



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLÓGICAS
APLICADAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA CONTROL DE
CALIDAD DE SOLDADURAS EN PLACAS ELECTRÓNICAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

MATHEO DAVID MORENO PROAÑO

DIRECTOR: ING. ESTEBAN MONTUFAR, M. Sc

D.M. QUITO

2016

DECLARACIÓN

Yo, Matheo David Moreno Proaño, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.



Matheo David Moreno Proaño

C.I.: 171416696-2

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Matheo David Moreno Proaño, bajo mi supervisión y que el mencionado trabajo es inédito.

Ing. Esteban Gabriel Montúfar Ayala, M. Sc.

C.I.: 171294941-9

DIRECTOR DEL PROYECTO

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
ROBOTS MANIPULADORES Y VISIÓN ARTIFICIAL	1
1.1. OBJETIVOS	1
1.1.1. OBJETIVO GENERAL	1
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.2. HIPÓTESIS	1
1.3. MARCO TEÓRICO	2
1.3.1. ROBOTS MANIPULADORES.....	2
1.3.1.1. Cadena cinemática	2
1.3.1.2. Convención de Denavit- Hartenberg	3
1.3.1.3. Características principales de manipuladores	4
1.3.1.4. Volúmenes de trabajo.....	8
1.3.2. VISIÓN ARTIFICIAL.....	12
1.3.2.1. Estado del arte.....	12
1.3.2.2. La iluminación en la visión por computadora	16
1.3.2.3. Tipos de iluminación	17
1.3.2.4. Aproximación Douglas- Peucker	22
1.3.3. CARACTERÍSTICAS EN CALIDAD DE SOLDADURA EN PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO	23
1.3.3.1. Soldaduras incompletas en una placa de circuito impreso	23
1.3.3.2. Omisión de soldadura en placa de circuito impreso	24
1.3.3.3. Exceso de suelda en una placa de circuito impreso	25
CAPÍTULO II.....	26
ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	26
2.1. SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN DE ROBOT MANIPULADOR.....	26
2.2. SELECCIÓN DE ACTUADORES	28

2.3.	SELECCIÓN DEL CONTROL DEL MANIPULADOR.....	30
2.4.	SELECCIÓN DE LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	33
CAPÍTULO III.....		36
DISEÑO DE LA PROPUESTA.....		36
3.1.	DISEÑO MECÁNICO.....	36
3.1.1.	ASPECTOS TÉCNICOS.....	38
3.1.1.1.	Matriz de Denavit-Hartenberg.....	39
3.1.1.2.	Información básica.....	40
3.1.1.3.	Cables de conexión.....	40
3.1.2.	GRADOS DE LIBERTAD Y DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE FBD.....	40
3.1.2.1.	Información de los ejes.....	41
3.1.3.	ESTRUCTURA.....	42
3.1.4.	ANÁLISIS CAE DE LA ESTRUCTURA.....	45
3.1.5.	ACTUADORES.....	55
3.2.	AJUSTE DEL CONTROL.....	57
3.2.1.	CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	57
3.2.1.1.	Detección de formas.....	57
3.2.1.2.	Detección de colores.....	58
3.2.1.3.	Detección de errores en soldas de placas de circuito impreso.....	59
3.2.1.4.	Configuración de servomotores.....	63
3.2.1.5.	Control del brazo robótico.....	66
3.2.1.6.	Diseño del reporte.....	72
3.2.1.7.	Dimensionamiento eléctrico y conexiones.....	75
CAPÍTULO IV.....		78
CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....		78
4.1.	PRUEBAS DE TRACCIÓN A LAS PROBETAS DE PLA.....	78

4.1.1.	RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN	80
4.2.	PROCESO DE CONTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	81
4.3.	PROTOCOLO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	86
4.3.1.	DETECCIÓN DE POSICIONES DE SUELDAS EN EL DISEÑO DE LA PLACA	88
4.3.2.	COMPARACIÓN POSICIONES DE SOLDADURA EN EL DISEÑO DE LA PLACA CON LA FABRICADA	89
4.3.3.	VERACIDAD DEL EQUIPO	93
13.1.1.	RESPUESTA DEL BRAZO ROBÓTICO ANTE POSICIONES DADAS 100	
13.2.	PRÁCTICAS DE LABORATORIO	101
	CONCLUSIONES.....	102
	RECOMENDACIONES	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
	ANEXOS.....	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1 Manipulador robótico de 3 DOF	2
Figura 1. 2 Convención clásica DH.....	3
Figura 1. 3 Sentido positivo de α_i y θ_i para DH	4
Figura 1. 4 DOF de un robot manipulador	5
Figura 1. 5 Tipos de articulaciones	6
Figura 1. 6 Brazo robótico angular de 4 DOF (4 angulares) y su representación FBD	7
Figura 1. 7 Brazo robótico SCARA de 3 DOF (2 angulares y un prismático).....	7
Figura 1. 8 Representación FBD de un hombro humano con 3 DOF coincidentes	7
Figura 1. 9 Manipulador robótico montado sobre una plataforma móvil	8
Figura 1. 10 Brazo robótico cartesiano con su volumen de trabajo adaptada de [2] ...	9
Figura 1. 11 Brazo robótico cilíndrico con su volumen de trabajo adaptada de [2]....	10
Figura 1. 12 Brazo robótico polar con su volumen de trabajo adaptada de [2]	10
Figura 1. 13 Brazo robótico tipo SCARA adaptada de [2]	11
Figura 1. 14 Brazo robótico angular adaptada de [2]	11
Figura 1. 15 Imagen con problemas de reconocimiento por visión por computadora	12
Figura 1. 16 Robot jugando ajedrez con el campeón mundial Vladimir Kramnik.....	14
Figura 1. 17 Resultado de la identificación de puntos clave mediante SIFT	14
Figura 1. 18 Ejemplos con técnica de visión por computador SIFT	15
Figura 1. 19 Efectos de iluminación en imágenes	16
Figura 1. 20 Iluminación direccional.....	17
Figura 1. 21 Iluminación oblicua	18
Figura 1. 22 Iluminación difusa	18
Figura 1. 23 Iluminación con anillo de luz.....	19
Figura 1. 24 Iluminación difusa axial.....	20
Figura 1. 25 Luz estructurada	20

Figura 1. 26 Iluminación polarizada	21
Figura 1. 27 Iluminación de campo oscuro	22
Figura 1. 28 Luz de fondo	22
Figura 1. 29 Resultado de aplicación de algoritmo de aproximación DP	23
Figura 1. 30 Soldadura incompleta	24
Figura 1. 31 Elemento en PCB con salto de suelda	24
Figura 1. 32 Soldadura excesiva de elemento en PCB	25
Figura 2. 1 Lenguajes de programación más populares del 2014	34
Figura 3. 1 Área mínima de trabajo y longitud de manipulador	37
Figura 3. 2 Partes del manipulador	39
Figura 3. 3 Posición de ejes en el manipulador	41
Figura 3. 4 FBD del manipulador diseñado	42
Figura 3. 5 Cámara de luz.....	43
Figura 3. 6 Estructura de la base del manipulador referencia de PhantomX Reactor Arm	43
Figura 3. 7 Estructura del antebrazo del manipulador	44
Figura 3. 8 Estructura del brazo del manipulador	44
Figura 3. 9 Prototipo de control de calidad de sueldas en placas electrónicas con manipulador de 4 DOF	45
Figura 3. 10 Sujetador de placas	45
Figura 3. 11 Diagrama de cuerpo libre del manipulador.....	46
Figura 3. 12 Pieza que soporta cargas más críticas en el manipulador.....	47
Figura 3. 13 Sección de análisis	48
Figura 3. 14 Comprobación de resultados arrojados por simulador de Inventor Profesional 2015	49
Figura 3. 15 Momento aplicado a pieza en estudio	49
Figura 3. 16 Rango de convergencia en simulación de pieza F2.....	50

Figura 3. 17 a) Resultados de la estructura del antebrazo expuesta a fuerzas de carga. b) Gráfica de convergencia de los resultados en simulación	51
Figura 3. 18 Resultados de desplazamiento de la estructura del antebrazo expuesta a fuerzas de carga.....	52
Figura 3. 19 a) Resultados de desplazamiento del soporte F2 expuesta a fuerzas de carga. b) Gráfica de convergencia de los resultados en simulación	52
Figura 3. 20 a) Resultados de desplazamiento de la estructura del brazo expuesta a fuerzas de carga. b) Gráfica de convergencia de los resultados en simulación	53
Figura 3. 21 Resultados de desplazamiento de la estructura la cámara de luz expuesta a fuerzas de carga.....	54
Figura 3. 22 Detección de bordes.....	58
Figura 3. 23 Representación del resultado de reconocimiento de color	58
Figura 3. 24 Diagrama de flujo procesamiento de imágenes para la detección de soldas	59
Figura 3. 25 Relación de efectividad entre número de especímenes dentro de la base de datos sin iluminación difusa	60
Figura 3. 26 Relación de efectividad entre número de especímenes dentro de la base de datos con iluminación difusa	61
Figura 3. 27 Diagrama de flujo selección de soldas correctas e incorrectas	62
Figura 3. 28 Diagrama de flujo aumento de imágenes en la base de datos	63
Figura 3. 29 Conexión en cadena de actuadores a controlador.....	63
Figura 3. 30 Verificación de conexión al controlador.....	64
Figura 3. 31 Envío y recepción de datos para cada ID de la red de actuadores	64
Figura 3. 32 Estructura del paquete de instrucciones para motores Dynamixel AX-12A	65
Figura 3. 33 Sistema sin control en Matlab R2013b.....	66
Figura 3. 34 Planta del sistema en Matlab.....	67
Figura 3. 35 Configuración mecánica en Simulink	67
Figura 3. 36 Respuesta de ángulos de los actuadores vs tiempo. (5 segundos).....	68

Figura 3. 37 Sistema con control de lazo cerrado en Matlab	68
Figura 3. 38 Módulo de control lazo cerrado en Simulink.....	69
Figura 3. 39 Respuesta de ángulos de los actuadores vs tiempo con control. (5 segundos).....	69
Figura 3. 40 a) Respuesta de actuadores sin control en simulación. b) Respuesta de actuadores control en simulación.....	70
Figura 3. 41 Diagrama de flujo para grabar ángulos para cada posición del manipulador.....	71
Figura 3. 42 Diagrama de flujo para obtención de reporte de soldaduras defectuosas en PCB	73
Figura 3. 43 a) Reporte general en caso de falla en placa electrónica generado por el sistema de control de calidad. b) Especificaciones de error en cada punto de suelda no aceptado por el sistema de control de calidad	75
Figura 3. 44 Identificador de ID de cada actuador para todas las articulaciones del manipulador.....	77
Figura 4. 1 Máquina de Ensayos Universales TINIUS OLSEN	78
Figura 4. 2 Dimensiones de Probetas según Norma ASTM D 638 - 14	79
Figura 4. 3 Probetas Fabricadas.....	80
Figura 4. 4 Probetas sometidas a prueba de tracción	81
Figura 4. 5 Impresión 3D de probetas según ASTM D638.....	82
Figura 4. 6 Proceso de impresión en 3D de pieza antebrazo en PLA.....	83
Figura 4. 7 Corte láser de piezas de la base en MDF	83
Figura 4. 8 Cámara de luz con iluminación difusa. a) Vista superior. b) Vista frontal. c) Vista lateral.....	84
Figura 4. 9 a) Brazo y efector final del manipulador robótico armado. b) Manipulador robótico ensamblado	85
Figura 4. 10 Sistema de control de calidad.....	85
Figura 4. 11 Diseño placa archivo prueba control calidad.....	86
Figura 4. 12 Diseño placa archivo prueba control calidad 1	86

Figura 4. 13 Diseño placa archivo prueba control calidad 2.....	87
Figura 4. 14 Detección de borde en diseño de archivos a) “Prueba Control Calidad”, b) “Prueba Control Calidad 1”, c) “Prueba Control Calidad 2” puestos a prueba	88
Figura 4. 15 Detección de sueldas en imágenes obtenidas de Ares de archivos a) “Prueba Control Calidad”, b) “Prueba Control Calidad 1”, c) “Prueba Control Calidad 2” puestos a prueba	89
Figura 4. 16 Detección de posición de sueldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3	90
Figura 4. 17 Detección de posición de sueldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad 1”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3	91
Figura 4. 18 Detección de posición de sueldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad 2”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3	92
Figura 4. 19 Detección de errores en sueldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3	96
Figura 4. 20 Detección de errores en sueldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad 1”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3	97
Figura 4. 21 Detección de errores en sueldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad 2”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3	98
Figura 4. 22 Resultado prueba de repetitividad en el manipulador robótico. Marcas de esfero de efector final en hoja a cuadros A4	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Parámetros DH	4
Tabla 1. 2 Tipos de iluminación en visión artificial.....	17
Tabla 2. 1 Evaluación de peso específico de cada criterio.....	27
Tabla 2. 2 Evaluación de peso específico del criterio control.....	27
Tabla 2. 3 Evaluación de peso específico del criterio movilidad	27
Tabla 2. 4 Evaluación de peso específico del criterio peso	27
Tabla 2. 5 Evaluación de peso específico del criterio eficiencia	28
Tabla 2. 6 Selección de configuración del manipulador	28
Tabla 2. 7 Evaluación de peso específico de cada criterio.....	29
Tabla 2. 8 Evaluación de peso específico del criterio peso/ potencia	29
Tabla 2. 9 Evaluación de peso específico del criterio control.....	29
Tabla 2. 10 Evaluación de peso específico del criterio conexionado	29
Tabla 2. 11 Evaluación de peso específico del criterio precio.....	30
Tabla 2. 12 Selección de configuración del manipulador	30
Tabla 2. 13 Evaluación de peso específico de cada criterio.....	31
Tabla 2. 14 Evaluación de peso específico del criterio singularidades	31
Tabla 2. 15 Evaluación de peso específico del criterio consumo de RAM.....	31
Tabla 2. 16 Evaluación de peso específico del criterio líneas de programación.....	31
Tabla 2. 17 Evaluación de peso específico del criterio pick and place	32
Tabla 2. 18 Selección de configuración del manipulador	32
Tabla 2. 19 Evaluación de peso específico de cada criterio.....	34
Tabla 2. 20 Evaluación de peso específico del criterio simplicidad.....	34
Tabla 2. 21 Evaluación de peso específico del criterio manejo de excepciones	35
Tabla 2. 22 Evaluación de peso específico del criterio portabilidad.....	35
Tabla 2. 23 Evaluación de peso específico del criterio robustez.....	35
Tabla 2. 24 Selección de lenguaje de programación.....	35

Tabla 3. 1 Relación longitud antebrazo y brazo de manipuladores.....	37
Tabla 3. 2 Parámetros de DH	39
Tabla 3. 3 Información básica del manipulador	40
Tabla 3. 4 Cables de conexión en manipulador.....	40
Tabla 3. 5 Limitaciones en los DOF del manipulador	41
Tabla 3. 6 Resumen resultados de simulación de uniones para piezas del manipulador.....	54
Tabla 3. 7 Actuadores idóneos disponibles	56
Tabla 3. 8 Representación de longitud del vector vs forma en algoritmo de reconocimiento.	57
Tabla 3. 9 Longitud de cables para conexión de actuadores dentro del manipulador	77
Tabla 4. 1 Características Técnicas de la Máquina de Ensayos Universales	78
Tabla 4. 2 Parámetros de impresión	79
Tabla 4. 3 Resistencia a la Fluencia, Deformación y Módulo de elasticidad para las probetas de PLA con mallado lineal.....	80
Tabla 4. 4 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad)	93
Tabla 4. 5 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad1)	94
Tabla 4. 6 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad2)	95
Tabla 4. 7 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad).....	99
Tabla 4. 8 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad1).....	99
Tabla 4. 9 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad2).....	100
Tabla 4. 10 Resumen resultados de prueba de repetitividad	101

ABREVIATURAS

IA- inteligencia artificial

SIFT- transformada de características sin relación a escala

DOF- Siglas en inglés de Grados de libertad

GDL- Grados de libertad

RGB- Escala principal de colores (rojo-verde-azul)

DH- Denavit-Hartenberg

FBD- Siglas en inglés de Diagrama de cuerpo libre

mm- Milímetros

PWM- modulación por ancho de pulso

Siglas en inglés de ingeniería asistida por computadora

SCARA- Siglas en inglés de Selective Compliant Assembly Robot Arm

PCB- Siglas en ingles de Printed Circuit Board

S_{ut} - Resistencia última a la ruptura.

RESUMEN

El proyecto se centra en realizar dos tareas, la primera, de control de calidad de soldas de placas electrónicas en los proyectos presentados por los estudiantes de la Universidad Internacional del Ecuador por forma, cantidad de suelda y falta de la misma. Se implementan los algoritmos de visión artificial: aproximación DP, SIFT y manejo de píxeles en imágenes. Una vez identificados los puntos de suelda defectuosos se genera un reporte final que indica dónde se encuentra la falla de soldadura en la placa. A su vez este robot podrá ser usado como equipo de laboratorio de la Universidad en el área de visión artificial, donde se plantean tres laboratorios enfocados a algoritmos utilizados frecuentemente en la actualidad como son: detección de, objetos por puntos característicos, figuras geométricas, colores. Estos algoritmos se enlazan al control del robótico para clasificar y separar las placas que pasan y las que no el control de calidad de las soldas.

ABSTRACT

The project focuses on two tasks , first , quality control of solders electronic boards in the projects presented by students of the International University of Ecuador by form , number of welds and lack thereof . DP approach , SIFT and management pixels in images : artificial vision algorithms are implemented . Once the points of defective welds identified a final report that indicates where the weld failure plate is generated . In turn, this robot can be used as laboratory equipment University in the field of artificial vision, where three laboratories focused on algorithms commonly used today as they are raised : detection of objects by minutiae , shapes , colors . These algorithms are linked to robotic control to sort and separate the plates passing and not quality control of welds.

