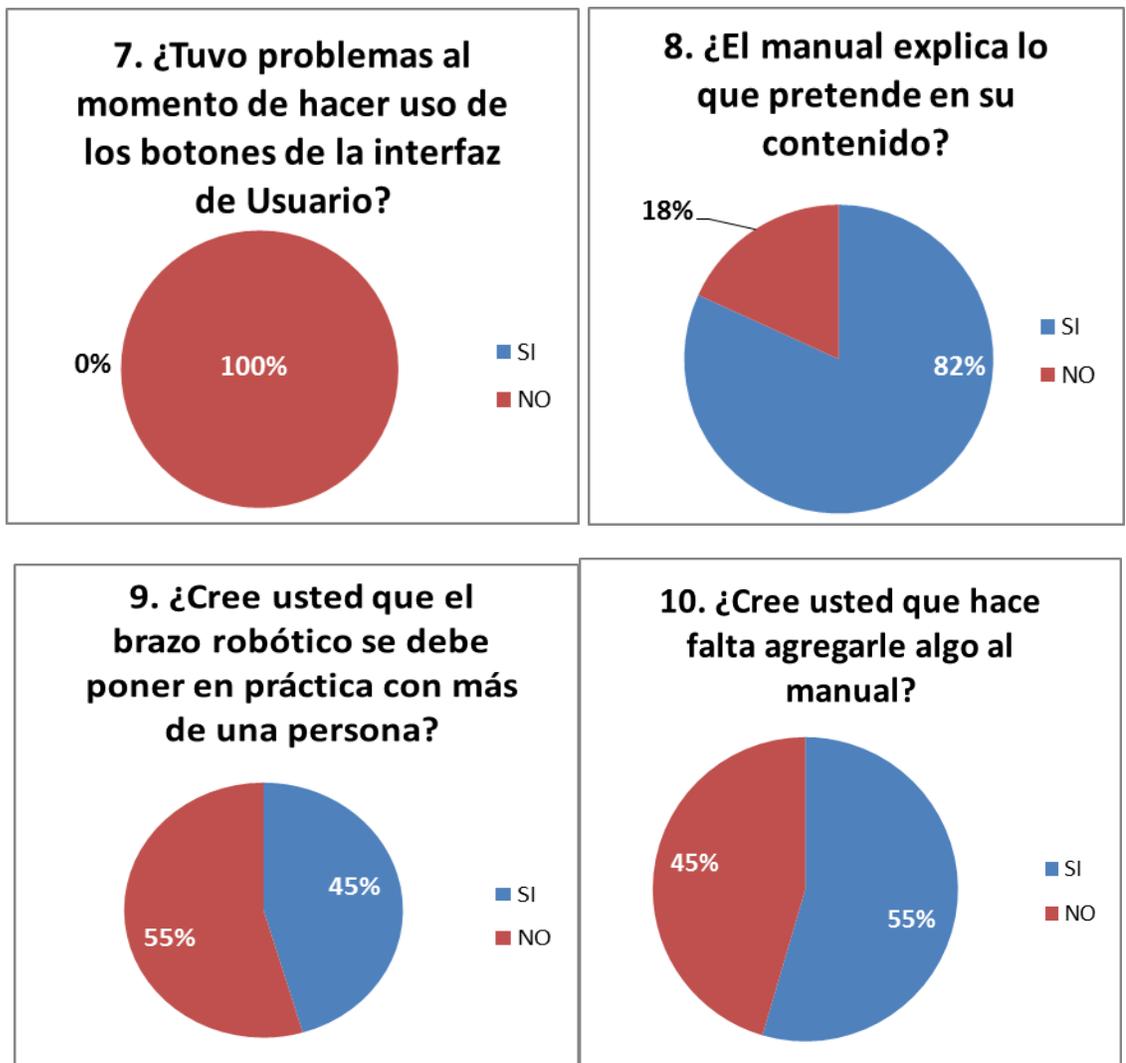
Propósito: Evaluar la claridad del manual de usuario diseñado para la puesta en marcha del brazo robótico con estudiantes de la universidad del cauca del programa de Ingeniería en Automática Industrial que perteneces a diferentes semestres.