INTRODUCCIÓN

Este documento presenta los procedimientos realizados para lograr la implementación exitosa de un brazo robótico para el control de soldaduras de placas electrónicas. Para el diseño del brazo robótico, se analizaron los resultados de simulaciones realizadas por el método de elementos finitos con ayuda del Autodesk Inventor 2016 versión estudiantil. Se da también una descripción del método usado para la verificación de soldas en placas electrónicas por medio de visión artificial. Por otro lado, se describe los resultados obtenidos de las simulaciones en Matlab 2013b para el control del manipulador robótico, implementando un control a lazo cerrado PID. Los resultados de estas simulaciones ayudan a establecer los parámetros necesarios para la configuración de los servomotores Dynamixel minimizando el comportamiento amortiguado de los actuadores dentro del sistema.

CAPÍTULO I

ROBOTS MANIPULADORES Y VISIÓN ARTIFICIAL

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar un brazo robótico para el control de calidad de soldaduras en placas electrónicas.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fundamentar la información de métodos de control del manipulador, implementación de algoritmos de visión e inteligencia artificial y condiciones ideales de suelda en una placa electrónica.
- Realizar el diseño mecánico de los componentes estructurales del robot garantizando que las partes no se encuentren comercialmente.
- Implementar reconocimiento de sueldas por visión artificial.
- Realizar algoritmos de control del brazo robótico.
- Diseñar el formato de reportes de placas defectuosas.
- Realizar un programa generador de reportes que incluya la comparación entre lo valorado y la norma.
- Desarrollar un sistema el cual permite un control de servos inteligentes Dynamixel.
- Proponer y desarrollar tres prácticas de laboratorio.

1.2. HIPÓTESIS

El sistema con el robot manipulador diseñado y construido identifica las tarjetas con falla en suelda, y proporciona un reporte con detalle de falla en caso de no ser aceptada la placa.

Se pone a disposición nuevas prácticas de laboratorio en diferentes áreas de la carrera de Ingeniería Mecatrónica y se ayuda con una herramienta para realizar ejemplos prácticos en la implementación de algoritmos de visión artificial.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. ROBOTS MANIPULADORES

1.3.1.1. Cadena cinemática

Un manipulador robótico puede ser considerado como un conjunto de enlaces conectados entre sí, en una llamada cadena cinemática de articulaciones (figura 1.1).

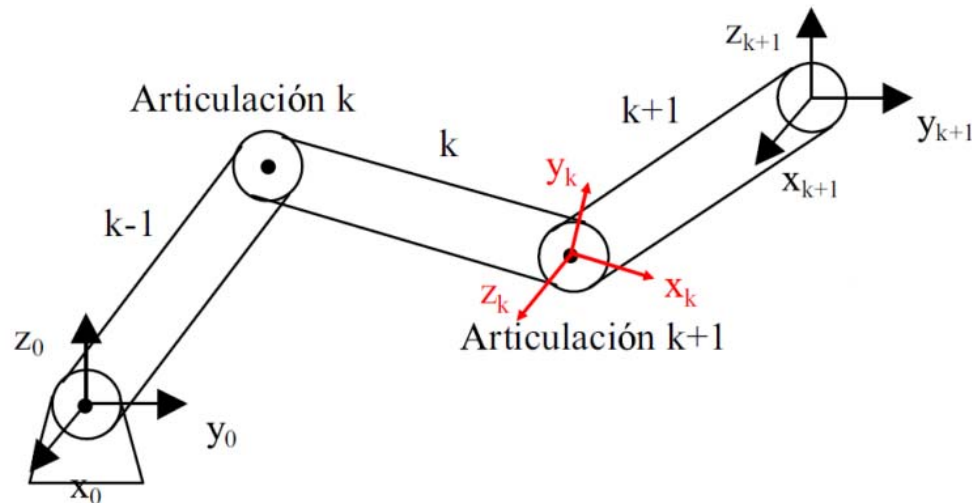


Figura 1. 1 Manipulador robótico de 3 DOF

Fuente: <http://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/CinemáticaDirectaRobot.pdf>

Los brazos robóticos típicos son manipuladores con una serie de uniones que forman un conjunto de cuerpos, llamados enlaces, en una cadena conectados por articulaciones. Cada articulación puede tener uno o varios DOF por las siglas en inglés de Degrees Of Freedom, ya sea de traslación, rotación o ambos. Para un brazo robótico con n articulaciones numerados de 1 a n , hay $n + 1$ enlaces, enumerados de 0 a n . El enlace 0, por lo general, es la base del manipulador, la mayoría de las veces fijo, y el enlace n lleva el efector final (pinza). Las articulaciones pueden ser descritas por dos características, longitud y ángulo. La longitud es la distancia de un enlace al siguiente a lo largo del eje de la articulación. El ángulo de la articulación es la rotación de un eslabón con respecto al siguiente sobre el eje de la misma.

Cuando el manipulador robótico realiza un movimiento, las coordenadas de cada punto sobre el enlace son constantes. Cada articulación tiene un eje con el que se describe el movimiento de la articulación. Por convención, el eje z de un sistema de coordenadas está alineado con el eje de la articulación.

1.3.1.2. Convención de Denavit- Hartenberg

Una convención utilizada para la selección de marcos de referencia en aplicación de la robótica es la convención de Denavit-Hartenberg. En esta convención, la posición y la orientación del efector final viene establecida como se muestra en la ecuación 1.

$$H = {}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n \quad (1)$$

Donde:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} {}^iR_{i-1} & {}^i d_{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Existen dos formas muy diferentes de representación de Denavit-Hartenberg para la cinemática de serie de enlaces en manipuladores:

- Convención clásica.
- Modificado.

Ambas notaciones representan una articulación como: 2 traslaciones (a y d) y 2 ángulos (α y θ). Sin embargo las expresiones de las matrices de transformación son muy diferentes. En resumen, se debe saber que la convención cinemática cumple los parámetros de Denavit-Hartenberg.

Los parámetros de enlaces y conjuntos en la convención clásica se muestra en la figura 1.2, también, El sentido positivo de α y θ se muestra en la figura 1.3.

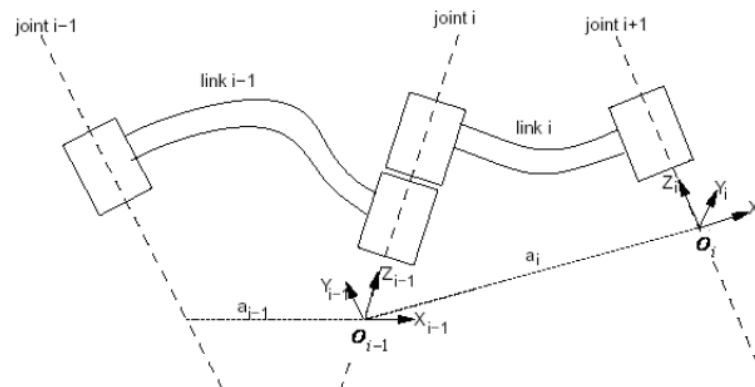


Figura 1. 2 Convención clásica DH

Fuente: <http://computationalnonlinear.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1396987>

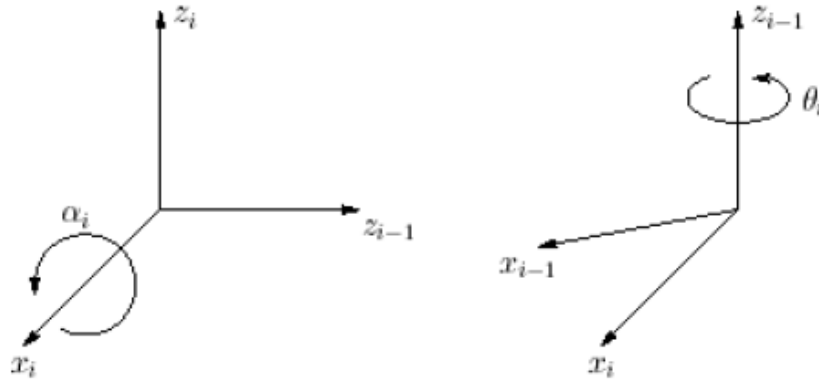


Figura 1. 3 Sentido positivo de α_i y θ_i para DH

Fuente: <https://www.quora.com/Robotics/What-is-the-best-resource-to-understand-Denavit%E2%80%93Hartenberg-parameters>

Los parámetros de DH son tabulados en la tabla 1.1.

Tabla 1. 1 Parámetros DH

Link, i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1				
2				

Donde:

- α_i es la rotación sobre el eje x_i
- a_i es la traslación sobre el eje x_i
- d_i es la traslación sobre el eje z_i
- θ_i es la rotación sobre el eje z_i

La matriz de transformación homogénea ${}^{i-1}T_i$ está representada por el producto de cuatro matrices como se muestra en la ecuación 2.

$${}^{i-1}T_i = R(z_{i-1}, \theta_i) T(x_i, a_i) R(x_i, \alpha_i) T(z_i, d_i) \quad (2)$$

1.3.1.3. Características principales de manipuladores

Grados de libertad (DOF).- Los grados de libertad, o DOF, es un término muy importante de entender. Cada grado de libertad es una articulación en el brazo, un

lugar donde se puede doblar, girar o trasladar. Normalmente, se puede identificar el número de DOF por el número de actuadores en el brazo del robot. Es muy importante tomar en cuenta que en la construcción de un brazo robótico se desea la menor cantidad de DOF ya que cada grado requiere un actuador y los algoritmos se vuelven más complicados; teniendo un comportamiento exponencial y un costo superior.



Figura 1. 4 DOF de un robot manipulador

Fuente: profesores.usfq.edu.ec/laurents/IME440/IME440_RobotManip.pdf

En cuanto a robots manipuladores se refiere, el uso de articulaciones con un grado de libertad es muy común ya que permiten lograr una mayor movilidad sin necesidad de aumentar la complejidad del control. Es necesario recalcar que en el diseño del brazo robótico es necesario encontrar el número mínimo de articulaciones para cumplir la tarea por la que es diseñado. La implementación de articulaciones de 3 DOF para cada eslabón haría que el control del mismo sea una tarea difícil de realizar. La figura 1.5 muestra los tipos de articulaciones y movimiento que efectúa cada una de estas, las articulaciones más utilizadas dentro de los manipuladores robóticos poseen solamente 1 DOF. Para cada aplicación se usa un diferente tipo de configuración con el fin de lograr que el robot manipulador cumpla con las funciones deseadas.

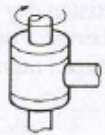
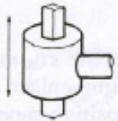
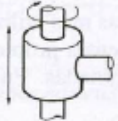
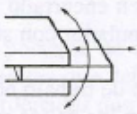
	ROTACIÓN	1 GDL	Grado de libertad (GDL) = número de movimientos autorizados Mayoría de los robots usan articulaciones actuadas a 1 GDL
	PRISMÁTICA	1 GDL	
	CILÍNDRICA	2 GDL	Tipicamente : • 3 GDL en el brazo para posicionar el efector final • 1,2 o 3 GDL en la muñeca para orientar el efector final
	PLANAR	2 GDL	
	ESFÉRICA (RÓTULA)	3 GDL	

Figura 1. 5 Tipos de articulaciones

Fuente: profesores.usfq.edu.ec/laurents/IME440/IME440_RobotManip.pdf

Sólo existen dos movimientos realizables de una articulación, que podrían hacer: traslación y rotación. Se tiene en consideración tres ejes de trabajo: x, y, z. En las figuras 1.6 y 1.7, se muestra un par de brazos robóticos con su respectivo FBD, del inglés Free Body Diagram, junto a él, para demostrar las relaciones y símbolos de cada DOF. Hay que tener presente que no se toma en consideración el DOF en la pinza (también conocido como efector final). El efector final es a menudo comprendido por múltiples DOF, así que por simplicidad se trata como independiente en el diseño del brazo robot.

Las representaciones de las articulaciones en las diferentes configuraciones de manipuladores robóticos por medio de FBD se muestran en las figuras 1.6 y 1.7 donde se combinan articulaciones con movimientos angulares y prismáticos dentro de un manipulador.

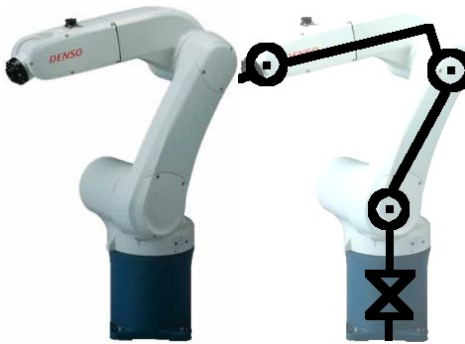


Figura 1. 6 Brazo robótico angular de 4 DOF (4 angulares) y su representación FBD

Fuente: http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml



Figura 1. 7 Brazo robótico SCARA de 3 DOF (2 angulares y un prismático)

Fuente: http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml

Hay que tomar en cuenta que para cada DOF existe un eslabón de cierta extensión en particular. A veces, una articulación puede tener múltiples DOF en la misma ubicación. Un ejemplo es el hombro humano, que tiene tres DOF coincidentes, figura 1.8, donde la longitud del eslabón es igual a cero.

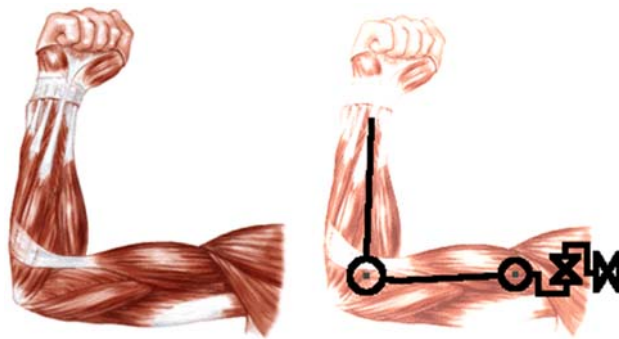


Figura 1. 8 Representación FBD de un hombro humano con 3 DOF coincidentes

Fuente: http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml

También hay que tener en cuenta que un DOF tiene sus limitaciones, conocido como espacio de configuración. No todas las articulaciones pueden girar 360 grados, por ejemplo, no existe ningún eslabón humano que pueda girar más de 200 grados. En robots, estas limitaciones pueden ser causadas por: la envoltura de alambre de alimentación o control, las capacidades mecánicas del actuador, el ángulo máximo de control de servomotor, etc. Sobre la FBD, se suele etiquetar la longitud del eslabón y el ángulo máximo de movimiento para representar una idea más clara de las capacidades de movimiento que posee el manipulador.

Un brazo robot también puede estar sobre una base móvil, con lo que se le añade un DOF adicional. Si el robot con ruedas puede girar, es una articulación de rotación, si puede avanzar, entonces eso es una articulación de traslación. El robot manipulador móvil de la figura 1.9 es un ejemplo de un brazo de 4 DOF en una plataforma móvil con 2 DOF (6 DOF en total).



Figura 1. 9 Manipulador robótico montado sobre una plataforma móvil

Fuente: http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml

1.3.1.4. Volúmenes de trabajo

El espacio de trabajo del robot (a veces conocido como espacio accesible) son todos los lugares que el efector final puede alcanzar. El espacio de trabajo depende de las limitaciones del ángulo / traslación del DOF, las longitudes del brazo, el ángulo en que debe ser recogido el objeto, etc. El espacio de trabajo es altamente dependiente de la configuración del robot, como se muestra a continuación:

1.3.1.4.1. Cartesiana

Esta configuración está comprendida de tres articulaciones prismáticas. Una de sus principales características es que posee buena rigidez y mucha precisión con cargas pequeñas. Esta configuración es utilizada para el diseño de máquinas de control numérico computarizado (CNC) usadas normalmente en ruteadoras láser, impresoras de 3 dimensiones, entre otros. Posee un volumen de trabajo cúbico, figura 1.10, y tiene una estructura la cual hace que la accesibilidad sea reducida. A nivel industrial, se encuentran trabajando un $\pm 21\%$ de manipuladores robóticos con esta configuración.¹

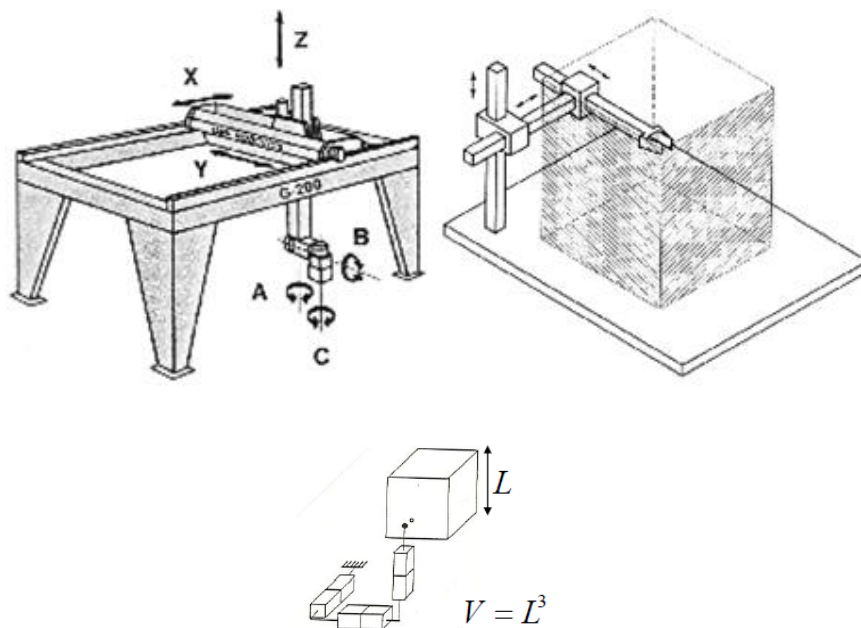


Figura 1. 10 Brazo robótico cartesiano con su volumen de trabajo adaptada de [2]

1.3.1.4.2. Cilíndrica

Comprendido por una articulación de rotación y 2 prismáticas, esta configuración ocupa el $\pm 7\%$ del mercado industrial. Su volumen de trabajo es un toroide, figura 1.11. Es usado muy frecuentemente en aplicaciones “pick and place” también para trabajos con varias máquinas alimentadas por este robot en una posición central.¹

¹ L. Saas. “Introducción a la robótica”. [En línea]. Ecuador, Disponible en: profesores.usfq.edu.ec/laurents/IME440/IME440_RobotManip.pdf

² P. Raison. “Espacio de trabajo de un robot manipulador”, Robot Society, vol.8. [En línea]. Estado Unidos, Disponible en: http://www.societyofrobots.com/robot_arm_tutorial.shtml

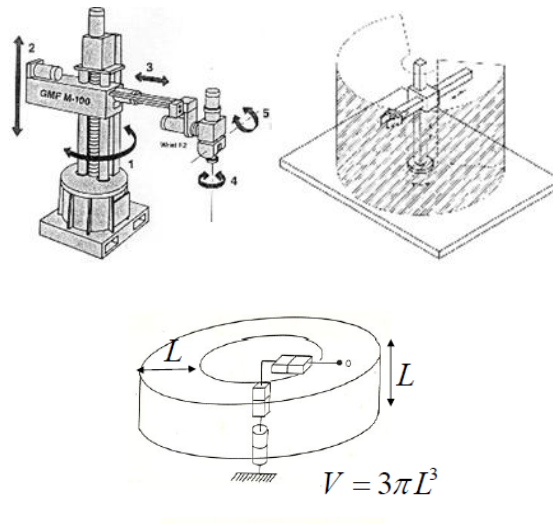


Figura 1. 11 Brazo robótico cilíndrico con su volumen de trabajo adaptada de [2]

1.3.1.4.3. Polar

Esta configuración posee 2 articulaciones de rotación y una articulación prismática. Se caracteriza por tener un buen alcance comparado al resto de configuraciones, pero en la actualidad este tipo de manipuladores es considerado como discontinuado. Son usados en soldaduras por punto y por arco, en máquinas de desbarbado, en manipulación de máquinas herramientas, entre otros. Se llama de esta manera ya que sus ejes forman un sistema polar de coordenadas. Su área de trabajo es una esfera hueca como se observa en la figura 1.12.¹

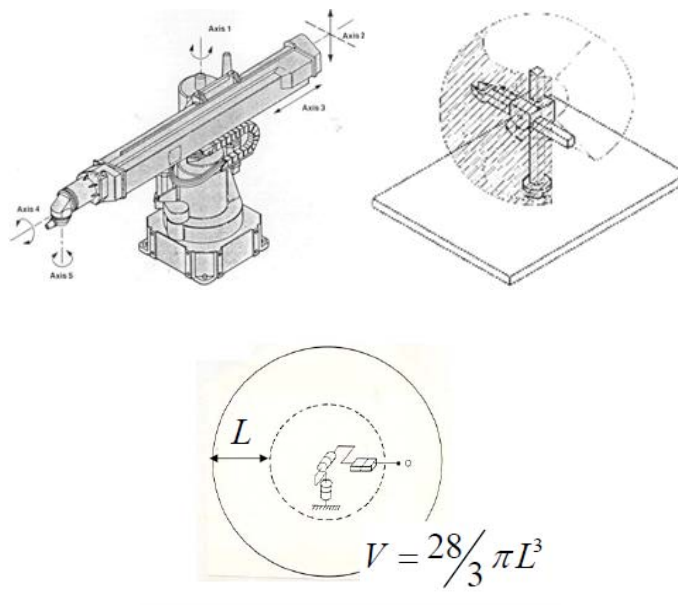


Figura 1. 12 Brazo robótico polar con su volumen de trabajo adaptada de [2]

1.3.1.4.4. SCARA

Tiene 3 articulaciones de rotación y una articulación prismática, todas con ejes paralelos. Al igual que la configuración cilíndrica, se la utiliza mucho en aplicaciones “pick and place” y para ensamblaje de piezas. Su área de trabajo es un toroide con una restricción cilíndrica en la mitad, figura 1.13, debido a la posición en paralelo de cada uno de los ejes.¹

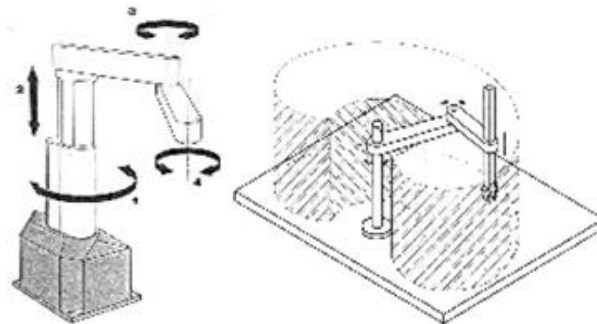
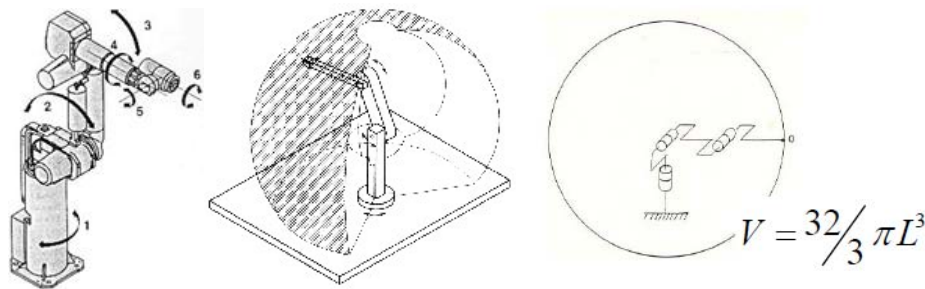


Figura 1. 13 Brazo robótico tipo SCARA adaptada de [2]

1.3.1.4.5. Angular

Esta configuración está compuesta de 3 articulaciones de rotación, en la actualidad es el más usado en el área industrial ocupando un $\pm 67\%$ del mercado. A pesar de tener un control más complejo, se han creado nuevas técnicas para manejar todos los grados de libertad que posee de una manera más fácil. Su volumen de trabajo es una esfera llena sin restricciones, figura 1.14. El robot angular se caracteriza por tener una mayor accesibilidad en comparación a las configuraciones anteriormente mencionadas.¹



1.3.2. VISIÓN ARTIFICIAL

1.3.2.1. Estado del arte

1.3.2.1.1. Los primeros días

El primer intento de resolver el problema de la visión por computador fue hecha por Papert Seymour. Este primer intento fue lo suficientemente bueno como para ser conocido como “The Summer Vision Project”, o el proyecto de visión de verano. La razón por la cual no tuvo éxito es que la visión por computadora es más complicado de lo que la mayoría de la gente podría pensar. No se trata de la traducción de las luces, colores o tonos de píxeles. Se trata de la traducción de los píxeles en conceptos matemáticos abstractos, que definen lo que es un objeto y por lo que una silla es una silla. De hecho, según investigaciones cognitivas del cerebro humano, éste dedica entre el 40-70 % de su capacidad en el procesamiento de las señales visuales que recibe del ojo. Así que, ¿por qué es la visión por computadora es tan difícil?

La comprensión de la visión por computadora en su totalidad es extremadamente difícil, ya que los seres humanos entrenan para reconocer su entorno desde que son recién nacidos. Los recién nacidos, por ejemplo, pueden ver sólo imágenes muy borrosas durante mucho tiempo. Tal vez un ejemplo de lo difícil que es la visión, es comprobar la figura 1.15. En esta imagen tenemos lo que parece ser un triángulo en una simple mesa. Ahora, ¿qué pasa si se trata de explicar esta imagen? Hay algo definitivamente con esta imagen. Así que, si para un ser humano con tantos años de entrenamiento una imagen tan ordinaria causa tantos problemas, se puede cuantificar entonces, el problema que se tiene al enseñar a una computadora la forma de ver las cosas como en realidad son.



Figura 1. 15 Imagen con problemas de reconocimiento por visión por computadora

Fuente: http://www.scienceagogo.com/news/comp_vision.shtml

Como muchas otras disciplinas de la ciencia y la ingeniería, la primera cosa que vino en mente para la solución de problemas de visión artificial fue relacionada con modelos inspirados en el cerebro. En 1958 Frank Rosenblat presentó su nuevo algoritmo, el perceptrón, que es una forma de una red neural. Rosenblat demostró que con el perceptrón se puede clasificar automáticamente las imágenes que contienen los tanques camuflados en un bosque, en comparación con las imágenes que mostraban solamente los bosques. Aunque los experimentos de investigación del algoritmo parecían ser un éxito, resultó fallar en las pruebas de campo. La razón era que las fotos eran muy sesgadas en contra de ciertas condiciones climáticas: las imágenes con los tanques fueron tomadas en los días nublados, mientras que las imágenes con sólo el bosque fueron tomadas en los días soleados. Por lo tanto, el algoritmo no aprendió a reconocer los tanques, pero si los días soleados de días nublados.

1.3.2.1.2. La edad Media

Después de las múltiples catástrofes tempranas, se estancó el progreso científico de la inteligencia artificial (IA) y la visión por computadora. Los investigadores se centraron principalmente en la resolución de problemas de procesamiento de imágenes. El procesamiento de imágenes implica operaciones a nivel de píxel, como encontrar los bordes de una imagen, la aplicación de muchos de los filtros interesantes que Photoshop tiene en una imagen, o comprimir las imágenes sin perder su contenido esencial. Aunque este progreso ha sido grande, y especialmente útil para aplicaciones prácticas industriales, no era ese el objetivo principal de la visión por computadora, la cual es interpretar el mundo visual. Una vez más, la comunidad no se vio favorecida por avances de la de visión por computador.

Los años dorados.- Los años dorados de la visión por computadora iniciaron en los 90. Éste fue el nacimiento real de la visión de computadora moderna. De repente una gran cantidad de métodos fueron propuestos para abordar problemas de visión por computador genéricos como la, clasificación, segmentación y detección de objetos, reconocimiento de rostros, etc. Se empezó a tener cámaras "inteligentes" que eran capaces de detectar la cara. Se dio la bienvenida a un hardware nuevo y novedoso como el Kinect. Se empezó a tener sistemas de estacionamiento inteligentes en los automóviles, robots jugando piedra, papel y tijera, incluso ajedrez, figura 1.16. Esta época por muchos es llamado el Big- Bang de visión por computadora.



Figura 1. 16 Robot jugando ajedrez con el campeón mundial Vladimir Kramnik

Fuente: <http://www.itespresso.es/partida-de-ajedrez-humano-contra-maquina-89064.html>

Una de las razones para el éxito repentino fue el descubrimiento de la extracción de características claves y algoritmos de representación genéricos. La introducción de la función SIFT, del inglés Scale- Irrelevant Feature Transform, en 1999 abrió las puertas al reconocimiento de objetos, figura 1.17. La característica SIFT es que este algoritmo era eficiente y preciso, tanto que permitía una comparación precisa entre el mismo objeto en diferentes imágenes. Al mismo tiempo, los algoritmos de extracción de puntos locales clave comenzaron a surgir, siendo capaz de descubrir los lugares "claves o importantes" en una imagen. Además, los cortes normalizados fueron capaces de segmentar los bordes de los objetos de una escena ruidosa, lo que permitió un reconocimiento más preciso ya que el algoritmo solo se centró en el objeto, descartando el fondo de la imagen.

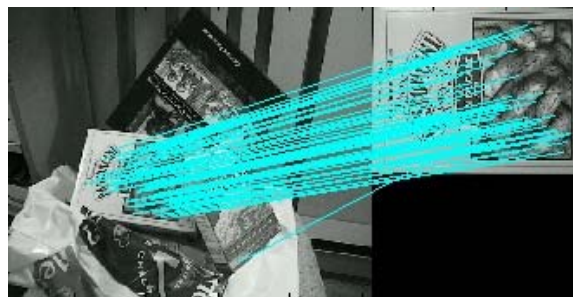


Figura 1. 17 Resultado de la identificación de puntos clave mediante SIFT

Fuente: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>

Hasta entonces, los investigadores estaban tratando de modelar con precisión la geometría tridimensional de los objetos, a menudo tratando de construir modelos ya sea geoméricamente precisos pero computacionalmente demasiado complejos o computacionalmente factibles pero excesivamente simples. SIFT, sin embargo,

sugiere que la geometría no es tan importante, no vale la pena el esfuerzo. En su lugar, se tenía que centrar sólo en cómo una imagen se ve como cuando nos centramos en los pequeños detalles. En la figura 1.18, por ejemplo. Se puede entender que se tiene un avión, o una cara, o una bicicleta en las respectivas imágenes sin realmente haber visto el cuadro completo. En esencia, el modelo SIFT intentó alcanzar el objetivo final de clasificar el contenido de la imagen, sin tratar de resolver un problema intermedio, el de describir (geométricamente) todos los objetos que pueden aparecer en una imagen, esto provocó un cambio radical en la investigación de visión por computador. Ahora, los investigadores aplican SIFT en cualquier otro problema de visión. No mucho tiempo después, se logró implementar una detección de objetos robusta.

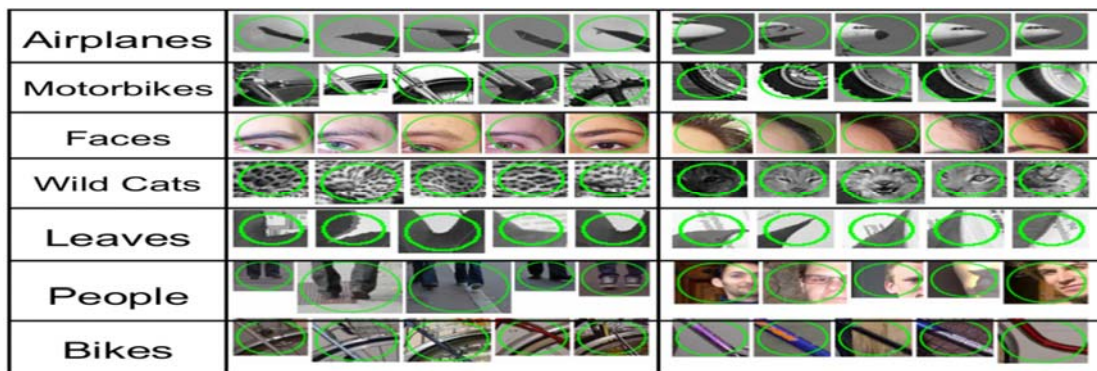


Figura 1. 18 Ejemplos con técnica de visión por computador SIFT

Fuente: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>

1.3.2.1.3. Hoy en día

Después de la época de oro, la visión por computador llegó a la actualidad, donde finalmente se empiezan a cumplir las promesas prehistóricas. Las lecciones fueron aprendidas de la década anterior, la abundancia de datos y el poder del hardware moderno trajeron a la superficie de nuevo las redes neuronales, el área que fue olvidada por muchos años de la IA. A partir de la versión moderna de las redes neuronales, es decir, redes de aprendizaje profundo, se puede clasificar el contenido de la imagen de una manera demasiado precisa. De hecho, podría ser que las computadoras están llegando a un nivel humano de precisión en ciertas tareas. Hoy en día, muchas empresas tecnológicamente grandes están invirtiendo mucho en llevar estas tecnologías para aplicarlas en la vida real. En la actualidad OpenCV es una de las librerías más usadas a nivel mundial, la biblioteca cuenta con más de 2.500

algoritmos optimizados, que incluye un amplio conjunto de algoritmos clásicos de visión por computador y aprendizaje automático con tecnología de última generación. Estos algoritmos se pueden utilizar para detectar y reconocer rostros, identificar objetos, clasificar las acciones humanas en videos, movimientos de cámara, objetos en movimiento, extraer modelos 3D de objetos, producir nubes de puntos 3D de cámaras estéreo, encontrar imágenes similares de una base de datos de imágenes, eliminar los ojos rojos de las imágenes tomadas con flash, seguir los movimientos de los ojos, reconocer el paisaje, etc.

1.3.2.2. La iluminación en la visión por computadora

La iluminación es un factor importante para el análisis e interpretación de la imagen, tomando un rol decisivo para los resultados obtenidos. Existen dos tipos de iluminación, natural y artificial. Hay que tomar en consideración los diferentes tipos de iluminación.

De hecho, la calidad de imagen deseada, normalmente se puede cumplir mediante la mejora de la iluminación de un sistema en lugar de cambiar la resolución de la imagen, lentes de cámara, o el software de reconocimiento. Se debe tener en cuenta que la intensidad de luz adecuada en la imagen final depende directamente de la selección de los componentes en la iluminación.

La iluminación correcta es fundamental para un sistema de visión por computadora e iluminación inadecuada puede causar una variedad de problemas de imagen (figura 1.24). El efecto Blooming o puntos calientes, al igual que el sombreado, por ejemplo, pueden ocultar información importante de la imagen. Además, el sombreado también puede causar mediciones falsas de bordes, dando lugar a resultados inexactos. La iluminación pobre también puede resultar en una baja relación señal-ruido. La iluminación no uniforme, en particular, puede dañar la relación señal-ruido y hacer tareas como la umbralización más difícil. Estas son sólo algunas de las razones por las que la iluminación correcta es tan importante.