Procedimiento: Esta prueba fue realizada por 11 estudiantes quienes leyeron y realizaron cada uno de los pasos allí establecidos y describen el proceso de puesta en marcha del brazo robótico. Luego de terminada la práctica con cada estudiante se les entregó la encuesta mostrada en el Anexo F con el fin de medir su nivel de entendimiento y satisfacción con respecto a la interfaz de usuario y funcionamiento del brazo.

Resultados: En la Figura 4.5 se muestran las representaciones de los resultados obtenidos para cada una de las preguntas. Para las respuestas en donde se solicitaban consideraciones, algunas de esas respuestas se mencionan posteriormente.

Figura 4.5 Representación de resultados de la encuesta.





Fuente: Elaboración propia, Agosto 2013.

Como se aprecia, de manera general, los estudiantes pudieron realizar el manual sin mayor problema tomando como guía el manual de usuario que se les fue dado. Hubieron, sin embargo algunas consideraciones por parte de los estudiantes respecto a la pregunta 10, en la cual, más de la mitad de ellos concordaron en que hubo falta mejorar algo en el manual. Al detallar las respuestas, se notó que la mayoría de los que afirmaron tal necesidad, coincide con el aumento de imágenes que ayuden al entendimiento en las diferentes conexiones y explicaciones dadas, especialmente en el descargar el código en la tarjeta Arduino. Tales consideraciones se han tenido en cuenta para la mejora de la guía. Concluyendo así que el brazo robótico y su guía de uso, obtuvieron resultados satisfactorios.

CONCLUSIONES

Se construyó un robot de tres grados de libertad con posibilidad de agarre, capaz de posicionar las diferentes botellas de la línea de producción, logrando que la banda transportadora del laboratorio de procesos de la universidad del Cauca cuente con un sistema más completo al momento de realizar la tarea de clasificación, dejando como prueba de ello la aplicación de armado de six-packs por parte del robot.

Se logró realizar una comunicación simplex entre el PLC y el robot, permitiendo el correcto posicionamiento del robot, además de una buena sincronización entre el sistema de clasificación y el robot.

Se diseñó y construyó una estructura robótica robusta, resistente y firme, capaz de ubicarse fácilmente en el campo de trabajo requerido.

Con el fin de disminuir el efecto de la inercia en los movimientos del robot, se redujo la velocidad de actuación del sistema mediante la implementación de pequeños tiempos de retardo en sus diferentes desplazamientos.