Figura 1. 19 Efectos de iluminación en imágenes

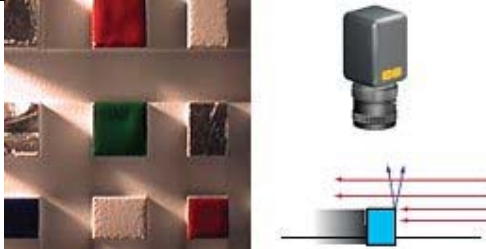
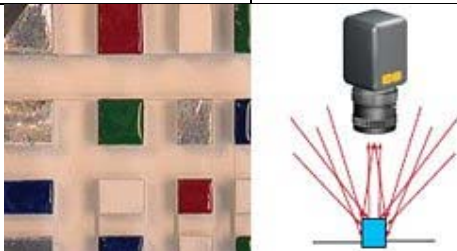
Fuente: <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/>

1.3.2.3. Tipos de iluminación

Partiendo de que una iluminación adecuada es a menudo el factor determinante entre el éxito y el fracaso en la visión por computadora. Se han desarrollado muchos productos y técnicas específicas para superar los obstáculos de iluminación más comunes. En la tabla 1.2 se muestran las fortalezas y debilidades de los diferentes esquemas de iluminación.

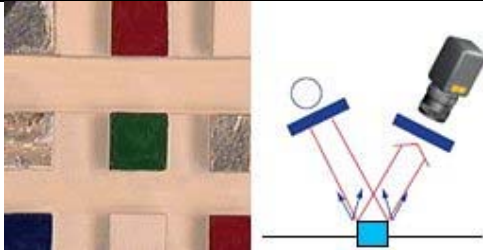
Tabla 1. 2 Tipos de iluminación en visión artificial

Iluminación direccional – Es una iluminación fuente, puntual, de fuentes individuales o múltiples. Las lentes se pueden usar para enfocar o extender la iluminación.	
Ventajas	Es brillante, flexible, y puede ser utilizado en diversas aplicaciones. Cabe fácilmente en lugares diferentes.
Desventajas	Produce deslumbramiento y sombreado
Productos recomendados	Guías de luz por fibra óptica, conjuntos de enfoque, focos LED y luz incandescente.
Aplicación	Inspección, medición y objetos planos.
 Figura 1. 20 Iluminación direccional Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Iluminación oblicua – Es una iluminación fuente, puntual, similar a la iluminación direccional, excepto en un ángulo agudo de incidencia.	
Ventajas	Muestra la estructura superficial y mejora la topografía del objeto.
Desventajas	Los puntos calientes y sombra extrema.

Productos recomendados	Guías de luz de fibra óptica, focos LED, luz incandescente y guías de luz de línea.
Aplicación	Usado en la identificación de defectos en un objeto con profundidad y en examinar el acabado de objetos opacos.
 Figura 1. 21 Iluminación oblicua Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Iluminación Difusa – Es una luz provocada de una fuente extendida.	
Ventajas	Reduce el deslumbramiento y proporciona una iluminación uniforme.
Desventajas	Grande y difícil de encajar en espacios reducidos.
Productos recomendados	Luces fluorescentes lineales.
Aplicación	Mejor para obtener imágenes de objetos grandes y brillantes, con grandes distancias de trabajo.
 Figura 1. 22 Iluminación difusa Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Anillo de luz – Es una iluminación coaxial que se monta directamente en una lente.	

Ventajas	Se monta directamente en la lente de la cámara y reduce el sombreado. Se obtiene una iluminación uniforme cuando se utiliza en las distancias apropiadas.
Desventajas	Resplandor circular de las superficies reflectantes. Sólo funciona en distancias de trabajo relativamente cortas.
Productos recomendados	Guías de luz de anillo con fibra óptica, las luces fluorescentes de anillo; Luces de timbre LED.
Aplicación	Inspección y medición de sistemas con objetos mate.
 Figura 1. 23 Iluminación con anillo de luz Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Iluminación Difusa Axial – Luz difusa en línea con la lente.	
Ventajas	Muy uniforme y difusa; reduce en gran medida el sombreado; produce muy poco deslumbramiento.
Desventajas	Grande y difícil de montar; distancia de trabajo limitada; bajo rendimiento de tal manera que se pueden necesitar fuentes de fibra óptica múltiple para proporcionar iluminación suficiente.
Productos recomendados	Fibra óptica de fijación axial difusa. Iluminadores de fibra óptica individuales o múltiples. LED iluminador axial difuso.

Aplicación	Mediciones y la inspección de objetos brillantes.
 Figura 1. 24 Iluminación difusa axial Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Luz Estructurada (Generadores de Línea) – Genera patrones que se proyectan en el objeto. Normalmente el láser proyecta líneas, puntos, cuadrículas, o círculos.	
Ventajas	Mejora características de la superficie, proporcionando una iluminación intensa sobre un área pequeña. Se puede utilizar para obtener información en profundidad del objeto.
Desventajas	Puede causar Blooming y es absorbida por algunos colores.
Productos recomendados	Los láseres con generador de línea.
Aplicación	Inspección de objetos tridimensionales. Mediciones de topografía.
 Figura 1. 25 Luz estructurada Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Luz Polarizada - Un tipo de iluminación direccional que hace uso de la luz polarizada para eliminar ruido y puntos calientes.	

Ventajas	Proporciona una iluminación uniforme sobre toda la superficie del objeto bajo polarización. Reduce el brillo.
Desventajas	En general, la intensidad de la luz se reduce después del filtro de polarización. Se coloca delante de la fuente de luz y / o lentes de imagen.
Productos recomendados	Filtros de polarización y adaptadores Polarizadores.
Aplicación	Mediciones y la inspección de objetos brillantes.
 Figura 1. 26 Iluminación polarizada Fuente: http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/	
Iluminación de campo oscuro – Se obtiene a partir de una luz que entra en un objeto transparente o translúcido a través de los bordes perpendiculares a la lente.	
Ventajas	Alto contraste de detalles internos y superficiales. Mejora visibilidad de arañazos, grietas y burbujas en objetos claros.
Desventajas	Pobre contraste de bordes. No es útil para objetos opacos.
Productos recomendados	Fibra óptica de fijación de campo oscuro, guías de luz de línea y generadores de línea láser.
Aplicación	Vidrio y la inspección de plástico.

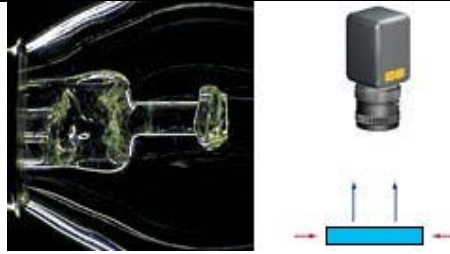


Figura 1. 27 Iluminación de campo oscuro

Fuente: <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/>

Campo claro / luz de fondo – Su principal característica es que el objeto está iluminado por detrás. Se utiliza para objetos opacos o para obtener imágenes a través de objetos transparentes.

Ventajas	Alto contraste para la detección de bordes.
Desventajas	Elimina detalles de la superficie.
Productos recomendados	Fibra óptica y retroiluminación LED.
Aplicación	Patrones de prueba, detección de bordes, medición de objetos opacos y clasificación de objetos de colores translúcidos.

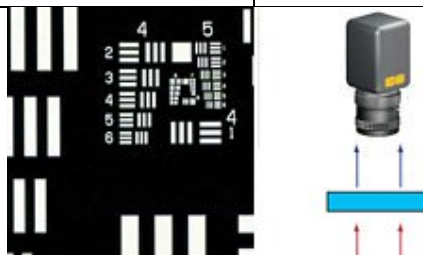


Figura 1. 28 Luz de fondo

Fuente: <http://www.edmundoptics.com/technical-resources-center/illumination/choose-the-correct-illumination/>

1.3.2.4. Aproximación Douglas- Peucker

El algoritmo Douglas - Peucker (DP) es un algoritmo el cual reduce el número de puntos en una curva que se aproxima mediante una serie de puntos. La forma inicial del algoritmo se sugirió independientemente en 1972 por Urs Ramer y 1973 por David Douglas y Thomas Peucker. Este algoritmo se conoce también con los nombres de

algoritmo de, Douglas - Peucker y de división y fusión. El objetivo del algoritmo es que, dado una curva compuesta de segmentos de línea, encontrar una curva similar con menos puntos. La curva simplificada consiste en un subconjunto de los puntos que definen la curva original.

El algoritmo recursivamente divide la línea en estudio. En un inicio se estudian todos los puntos entre el primer y el último punto. Éste señala automáticamente el primer y el último punto que se detecte. Posteriormente, encuentra el punto que está más alejado del segmento de línea con el primer y último punto y los marca como puntos finales; Una vez completa la recursión, una curva de salida puede ser generada que consiste en todos los puntos que han sido señalados como iniciales y finales, los resultados del algoritmo se muestran en la figura 1.29.



Figura 1. 29 Resultado de aplicación de algoritmo de aproximación DP

http://docs.opencv.org/3.1.0/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html#gsc.tab=0

1.3.3. CARACTERÍSTICAS EN CALIDAD DE SOLDADURA EN PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO

Dentro del control de calidad de cada placa de circuito impreso, se toma en cuenta las siguientes consideraciones según la norma IPC-A-610E (Aceptabilidad de Ensamblajes Electrónicos) por falta o exceso de suelda y omisión de la misma.

1.3.3.1. Soldaduras incompletas en una placa de circuito impreso

El filete de soldadura incompleta se ve a menudo en las juntas de una sola cara después del proceso de soldadura. En la Figura 1.30, la proporción de estaño - agujero es excesivo, que ha hecho la soldadura difícil. Como guía, la relación hoyos a estaño es normalmente el diámetro de estaño más 0.010 pulgadas, que es la pauta normal para la inserción automática. Durante cualquier perforación o punzonado, el cobre en la superficie de la junta pudo haber sido desviado en algunas áreas, lo que hace difícil de soldar.

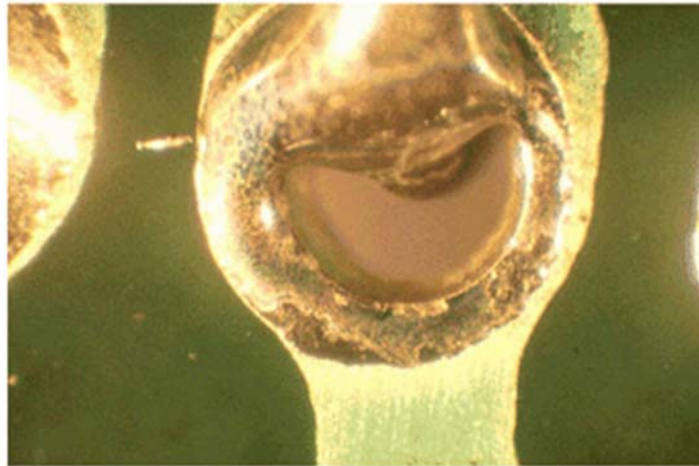


Figura 1. 30 Soldadura incompleta

Fuente: http://www.epectec.com/pcb/defects/solder_defects.html

1.3.3.2. Omisión de soldadura en placa de circuito impreso

Cuando existe una superficie sin soldar en las juntas se conocen como saltos de soldadura donde la terminación de un elemento no tiene ninguna soldadura. Cada una de estas fallas puede ser fácilmente detectada, aunque esto puede variar y tardar un poco más si se tiene un gran número de elementos dentro de la placa. La figura 1.31 muestra una falla por omisión de suelda en placa impresa.

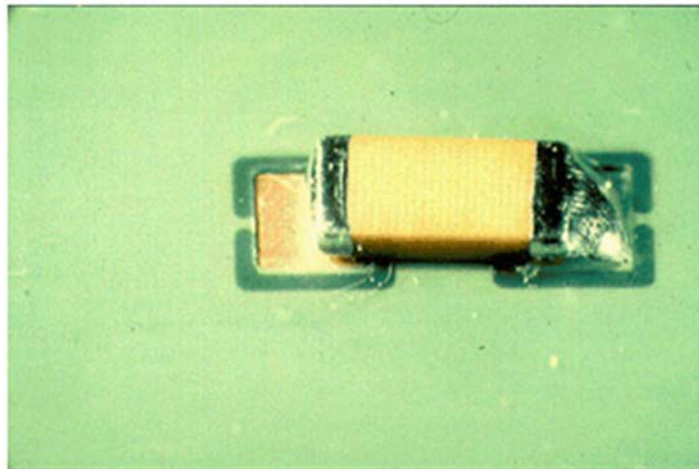


Figura 1. 31 Elemento en PCB con salto de suelda

Fuente: http://www.epectec.com/pcb/defects/solder_defects.html

1.3.3.3. Exceso de suelda en una placa de circuito impreso

Una unión de soldadura sobre los componentes dentro de la placa de un circuito impreso que está sobre la altura del área establecida en el diseño se conoce como filete bulbosa o exceso como se muestra en figura 1.32, a pesar de que esto no afecta al funcionamiento de la placa, el uso innecesario de material es un problema a resolver. Aparece un potencial problema dentro del PCB: el contacto con algún otro pin de suelda o alguna pista puede causar cortocircuitos.



Figura 1. 32 Soldadura excesiva de elemento en PCB

Fuente: http://www.epectec.com/pcb/defects/solder_defects.html

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En esta sección se revisan todos los posibles elementos, programas y técnicas de control que se tomó en cuenta para la realización del proyecto y se los selecciona mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados.

2.1. SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN DE ROBOT MANIPULADOR

Existen varias configuraciones de manipuladores robóticos. Para el caso de la selección del tipo de robot a usar, se tomó varios aspectos. Los criterios de valoración que se tomaron en cuenta son los siguientes³:

- a) *Facilidad de implementación del control*: ya que varía según la configuración del manipular que se use.
- b) *Fácil accesibilidad*: una vez implementado, que el operador tenga fácil acceso a todas las partes del sistema de control de calidad.
- c) *Bajo peso*: Debe tener un bajo peso ya que como equipo de laboratorio va a ser transportado de un lugar a otro.
- d) *Alta relación tamaño/espacio de trabajo (eficiencia)*: en busca de eficiencia en cuanto a cubrir el espacio de trabajo requerido y el tamaño del manipulador.

Se estudian, las siguientes soluciones:

- Solución A: Angular
- Solución B: Cartesiano
- Solución C: SCARA

En la tabla 2.6, se muestran los resultados de la selección de configuración del manipulador donde se observa que la más apropiada para la implementación del sistema de control de calidad es la angular.

³ <http://machinedesign.com/motion-control/difference-between-cartesian-six-axis-and-scara-robots>

Tabla 2. 1 Evaluación de peso específico de cada criterio

Criterio	Control	Accesibilidad	Peso	Eficiencia	$\Sigma + 1$	Ponderación
Control		1	0,5	0	2,5	0,250
Accesibilidad	0		1	0	2	0,200
Peso	0,5	0		0	1,5	0,150
Eficiencia	1	1	1		4	0,400
Total					10	1

Tabla 2. 2 Evaluación de peso específico del criterio control

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	0,5	1,5	0,250
Solución B	1		1	3	0,500
Solución C	0,5	0		1,5	0,250
Total				6	1

Tabla 2. 3 Evaluación de peso específico del criterio movilidad

Accesibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,500
Solución B	0		0,5	1,5	0,250
Solución C	0	0,5		1,5	0,250
Total				6	1

Tabla 2. 4 Evaluación de peso específico del criterio peso

Peso	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	0,5	2,5	0,416
Solución B	0		0	1	0,166
Solución C	0,5	1		2,5	0,416
Total				6	1

Tabla 2. 5 Evaluación de peso específico del criterio eficiencia

Eficiencia	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,500
Solución B	0		0	1	0,166
Solución C	0	1		2	0,333
Total				6	1

Tabla 2. 6 Selección de configuración del manipulador

Conclusión	Control	Accesibilidad	Peso	Eficiencia	Σ	Prioridad
Solución A	0,25•0,25	0,2•0,5	0,15•0,416	0,4•0,5	0,4249	1
Solución B	0,25•0,5	0,2•0,25	0,15•0,166	0,4•0,166	0,2663	3
Solución C	0,25•0,25	0,2•0,25	0,15•0,416	0,4•0,33	0,3069	2

2.2. SELECCIÓN DE ACTUADORES

Dentro de los actuadores, existen dos tipos de servomotores identificables según su tipo de control, los digitales y los análogos. Los criterios de valoración que se tomaron en cuenta son los siguientes:

- Relación peso/ potencia:* Ya que a mayor peso del actuador mayor es el costo del mismo ya que requiere más torque para realizar una misma función.
- Facilidad de controlar:* Ya que su funcionamiento es una parte esencial del proyecto,
- Conexionado:* Facilidad para acoplar conexiones electrónicas en piezas mecánicas, se busca menor cantidad de cables.
- Precio moderado:* ya que es un equipo prototipo

Se estudian, las siguientes soluciones los cuales poseen torques de salida similares:

- Solución A: Dynamixel AX12A x 2
- Solución B: Hitec HS-805B x 1

En la tabla 2.12, se muestran los resultados de la selección de actuadores para el manipulador donde se observa que el más apropiado es el uso de servo motores digitales Dynamixel AX12 A.

Haciendo referencia al anexo A, se sacó los datos, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2. 7 Evaluación de peso específico de cada criterio

Criterio	Peso/potencia	Retroalimentación	Conexión	Precio	$\Sigma + 1$	Ponderación
Peso/potencia		0,5	1	0	2,5	0,250
Control	0,5		1	0	2,5	0,250
Conexión	0	0		0,5	1,5	0,150
Precio	1	1	0,5		3,5	0,350
Total					10	1

Tabla 2. 8 Evaluación de peso específico del criterio peso/ potencia

Peso/potencia	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	1	0,333
Solución B	1		2	0,666
Total			3	1

Tabla 2. 9 Evaluación de peso específico del criterio control

Control	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	2	0,666
Solución B	0		1	0,333
Total			3	1

Tabla 2. 10 Evaluación de peso específico del criterio conexionado

Conexión	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	2	0,666
Solución B	0		1	0,333

Total	3	1
-------	---	---

Tabla 2. 11 Evaluación de peso específico del criterio precio

Precio	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	2	0,666
Solución B	0		1	0,333
Total			3	1

Tabla 2. 12 Selección de configuración del manipulador

Conclusión	Peso/ potencia	Control	Conexión	Precio	Σ	Prioridad
Solución A	0,088325	0,1665	0,0999	0,2331	0,5827	1
Solución B	0,1665	0,08325	0,04995	0,11655	0,41625	2

2.3. SELECCIÓN DEL CONTROL DEL MANIPULADOR

Para el caso de la selección del control de movimiento del manipulador, se tomó varios aspectos. Los criterios de valoración que se tomaron en cuenta son los siguientes:

- Existencia de singularidades:* ya que se debe cumplir con todo el espacio de trabajo, sin excepción de puntos “inalcanzables”
- Menor consumo de RAM:* se busca que el control del manipulador sea más rápido.
- Menor número de líneas de programación:* para facilidad del programador.
- Mayor uso en actividades “pick and place”:* de esta forma se asegura que método de control de manipulador sea más apropiado para la aplicación.

Se estudian, las siguientes soluciones los cuales poseen torques de salida similares:

- Solución A: Cinemática
- Solución B: Punto a punto

En la tabla 2.18, se muestran los resultados de la selección del método de control para el manipulador más apropiado es el uso programación punto a punto.

Tabla 2. 13 Evaluación de peso específico de cada criterio

Criterio	Singularidades	Memoria	Programación	Pick/place	$\Sigma + 1$	Ponderación
Singularidades		0,5	1	0	2,5	0,250
Memoria	0,5		1	0	2,5	0,250
Programación	0	0		0,5	1,5	0,150
Pick/place	1	1	0,5		3,5	0,350
Total					10	1

Tabla 2. 14 Evaluación de peso específico del criterio singularidades

Singularidades	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	1	0,333
Solución B	1		2	0,666
Total			3	1

Tabla 2. 15 Evaluación de peso específico del criterio consumo de RAM

Consumo de RAM	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	1	0,333
Solución B	1		2	0,666
Total			3	1

Tabla 2. 16 Evaluación de peso específico del criterio líneas de programación

Programación	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	1	0,333
Solución B	1		2	0,666
Total			3	1

Tabla 2. 17 Evaluación de peso específico del criterio pick and place

Pick and Place	Solución A	Solución B	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1,5	0,5
Solución B	0,5		1,5	0,5
Total			3	1

Tabla 2. 18 Selección de configuración del manipulador

Conclusión	Singularidades	Memoria	Programación	Pick/place	Σ	Prioridad
Solución A	0,08325	0,08325	0,04995	0,175	0,3914	2
Solución B	0,1665	0,1665	0,09999	0,175	0,6079	1

Dentro de los criterios tomados encuentra dentro de esta sección está la de Di Gregorio (2002) quien asegura cuando se trabaja con cinemática, la presencia de singularidades locales es un problema recurrente que limita al espacio de trabajo. Como consecuencia del punto anterior, la manipulabilidad del mecanismo es extremadamente cuestionable⁴.

En cuanto a los robots de reproducción, se puede decir que son capaces de realizar una tarea mediante la enseñanza de la posición. Estas posiciones se almacenan en la memoria, y son realizadas con frecuencia por el robot. Se puede dividir en dos tipos importantes, robots de control punto a punto y robots de control de trayectoria continua. De estas dos configuraciones, se explica la que se tiene como alternativa siendo el control punto a punto los cuales se los conoce también como PTP. Tiene la capacidad para viajar de una posición a otra. Los caminos deseados se enseñan y se almacenan en la memoria de la unidad de control. Se puede mover en una pequeña distancia sólo con la ayuda de la programación. Este tipo de robots se puede utilizar para la soldadura por puntos, carga y descarga, y las operaciones de perforación. Estas posiciones incluyen tanto los topes mecánicos para cada articulación, y el conjunto de valores que representan lugares en el rango de cada articulación. Un control de retroalimentación se utiliza para confirmar que las articulaciones individuales alcanzan los lugares especificados en el programa.

⁴ <http://elearning.vtu.ac.in/11/enotes/ComplntManf/unit8-nan.pdf>

2.4. SELECCIÓN DE LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Dentro de una amplia gama de lenguajes de programación disponibles en el mercado, la figura 2.1 muestra el uso de los mismos a nivel mundial, de los cuales se tomó en consideración dos de los más usados en la actualidad. Los criterios de valoración que se tomaron en cuenta son los siguientes:

- a) *Simplicidad*: se evaluó el número de líneas de programación necesaria para que los programas realicen una misma tarea.
- b) *Manejo de excepciones*: ya que podrían ocurrir errores y se necesitaría de la ayuda de ventanas que indiquen el error o manejarlas internamente por el programador.
- c) *Portabilidad*: busca la rapidez en la que corre el programa en diferentes plataformas.
- d) *Robustez*: Ya que debe ser capaz de manejar bien situaciones inesperadas, como ingresar mal datos, memoria llena en visión artificial⁵.

Se estudian, las siguientes soluciones:

- Solución A: Python
- Solución B: Java
- Solución C: Matlab

En la tabla 2.24, se muestran los resultados de la selección del lenguaje de programación que muestran que el más apropiado es Python.

⁵ <https://pythonconquerstheuniverse.wordpress.com/2009/10/03/python-java-a-side-by-side-comparison/>

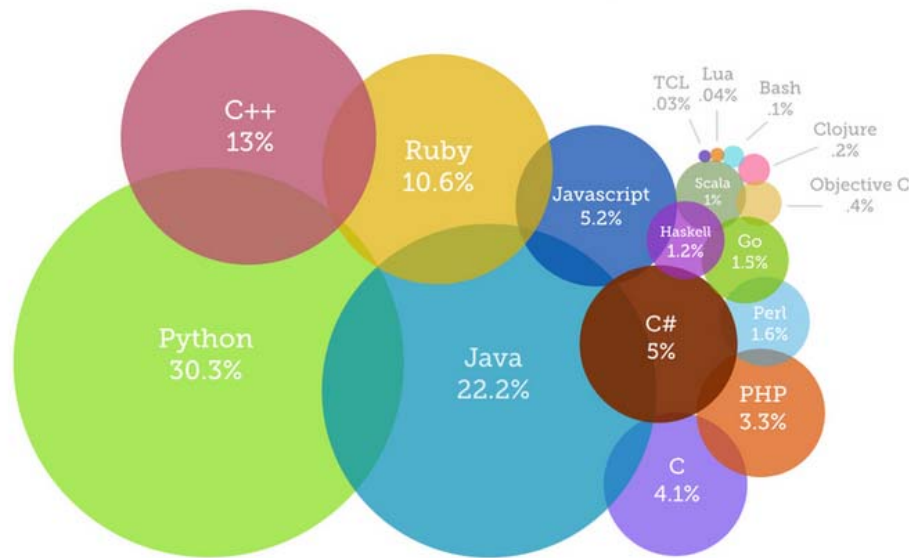


Figura 2. 1 Lenguajes de programación más populares del 2014

Fuente: <http://www.cristalab.com/blog/la-hegemonia-de-python-y-la-caida-de-java-c112595/>

Tabla 2. 19 Evaluación de peso específico de cada criterio

Criterio	Simplicidad	Excepciones	Portabilidad	Robustez	$\Sigma + 1$	Ponderación
Simplicidad		1	1	0	3	0,300
Excepciones	0		0,5	0	1,5	0,150
Portabilidad	0	0,5		1	2,5	0,250
Robustez	1	1	0		3	0,300
Total					10	1

Tabla 2. 20 Evaluación de peso específico del criterio simplicidad

Simplicidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		1	1	3	0,500
Solución B	0		0	1	0,166
Solución C	0	1		2	0,333
Total				6	1

Tabla 2. 21 Evaluación de peso específico del criterio manejo de excepciones

Excepciones	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,416
Solución B	0,5		1	2,5	0,416
Solución C	0	0		1	0,166
Total				6	1

Tabla 2. 22 Evaluación de peso específico del criterio portabilidad

Portabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0	1	2	0,333
Solución B	1		1	3	0,500
Solución C	0	0		1	0,166
Total				6	1

Tabla 2. 23 Evaluación de peso específico del criterio robustez

Robustez	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma + 1$	Ponderación
Solución A		0,5	1	2,5	0,416
Solución B	0,5		1	2,5	0,416
Solución C	0	0		1	0,166
Total				6	1

Tabla 2. 24 Selección de lenguaje de programación

Conclusión	Simplicidad	Excepciones	Portabilidad	Robustez	Σ	Prioridad
Solución A	0,15	0,0624	0,08325	0,128	0,42045	1
Solución B	0,0498	0,0624	0,125	0,128	0,362	2
Solución C	0,099	0,0249	0,0415	0,0498	0,2152	3

CAPÍTULO III

DISEÑO DE LA PROPUESTA

3.1. DISEÑO MECÁNICO

El proyecto consta principalmente de una cámara de luz, la cual ayuda a brindar un escenario aislado de toda luz parasita que afecte a la imagen que será tomada para su posterior análisis, y de un manipulador el cual posiciona la placa en un lugar apropiado si la placa cumple o no los parámetros mínimos establecidos.

Partiendo del área de trabajo mínima de 70 x 70 cm (figura 3.1) o 4900 cm², se obtiene que la longitud total del manipulador a diseñar es de 49.4 cm desde la base del mismo

hasta el efector final teniendo un área de trabajo accesible de 7352.45 cm², cumpliendo con las especificaciones requeridas.

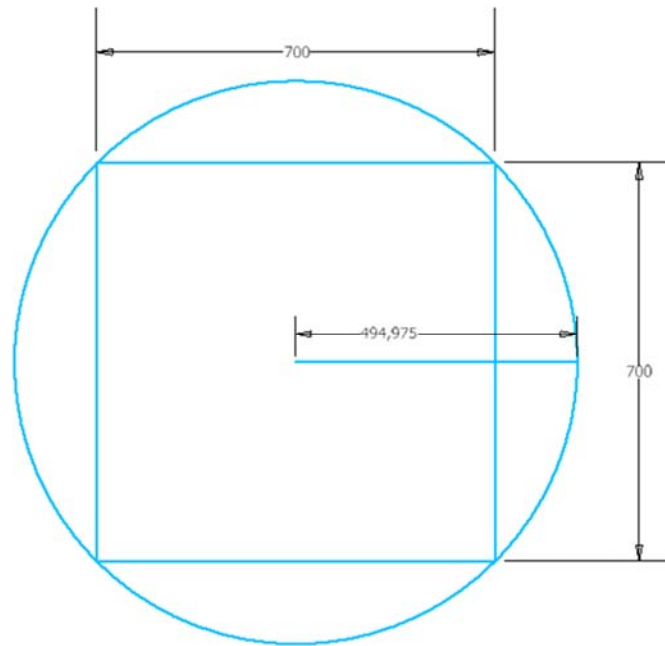


Figura 3. 1 Área mínima de trabajo y longitud de manipulador

Con el fin de establecer una relación en cuanto a longitud de los eslabones del manipulador del antebrazo y brazo, se toma como referencia publicaciones de manipuladores con características similares de los cuales se resume los resultados obtenidos en la tabla 3.1. Se tiene entonces que para el diseño del manipulador se toma en consideración una relación de 1.23 entre el antebrazo y brazo.

Tabla 3. 1 Relación longitud antebrazo y brazo de manipuladores

Ante brazo	Brazo	Relación	Manipulador
16	11	1.45	http://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v4/art2junio08.pdf
23,7	17,2	1.377	http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8837/2/T-ESPEL-MEC-0025-P.pdf
9,7	8	1.22	https://www.academia.edu/3852236/BRAZO_ROB%C3%93TICO_DE_5_GDL_1_DISE%C3%91O_Y_CONSTRUCCI%C3%93N_DE_UN_BRAZO_ROBOTICO_DE_5_GRADOSSEGUNDOS_ESLABONES_TERCER_ESLAB

			ONES_BRAZO_ROB%C3%93TICO_DE_5_GDL_5_CU ARTO_ESLABON
15	10	1.5	http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/3840/1/112562.pdf
14,6	13	1.12	“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO INDUSTRIAL COMANDADO MEDIANTE UN SISTEMA DE CONTROL INALÁMBRICO”, Universidad técnica de Ambato
PROMEDIO		1.23	

Ya que se establece una relación entre el antebrazo y el brazo del manipulador en la tabla 3.1. De la longitud total de 49.4 cm y tomando en cuenta el efector final, se tiene 37.4 cm entre estos dos eslabones a relacionarse.

$$37.4 \text{ cm} = x + 1.23x \quad [3]$$

$$37.4 \text{ cm} = 2.23x$$

$$x = \text{brazo} = 16.77 \text{ cm} = 167.7 \text{ mm}$$

$$\text{antebrazo} = 1.23 * \text{brazo} = 1.23 * 167.7 \text{ mm}$$

$$\text{antebrazo} = 206.2 \text{ mm}$$

De la ecuación 3, se obtiene que las medidas de los eslabones del manipulador diseñado son de 206.2 y 167.7 mm para el antebrazo y brazo respectivamente. Ya que la parte económica es uno de los pilares fundamentales de este proyecto, se estudió la posibilidad de usar juntas que se encuentran en el mercado por los costos que estos representan en comparación a la fabricación de piezas que cumplan con las mismas funciones pero a costos elevados. El costo de una de estas juntas, por ejemplo, es de \$1.49 mientras que tomando en cuenta el costo de las impresiones en tres dimensiones para la fabricación de una pieza similar es de \$8. Considerando también que para la aplicación en la que se usa dentro del proyecto, estas juntas proporcionan un factor de seguridad alto, por los beneficios tanto económicos como mecánicos, para los eslabones del brazo y antebrazo se implementan estas juntas.

3.1.1. ASPECTOS TÉCNICOS

El robot consta de las siguientes partes principales:

1. Efector final
2. Muñeca
3. Brazo
4. Antebrazo
5. Columna rotatoria
6. Instalaciones eléctricas
7. Base

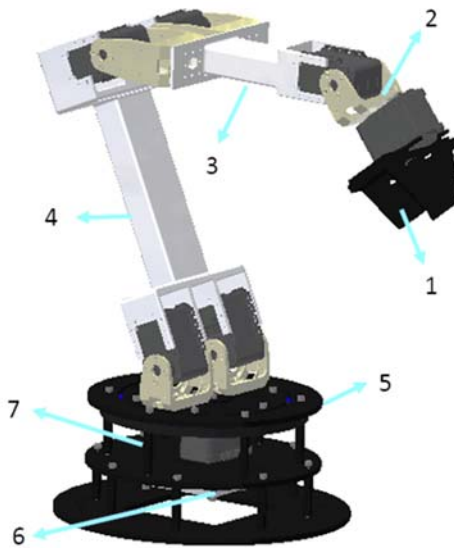


Figura 3. 2 Partes del manipulador

3.1.1.1. Matriz de Denavit-Hartenberg

El diseño del manipulador tiene la siguiente configuración, resumida en la matriz de que se muestra a continuación.

Tabla 3. 2 Parámetros de DH

Articulación	α_{i-1}	a_{i-1}	θ_i	a_i
1	0	0	θ_1	0
2	$\pi/2$	206.2	θ_2	38

3	0	167.7	θ_3	0
4	0	12	θ_4	0

3.1.1.2. Información básica

Tabla 3. 3 Información básica del manipulador

Tipo de manipulador	Angular
Número de grados de libertad	4
Número de ejes controlables	4
Radio de repetitividad	+/- 1 mm
Punto de referencia de trabajo	Efecto final
Carga útil	200 gr
Tipo de efecto final	Mecánico
Peso	Aprox. 1.5 kg
Posición de montaje	Piso
Tamaño requerido para montar base	190 mm ²
Ángulo permisible de inclinación	-
Color	Negro

3.1.1.3. Cables de conexión

Tabla 3. 4 Cables de conexión en manipulador

	Longitud de cables
Cable standard Dynamixel	60 mm
Cable standard Dynamixel	100 mm
Cable standard Dynamixel	200 mm

3.1.2. GRADOS DE LIBERTAD Y DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE FBD

Se diseñó el brazo robótico con un total de 4 DOF, capacidad que brinda una suficiente movilidad dentro del área de trabajo del manipulador. Al igual que en los brazos robóticos industriales, Anexo B, se da la libertad de escoger el efecto final que sea óptimo para la aplicación a realizar, para este caso, se añadió al manipulador un efecto final mecánico tipo pinza con actuación simultánea PhantomX parallel AX-12A gripper, la cual con el movimiento del servomotor de control, las dos tenazas de la

pinza se desplazan al mismo tiempo dejando la carga a sostener a la mitad del manipulador.

3.1.2.1. Información de los ejes

En la figura 3.3, se puede apreciar donde se encuentra cada uno de los ejes dentro del manipulador y también la orientación del movimiento en cada uno de los DOF.

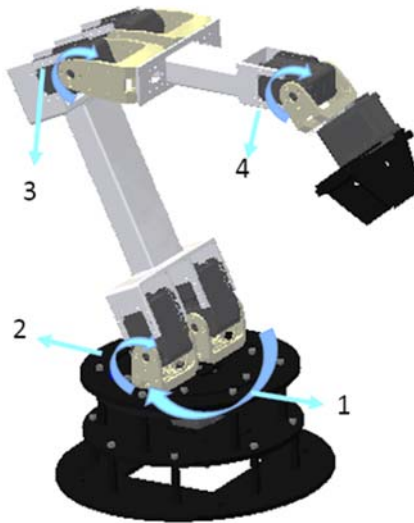


Figura 3. 3 Posición de ejes en el manipulador

Cada grado de libertad, posee limitaciones tanto físicas como mecánicas sea de velocidad como de movimiento. En la tabla 3.5, se muestra un detalle de la característica de cada uno de los DOF que posee este manipulador.