Aunque el efector final cumple su tarea de tomar las botellas de la banda, éste es muy pesado afectando la inercia en los movimientos del brazo. Se podría continuar con la mejora del sistema cambiando el electroimán por un mecanismo neumático que garantice rapidez y disminuya el peso del efector mejorando la inercia que actualmente presenta.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ana De la Oz, "Robótica Industrial: Una buena Pieza.," *LOGISMARKET*, pp. 17-22, Octubre 2006.
- [2] "FERIA HANNOVER MESSE: AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL," Unión Europea., Eurochambres., Hannover, Alemania., Abril 2012.
- [3] ROBOTICA INDUSTRIAL. [Online]. http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ingenieria/mecatronica/docs_curso/Anexos/TUTORIALcnc/DOCUMENTOS/TEORIA/ROBOTICA%20INDUSTRIAL.pdf
- [4] A. García, M. Y. SAAVEDRA Y., M. A. TREJO S., and A. A. GONZÁLEZ, "Control de brazo robótico cartesiano de tres grados de libertad," Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Culhuacan, Proyecto fin de Carrera 2008.
- [5] V. A. GUILCASO M., "Diseño y construcción de un brazo robótico industrial comandado mediante un sistema de control inalámbrico," Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, Proyecto fin de carrera 2011.
- [6] "INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOTICS," International Federation of Robotics, Taipei, Taiwan, Simposio 2012.
- [7] Diana ROJAS, "Robótica hacia la Automatización Industrial," *Metal Actual*, pp. 44-51, 2009.
- [8] Nelson SOTOMAYOR. (2008, Agosto) Escuela Politécnica Nacional. [Online]. <http://ciecfie.epn.edu.ec/Material/4toNivel/Robotica/ROBOTICA%20INDUSTRIAL.pdf>
- [9] Tipos de Robots Industriales. [Online]. <http://www.ifr.org/industrial-robots/products/>
- [10] J. L. López, M. A. Santiago, and J. F. Dominguez, "Seguimiento de trayectorias irregulares arbitrarias mediante computadora," Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, México, Proyecto fin de Carrera 2007.
- [11] Oscar Andrés Vivas A., *Diseño y Control de Robots Industriales: Teoría y Práctica.*: Editorial ELALEPH, 2010.
- [12] J. E. BARAJAS C. and J. C. ORDOÑEZ B., "Metodología para la reconstrucción de un robot serie, aplicado a un caso de estudio," Universidad del Cauca, Popayán, Proyecto fin de Carrera 2010.
- [13] M. A. Martinez, "Sistemas de control para robots industriales," Universidad de Querétaro, México, Proyecto fin de Carrera 2007.
- [14] Armando Pedro Cruz Ramirez, "CONTROL NO LINEAL DE UN ROBOT ESFÉRICO DE 3GL CON TÉCNICAS DE CONTROL DE LINEALIZACIÓN EXACTA," UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO, Callao, Informe Final de trabajo de Investigación 2011.
- [15] J. W. GENOY M., L. F. RODRIGUEZ O., and A. S. S., "Interfaz háptica de cuatro grados de libertad para aplicaciones quirúrgicas," *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 5, no. 9, pp. 35-42, Junio 2011.
- [16] COGNEX. Sales guide, robots communications. [Online]. http://www.idc.es/img_boletines/Robot_Communication_Guide.pdf
- [17] M. F. PÉREZ and O. D. VELASCO, "Sistema de clasificación de piezas en una línea de producción empleando visión de máquina," Universidad del Cauca, Colombia, Monografía de proyecto fin de carrera. J. F. Flórez, 2010.

- [18] M. F. PÉREZ and O. D. VELASCO, "Sistema de clasificación de piezas en una línea de producción empleando visión de máquina," Universidad del Cauca, Colombia, Artículo de proyecto fin de carrera. J. F. Flórez, 2010.
- [19] S. Y. MEZA MANCO and W. A. LEGARDA BELTRÁN, "Optimización del Sistema de Visión para la Banda Transportadora del Laboratorio de Control de Procesos," Univerisidad del Cauca, Popayán., Monografía Proyecto Fín de Carrera. 2013.
- [20] Serway RAYMOND, "Torque," in *Física para ingenieros y científicos.*, 6th ed. California: John W. Jewett, EE.UU, 2004, pp. 307-310.
- [21] AutoDesk Inventor. [Online]. www.autodesk.es
- [22] MicroStation. [Online]. <http://www.bentley.com/en-US/Products/microstation+product+line/>
- [23] SolidEdge. [Online]. http://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/velocity/solidedge/
- [24] Micrologix 1500 programable controllers. [Online]. http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1764-um001_-en-p.pdf
- [25] Arduino Uno. [Online]. <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [26] Edwin MICOLTA, "Circuitos de Disparo en Potencia," Corporación Universitaria Autónoma del Cauca, Popayán, 2013.
- [27] A. Villegas Alemán, "INTERPOLACIÓN LINEAL," Universidad Autónoma de Centro América, Nicoya, Guanacaste, 2012.