Tabla 3. 5 Limitaciones en los DOF del manipulador

Eje	Rango de movimiento, limitaciones de Hardware	Velocidad con carga de trabajo (rpm)
1	+/- 360	35
2	+/- 180	30
3	-90 a +260	25

4	± 180	40
---	-----------	----

Es necesario también tomar en cuenta la posición y dirección de cada uno de los actuadores dentro del manipulador, en la figura 3.4 se representan las localizaciones de cada grado de libertad controlable dentro del manipulador. Este diagrama ayuda para la obtención de la matriz de Denavit-Hartenberg.

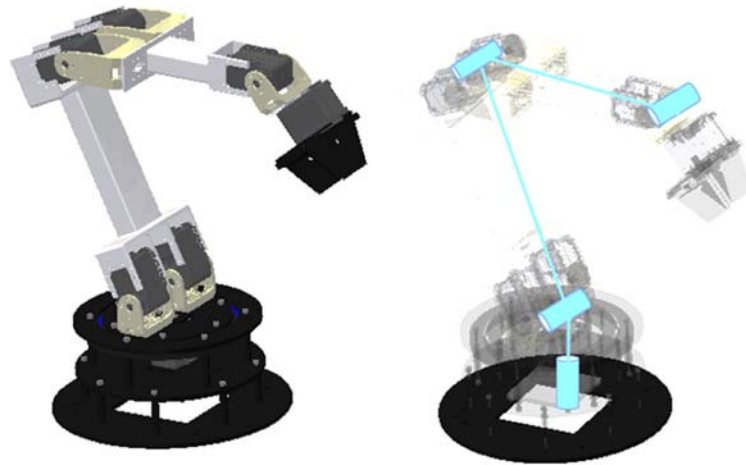


Figura 3. 4 FBD del manipulador diseñado

3.1.3. ESTRUCTURA

El proyecto está compuesto de una cámara de luz (figura 3.5) la cual se la diseñó para reducir las perturbaciones de iluminación que se puedan incluir en la imagen, así también como para tener un ambiente controlado y uniforme en cuanto al factor luz. Para la obtención de luz uniforme, se le añadió a esta cámara una iluminación difusa, en la cual se utilizan lámparas de luz lineales fluorescentes. Dentro del mercado, se encuentra una lámpara Voltech de 8W con 32 cm de longitud, medidas con las que se diseña la cámara de luz.

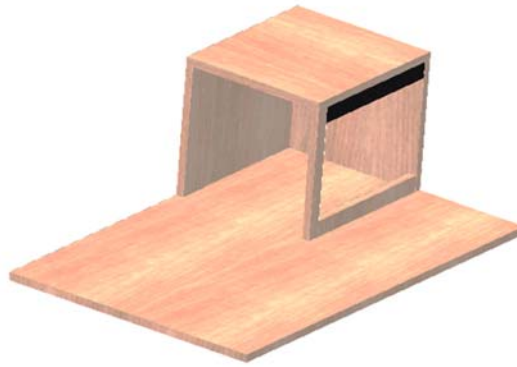


Figura 3. 5 Cámara de luz

Por otro lado, el manipulador dentro de su estructura mecánica se divide en 4 partes principales, la base, el antebrazo, el brazo, la muñeca y el efector final.

La base, figura 3.6, está compuesta de 3 piezas de polimetilmetacrilato, distanciadas con espaciadores de polioximetileno. Es una estructura de dos niveles, el primero, es el espacio reservado para las placas electrónicas que se necesitan para el control del manipulador. El segundo da el espacio para el servomotor que hace girar toda la estructura en su propio eje.



Figura 3. 6 Estructura de la base del manipulador referencia de PhantomX Reactor Arm

El antebrazo, figura 3.7, consta de 2 piezas principales. Un soporte tipo F2 compatible con los servomotores usados y una junta de poliácido láctico fabricado con la ayuda de una impresora 3D. Para el diseño de esta pieza se optimiza el uso de la cantidad de material usado para que soporte las cargas a la que está sometida.

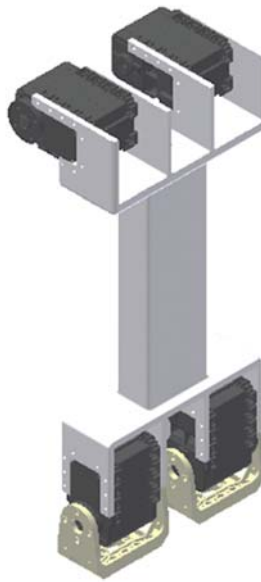


Figura 3. 7 Estructura del antebrazo del manipulador

Por otra parte, el brazo (figura 3.8) tiene el mismo tipo de estructura que el antebrazo, compuesta por dos soportes tipo F4, los cuales unen el antebrazo con el brazo y una junta de poliácido láctico la cual está diseñada para acoplarse con el servo motor Dynamixel AX-12A.

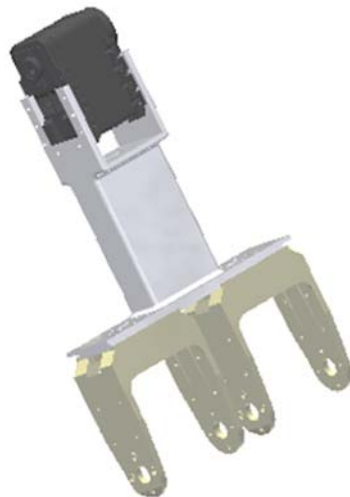


Figura 3. 8 Estructura del brazo del manipulador

En conjunto, figura 3.9, la estructura del prototipo se basa en el manipulador y la cámara de luz. Dentro de esta cámara, se encuentra un sujetador, el cual es el encargado de mantener de forma vertical las placas puestas a prueba.

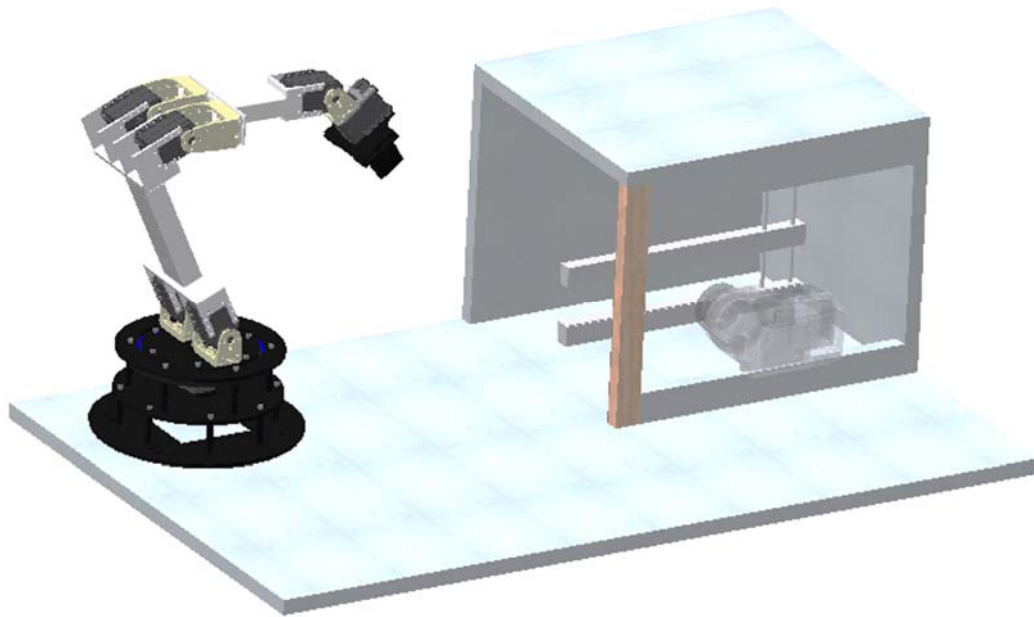


Figura 3. 9 Prototipo de control de calidad de soldas en placas electrónicas con manipulador de 4 DOF

El sujetador de placas se muestra en la figura 3.10, se basa en dos bases de acero A36, unidas por dos ejes de 6 mm, cada uno ajustado por prisioneros dejando al operador ajustar la resistencia al movimiento de la base superior.

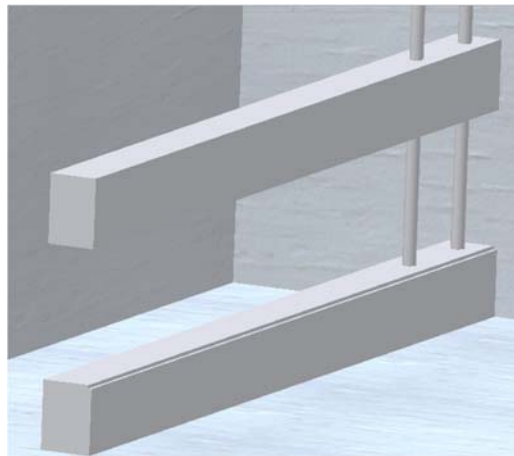


Figura 3. 10 Sujetador de placas

3.1.4. ANÁLISIS CAE DE LA ESTRUCTURA

Para realizar el análisis mediante ingeniería asistida por computadora, CAE, primero se realizó el diagrama de cuerpo libre del brazo robótico (figura 3.11) identificando las cargas que actúan sobre éste. Se calcula los esfuerzos y el factor de seguridad, datos

con los que se compara si los resultados obtenidos por el simulador concuerdan con lo obtenido en dichos cálculos.

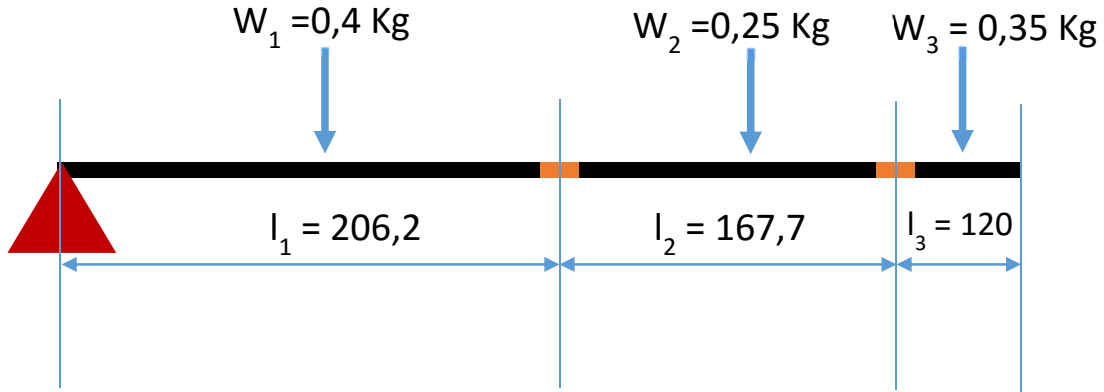


Figura 3. 11 Diagrama de cuerpo libre del manipulador

Donde:

L_1 = Longitud del antebrazo

L_2 = Longitud del brazo

L_3 = Longitud de efector final

W_1 = Peso estructura antebrazo y servomotor

W_2 = Peso estructura brazo y servomotor

W_3 = Peso estructura efector final y 200g de carga

Donde:

$$M_{W1} = W_1 * \frac{L_1}{2} \quad (4)$$

$$M_{W1} = W_1 * \frac{206,2}{2}$$

$$M_{W2} = W_2 * (L_1 + \frac{L_2}{2}) \quad (5)$$

$$M_{W2} = W_2 * (206,2 + \frac{167,7}{2})$$

$$M_{W3} = W_3 * (L_1 + L_2 + \frac{L_3}{2}) \quad (6)$$

$$M_{W3} = W_3 * (206,2 + 167,7 + \frac{120}{2})$$

Y,

$$\sum M = 0$$

Entonces el momento total estará definido por la suma de las ecuaciones 4 ,5 ,6:

$$M = M_{W1} + M_{W2} + M_{W3}$$

$$M = (0.35 * 433.9) + (0.25 * 290.05) + (0.4 * 103.1)$$

$$M = 2,66 \text{ Nm}$$

Este es el torque mínimo que debe tener el o los servomotores de la base para poder mover la estructura.

En la figura 3.12 se puede reconocer el componente que soporta la mayor de las cargas, por lo que se procede a realizar el análisis de este elemento principalmente para corroborar que los datos que arroja el simulador de elementos finitos que posee Inventor 2015 versión estudiantil y los calculados concuerdan.

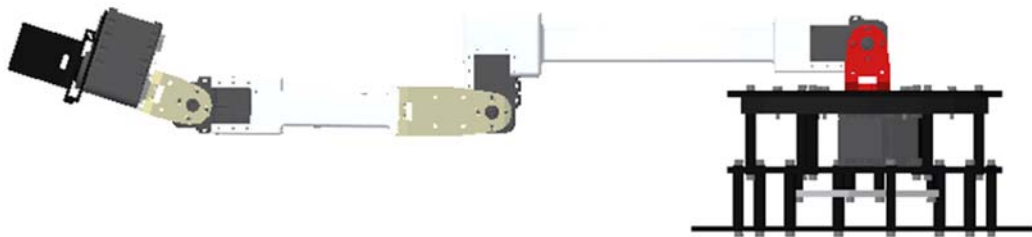


Figura 3. 12 Pieza que soporta cargas más críticas en el manipulador

Para este componente se tienen dos tipos de material disponibles en el mercado, aluminio y de polioximetileno. Se verifica cuál de los dos materiales es óptimo para soportar las cargas que actúan sobre este componente. Como en el diseño se contempla el uso de dos de estas piezas, el momento generado por las cargas se divide de igual manera para dos. Primeramente, se analiza la pieza fabricado con el material menos costoso, el polioximetileno, con lo que se obtuvo lo siguiente.

Este material posee un $S_y = 68,1 \text{ MPa}$, se determina si el espesor de la pieza es el adecuado para soportar las cargas, por lo que,

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{S_y}{n} \quad (8)$$

Para la sección de estudio (figura 3.13) se tiene un rectángulo en el cual se está buscando el ancho del mismo.

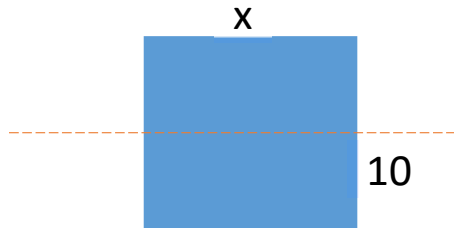


Figura 3. 13 Sección de análisis

Donde:

$$C = \frac{10}{2} mm \quad (9)$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{x \times 10^3}{12} \quad (10)$$

Reemplazando las ecuaciones 8 y 9 en 10, considerando el espesor de la sección lateral de pieza de 3 mm, se obtiene que:

$$n = \frac{68.1 MPa \times \frac{0.003 \times 0.01^3}{12} m^3}{\frac{2,656}{4} Nm * \frac{0,01}{2} m}$$

$$n = 5.12$$

Con un total de 52109 elementos dentro del mallado para el análisis en elementos finitos. Las simulaciones de la pieza arrojaron los resultados que se muestran en la figura 3.14, donde se puede apreciar que se obtiene un factor de seguridad de 5.34. Valor muy próximo al 5.12 con el que se calculó.

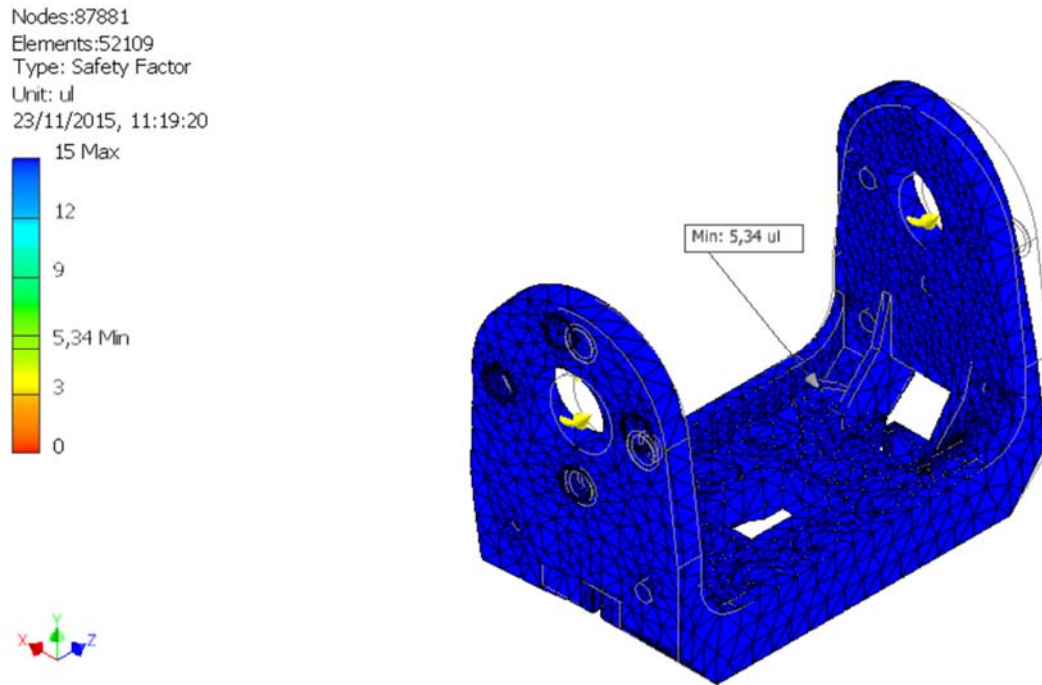


Figura 3. 14 Comprobación de resultados arrojados por simulador de Inventor Profesional 2015

Las cargas que se aplicaron para la simulación se muestran en la figura 3.15. El valor de 604,04 N mm es el momento que soporta cada apoyo, teniendo un total de 4 apoyos(2 por pieza), consiguiendo el momento total de 2.66 N m que se calculó.



Figura 3. 15 Momento aplicado a pieza en estudio

De la misma manera, se comprueba que la solución ha llegado a una convergencia con un error de 0,015%. En la figura 3.16 se puede ver como a partir de la iteración número 2, el programa ha encontrado la solución con un error según la capacidad del equipo. Para comprobar que no sea éste un punto de silla, se realizó más iteraciones

manteniendo valores aproximados, confirmando que se ha llegado a la respuesta correcta.

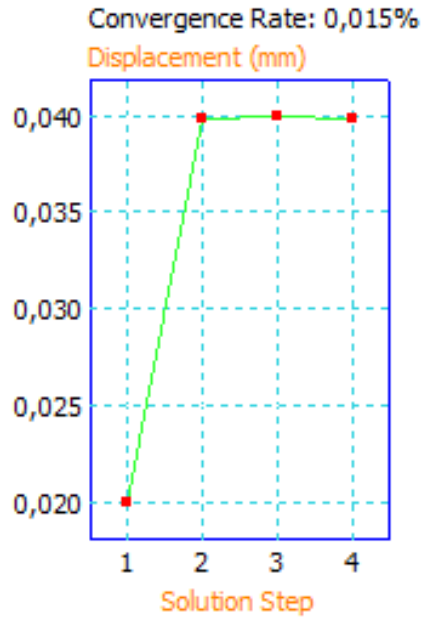


Figura 3. 16 Rango de convergencia en simulación de pieza F2

Con estos resultados se procede a simular las piezas faltantes. Para las piezas de PLA, se introducen los datos de la tabla 3.5 como propiedades del material a simular. La resistencia del material se obtuvo a partir de resultados obtenidos en ensayo. (Anexo C).

Tabla 3. 5 Propiedades PLA

Propiedad física	Valor	Unidad
Densidad	1,25	gr/cm ³
Coeficiente de Poisson	0,36	-
Módulo de Young	3,5	GPa
S _{ut} , S _y	14,92	MPa

En la figura 3.17 a), se muestra los resultados en cuanto a factor de seguridad aplicada la carga calculada, usando un total de 27034 de elementos para la simulación. Para la pieza, se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 5.9. En la gráfica 3.17 b) también se muestra la gráfica de convergencia de resultados.

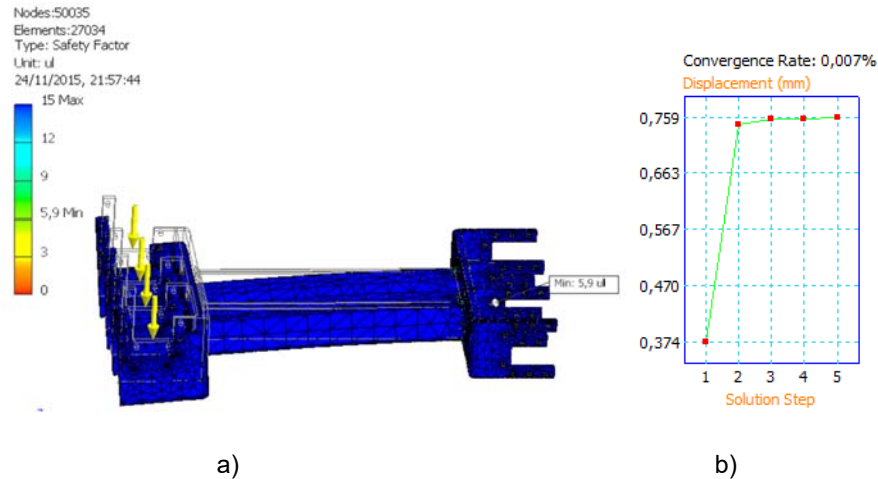


Figura 3. 17 a) Resultados de la estructura del antebrazo expuesta a fuerzas de carga. b) Gráfica de convergencia de los resultados en simulación

Es necesario realizar el análisis de rigidez el cual garantizará una deformación máxima permisible para la pieza. Para la aplicación, un factor crucial es el establecer los límites de flexión, para esto se tiene entonces tres grupos para diferentes aplicaciones o partes de máquina:

$$\text{Parte general de una máquina} \rightarrow y_{max}/L = 0.0005 \text{ a } 0.003 \text{ mm}$$

$$\text{Precisión moderada} \rightarrow y_{max}/L = 0.000 \text{ 01 a } 0.000 \text{ 5 mm}$$

$$\text{Alta precisión} \rightarrow y_{max}/L = 0.000 \text{ 001 a } 0.000 \text{ 01 mm}$$

Para el diseño de las piezas del manipulador, se tomó en cuenta el rango para una parte general de una máquina, considerando una relación mínima de 2000 entre la longitud de la pieza y la deformación. Para el antebrazo, tomando en cuenta que tiene 216.45 mm con un comportamiento de viga en voladizo, se tiene que la deformación no debe ser mayor a:

$$y_{max} = 0.002 * L \quad (11)$$

$$y_{max} = 0.002 * 219.45 = 0.4389 \text{ mm}$$

De la ecuación 11 para un $L=219.45$ mm, se concluye que la estructura no debe flejarse más de 0.4389 mm. Los resultados obtenidos en la simulación, figura 3.18, muestran que el desplazamiento máximo de la pieza es de 0.2986 mm en la zona más crítica, deformación menor a la máxima establecida. Se disminuyó el desplazamiento de la pieza aumentando el espesor de la misma, con lo que se analizará solamente las piezas por rigidez.

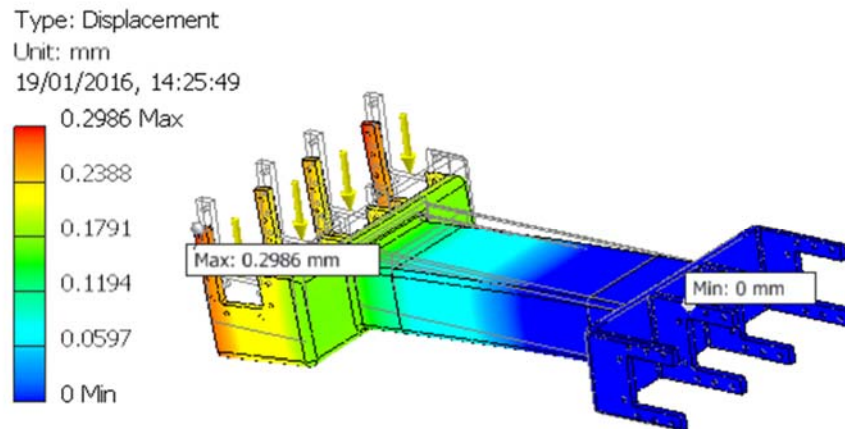


Figura 3. 18 Resultados de desplazamiento de la estructura del antebrazo expuesta a fuerzas de carga

Para confirmar si el soporte F2 utilizado en el antebrazo no sobrepasa los límites de desplazamiento una vez aplicada la carga, partiendo de la ecuación 11, siendo $L = 37.5 \text{ mm}$ se obtiene que la deformación en la pieza no debe ser superior a 0.0397 mm

$$y_{max} = 0.002 * L$$

$$y_{max} = 0.002 * 39.7$$

$$y_{max} = 0.0794 \text{ mm}$$

En la figura 3.19, se muestran los resultados con su respectiva gráfica de convergencia. Se tiene un desplazamiento máximo de 0.03967 mm .

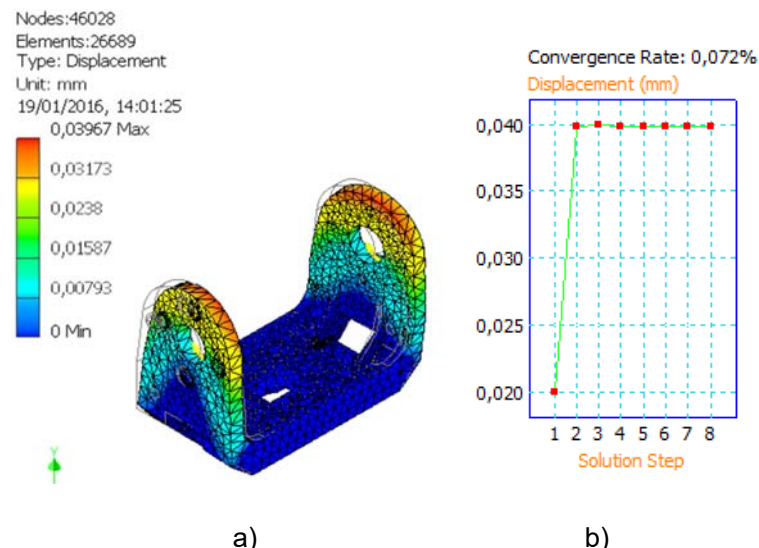


Figura 3. 19 a) Resultados de desplazamiento del soporte F2 expuesta a fuerzas de carga. b) Gráfica de convergencia de los resultados en simulación

Siendo el antebrazo, una pieza crítica en comparación al brazo ya que soporta más peso y tiene mayor longitud, en la sección intermedia de la pieza se disminuyó el espesor a 1.5 mm para el diseño de la junta del brazo. Con un total de 137352 nodos dentro del mallado, se realizó el análisis de rigidez. Con un $L=105.21$ mm reemplazado en la ecuación 11, se tiene que la distancia máxima de desplazamiento es de 0.21042 mm. En la figura 3.20, se muestran los resultados obtenidos del análisis del desplazamiento de la estructura sometida a la carga, con lo que se consiguió como máximo valor 0.07718 mm de variación en la parte más crítica de la pieza.

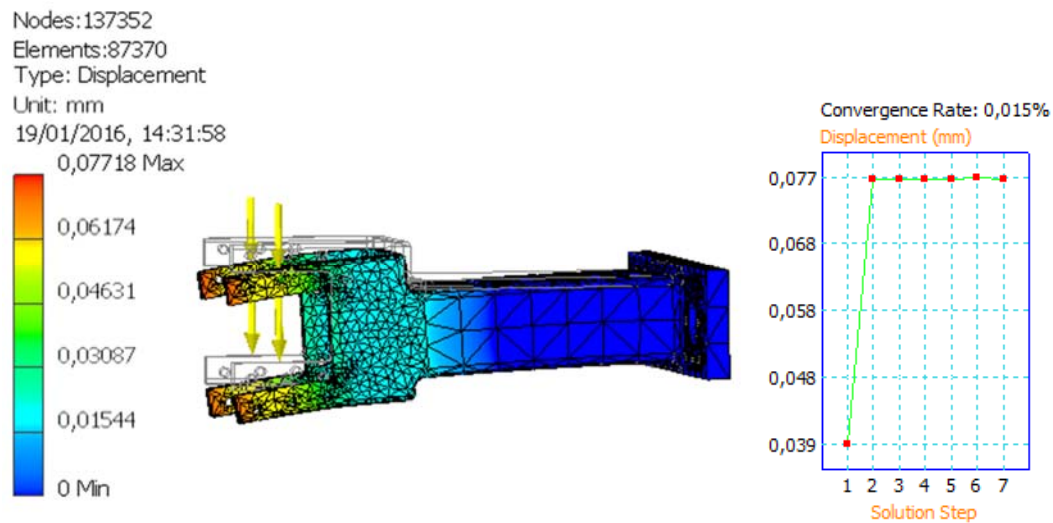


Figura 3. 20 a) Resultados de desplazamiento de la estructura del brazo expuesta a fuerzas de carga.
b) Gráfica de convergencia de los resultados en simulación

Las paredes de la cámara de luz, se diseñaron para que toda la estructura soporte condiciones críticas, no solamente sus cargas normales. El escenario en el que se diseña es en el que una persona se apoya en la estructura, por lo que tomando una persona promedio de 70Kg de peso, y dividiendo sus componentes, se simula la estructura soportando una carga de 343 N. Para este caso se toma el rango de precisión moderada para los límites de deformación, 0.0005, ya que dentro de esta estructura se encuentran componentes costosos (cámara de fotos, manipulador) y la falla de esta estructura podría ocasionar pérdidas materiales hasta el 100%. Para la ecuación 11, siendo $L = 180$ mm se obtiene que la deformación en la pieza no debe ser superior a 0.09 mm

$$y_{max} = 0.0005 * L$$

$$y_{max} = 0.0005 * 180$$

$$y_{max} = 0.09 \text{ mm}$$

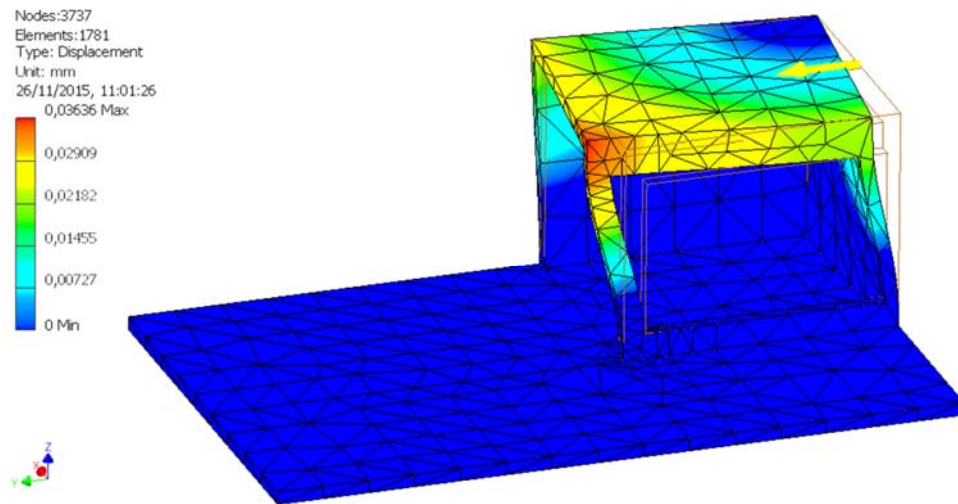


Figura 3. 21 Resultados de desplazamiento de la estructura la cámara de luz expuesta a fuerzas de carga

Los resultados obtenidos en la simulación, figura 3.21, con un total de 3737 nodos, se tiene que la deformación máxima de la estructura es de 0.03 mm siendo el espesor de plancha de 15 mm, el cual se selecciona por su disponibilidad.

Para las uniones atornilladas de cada una de las piezas dentro del manipulador, se realizó la simulación para establecer el número mínimo de tornillos requeridos para que se garantice que las uniones no cedan frente a las cargas aplicadas.

En la tabla 3.6 se resumen los valores obtenidos en la simulación para las uniones de las piezas del manipulador robótico. Los resultados completos de todas las simulaciones realizadas se encuentran en el anexo C.

Tabla 3. 6 Resumen resultados de simulación de uniones para piezas del manipulador

PIEZA SOPORTE TIPO F2	
# de tornillos de unión	Factor de seguridad n
Unión con un tornillo	0,3
Unión con dos tornillos	1,64
Unión con cuatro tornillos	1,81
Unión con seis tornillos	2,13
PIEZA ANTEBRAZO IMPRESA EN 3D	

# de tornillos de unión	Factor de seguridad n
Unión con dos tornillos en juntas exteriores	1,07
Unión con cuatro tornillos en juntas exteriores	1,24
Unión completa	5,13
PIEZA BRAZO IMPRESA EN 3D	
# de tornillos de unión	Factor de seguridad n
Unión con dos tornillos	1,34
Unión con cuatro tornillos	2,64
Unión con ocho tornillos	4,56
Unión completa	4,69

3.1.5. ACTUADORES

De la ecuación 7, se tiene momento máximo que se debe tener para mover la estructura desde la base, siendo este el punto más crítico del manipulador ya que debe soportar el peso de la carga y estructura del efector final, antebrazo y brazo. De la ecuación 6 se tiene que:

$$M_{serv} = 2.66 \text{ Nm}$$

Entonces éste es el torque mínimo que debe ofrecer el servomotor para poder mover toda la estructura más el peso de la carga. Dentro de la marca de actuadores robóticos Dynamixel, el servomotor MX-28T cumple con esta característica, brindando un torque de 3.09 N m. Partiendo de este dato, se tomó la siguiente consideración. ¿Será más óptimo el uso de un servomotor, o la combinación de dos? Entonces se tomaron en cuenta el servomotor antes mencionado y el modelo AX-12 y los resultados se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3. 7 Actuadores idóneos disponibles

		
Modelo	MX-28T	AX-12 A
Torque	3.09 N m	1.5 N m
Velocidad (RPM)	67	59
Voltaje de operación	14.8 V	12 V
Resolución	0.088°	0.29°
Peso	72 gr	54.6 gr
Angulo de operación	360	360
Precio (\$)	219.9	44.9

En cuanto a precio, se optimiza este rubro al usar dos servomotores Dynamixel AX-12A garantizando el torque necesario. Entonces se tiene que los servomotores de la base, trabajarán a un

$$M_{AX12} = 1.5 \text{ N m}$$

$$MT_{AX12} = 2 * 1.5 \text{ N m} = 3 \text{ N m}$$

$$\% \text{ de trabajo} = \frac{M_{servo}}{MT_{AX12}} = \frac{2.65 \text{ N m}}{3 \text{ N m}} = 88\%$$

Con esto se garantiza que los servomotores no trabajen al 100% de su capacidad ya que los actuadores trabajando a máxima capacidad tienden a calentarse y a enviar señales parasitas. Se deja aproximadamente un 20% de libertad frente a la capacidad máxima ofrecida por el servomotor. Una vez programado el brazo robótico, conociendo que a carga máxima el brazo robótico se soporta a una distancia menor a la total del brazo, tras conocer la señal de feedback de torque en los servomotores de

la base, se obtuvo un resultado de 1.05 N m, por servo motor, haciendo que los servomotores tengan un 70% de capacidad de su total disponible.

3.2. AJUSTE DEL CONTROL

3.2.1. CONTROL Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

El sistema de visión por computador consiste en distintos módulos que tienen diferentes propósitos. Los módulos creados son:

- Detección de formas
- Detección de colores

3.2.1.1. Detección de formas

La detección de formas se ha realizado empleando la técnica de aproximación Douglas-Peucker DP. Se puede definir en los siguientes pasos:

1. Cargar imagen puesta a prueba.
2. Convertir la imagen a escala de grises.
3. Aplicar Threshold a imagen obtenida en 2 y se guarda en un archivo nuevo con extensión JPG.
4. Cargar la imagen creada y se la convierte a escala de grises
5. Aplicar segundo Threshold
6. Utilizar función de detección de borde por aproximación DP y se guarda datos en matriz contours.
7. Revisar un ciclo de repetición for en contours y se guarda la información en la variable cnt
8. Verificar la longitud de cnt y se determina la forma de la figura encontrada según se indica en la tabla 3.8.

Tabla 3. 8 Representación de longitud del vector vs forma en algoritmo de reconocimiento.

LONGITUD DEL VECTOR	FORMA
+ 70	Triángulo
< 40	Cuadrado
> 40 y <70	Círculo

9. Extraer posición de forma geométrica encontrada.
10. Graficar contorno de forma encontrada en imagen a color.

En la figura 3.22 se observa el resultado de la técnica.

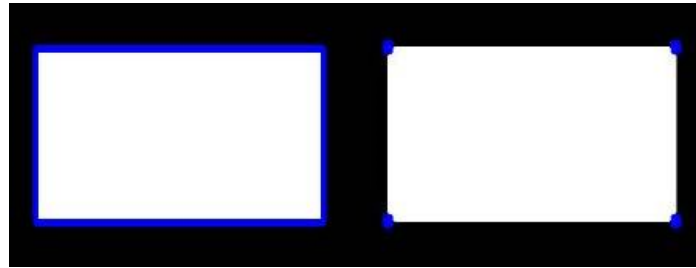


Figura 3. 22 Detección de bordes

Fuente: http://opencv-python-tutroals.readthedocs.org/en/latest/py_tutorials.html

3.2.1.2. Detección de colores

La detección de color se ha realizado utilizando solamente las características principales de la imagen. Se puede definir en los siguientes pasos:

1. Cargar imagen puesta a prueba en la variable `img`.
2. Ingresar en el vector **buscar** la escala RGB que se desea encontrar en la imagen puesta a prueba. [0-255,0-255,0-255]
3. Analizar `img` y se guarda en `x` e `y` las dimensiones de la imagen tanto de alto como de ancho.
4. Buscar coordenada del pixel y se extrae valor RGB del mismo con la sentencia `img [x/2] [y/2]` y se guarda valores en la variable **color**.
5. Variable **color** -> vector de longitud 3, donde los rangos varían entre [0-255,0-255,0-255], de los cuales cada valor se puede representar en la escala RGB.
6. Restar valores obtenidos en variable **color** con **buscar**.
7. Si el resultado es menor a 70, objeto es del mismo color.
8. Etiquetar dicho pixel con su respectivo color.



Figura 3. 23 Representación del resultado de reconocimiento de color

Fuente: <http://www.pyimagesearch.com/2014/08/04/opencv-python-color-detection/>

3.2.1.3. Detección de errores en sueldas de placas de circuito impreso

Para la detección de errores en sueldas de placas de circuito impreso, se utilizaron el algoritmo descrito anteriormente, figura 3.24, sumado al algoritmo SIFT.

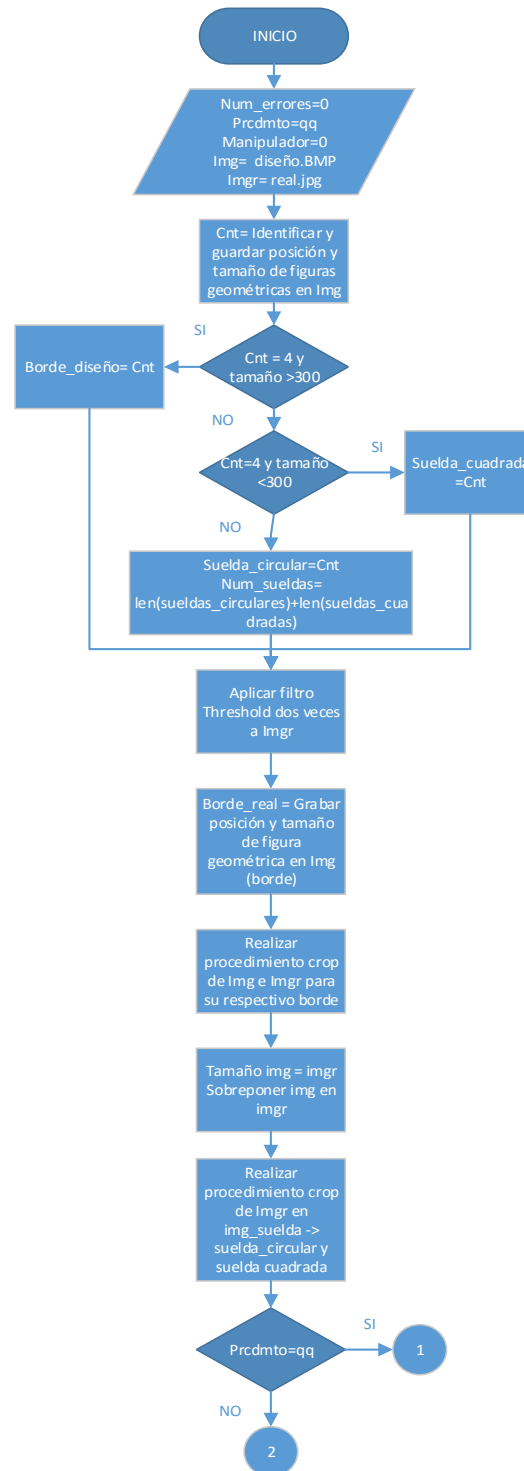


Figura 3. 24 Diagrama de flujo procesamiento de imágenes para la detección de sueldas

Ya que la técnica SIFT identifica puntos característicos de un objeto para posteriormente poderlo encontrar en una imagen diferente, brindando un número el cual establece que tan semejante es el objeto que se está buscando con el tomado por medio de los puntos característicos del mismo. La efectividad del algoritmo se muestra en las figuras 3.25 y 3.26, en las cuales las pruebas se realizó sin la implementación de la cámara de luz y con ayuda de esta, respectivamente.

En la figura 3.25 y 3.26, se observa que a mayor número de fotografías en la base de datos mejor es la respuesta del algoritmo hasta llegar al punto de que la curva empieza a tener un comportamiento lineal con un incremento bajo en cuanto a efectividad.

A pesar de que se tiene un comportamiento similar del algoritmo con, y sin el uso de iluminación difusa, la diferencia se centra en el número de muestras necesarias para que el algoritmo se comporte linealmente. Sin el uso de iluminación difusa, a partir de 70 muestras se considera el sistema estable.

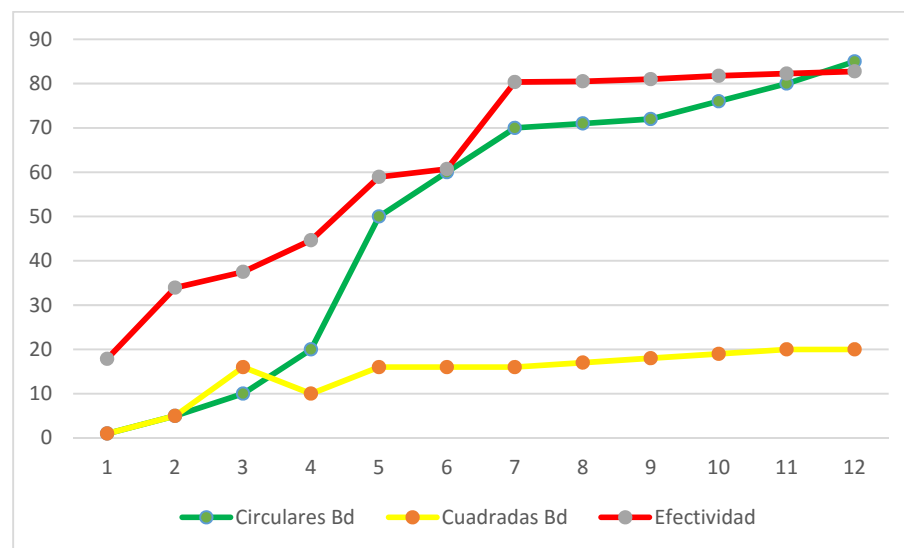


Figura 3. 25 Relación de efectividad entre número de especímenes dentro de la base de datos sin iluminación difusa

Por otro lado, con el uso de la iluminación difusa, añadiendo a la base de datos un número menor de muestras se obtiene una efectividad mayor a la que se obtuvo en el experimento anterior. Se observa en la figura 3.26 que a partir de las 60 muestras se considera el sistema estable, por lo que se añade esas muestras a la base de datos como base, el usuario puede seguir añadiendo más muestras según se desee.

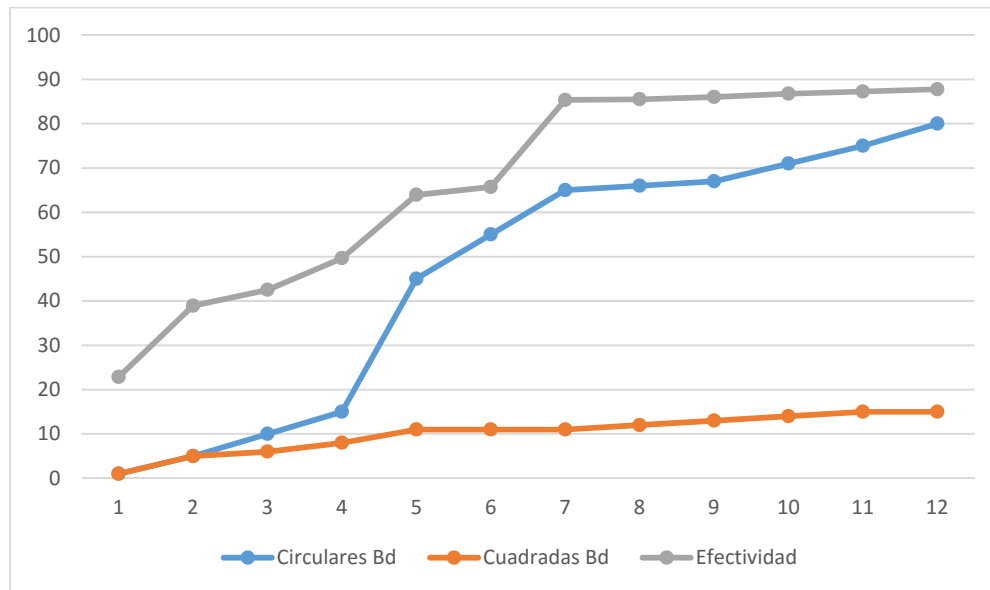


Figura 3. 26 Relación de efectividad entre número de especímenes dentro de la base de datos con iluminación difusa

Se creó entonces una base de datos con más de 66 muestras de sueldas correctas, esto con el fin de que el algoritmo compare cada una de estas imágenes con la puesta a prueba teniendo como resultado un número el cual indica cuantas relaciones se encontraron entre la imagen puesta a prueba y las de las bases de datos. Una vez realizado este procedimiento con todas las sueldas de la placa de circuito impreso, se determina si el valor obtenido de relación es lo suficientemente grande como para considerarse una suelda no defectuosa, por lo que se maneja un modelo probabilístico. El algoritmo se resume en la figura 3.27, al cual se le integra el control del manipulador robótico el cual permite el movimiento del mismo.

Por otro lado, para que el usuario tenga la oportunidad de aumentar la base de datos, una vez que se tiene a prueba una placa de circuito impreso con sueldas ejemplares, se establece el siguiente algoritmo, figura 3.28, como parte del algoritmo planteado en la figura 3.24 ya que se debe seguir un procedimiento similar para que las nuevas muestras sean grabadas en la carpeta correspondiente y que el algoritmo resumido en la figura 3.24 identifique automáticamente las nuevas imágenes dentro de la base de conocimiento y las use.

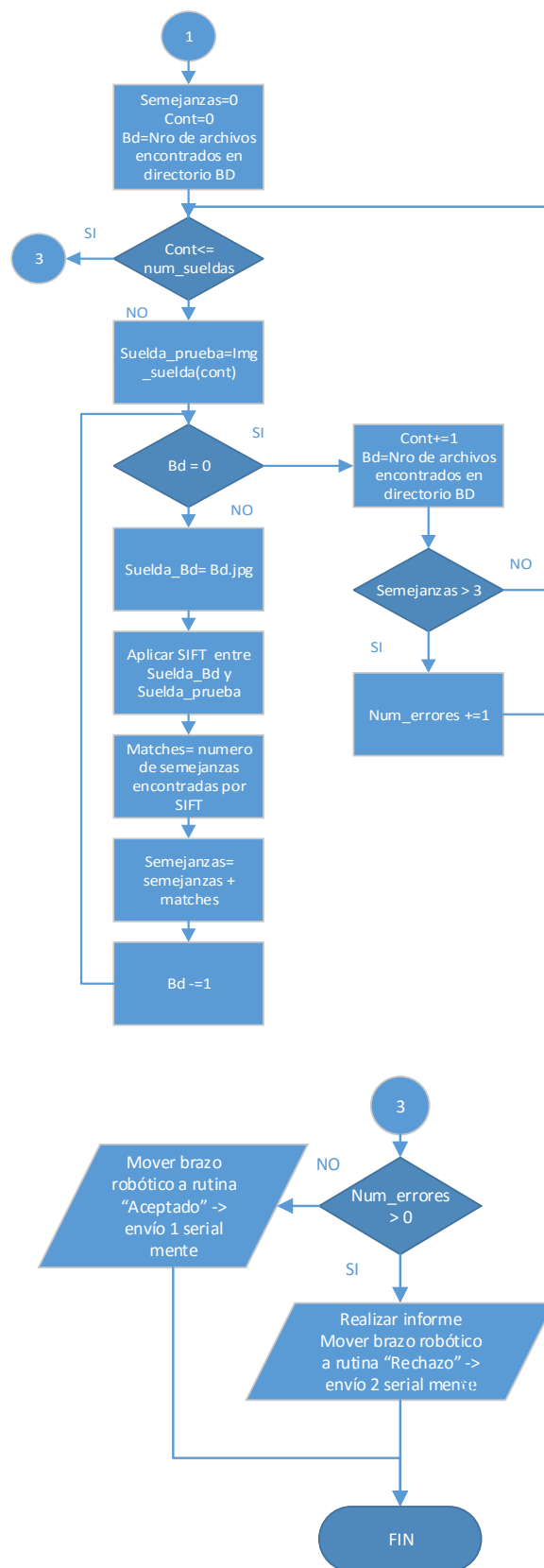


Figura 3. 27 Diagrama de flujo selección de sueldas correctas e incorrectas

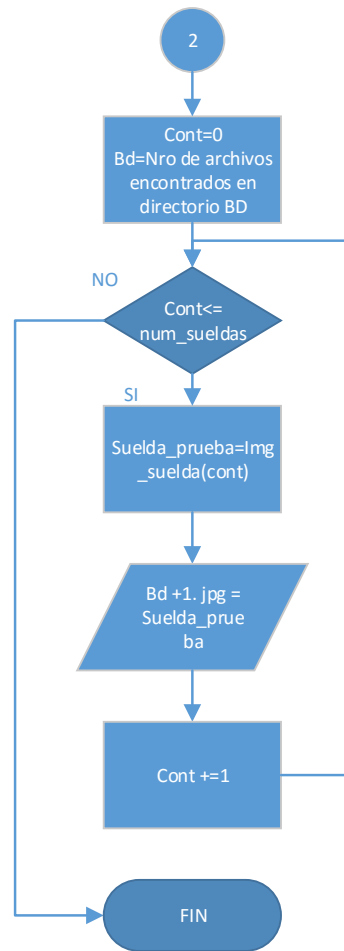


Figura 3. 28 Diagrama de flujo aumento de imágenes en la base de datos

3.2.1.4. Configuración de servomotores

Hay que tomar en cuenta que la conexión de múltiples actuadores Dynamixel en un mismo nodo es posible ya que utiliza half-duplex UART. Este protocolo no permite el mantener más de una transmisión al mismo tiempo cuando se controlan estos actuadores.

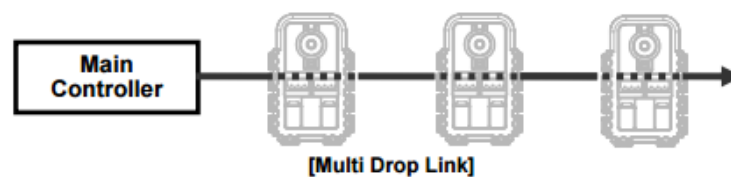


Figura 3. 29 Conexión en cadena de actuadores a controlador.

Fuente: http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/dxl_ax_main.htm

Cuando se alimentan los servomotores Dynamixel, los leds integrados en estos actuadores titilan dos veces confirmando una conexión correcta.

El controlador principal se comunica con las unidades Dynamixel enviando y recibiendo paquetes de datos, figura 3.30. Hay dos tipos de paquetes; el "Paquete de instrucciones" (enviado desde el controlador principal a los actuadores Dynamixel) y el "paquete de estado" (enviado desde los actuadores Dynamixel al controlador principal).

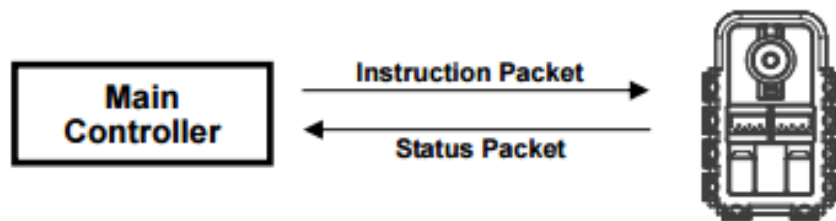


Figura 3. 30 Verificación de conexión al controlador

Fuente: http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/dxl_ax_main.htm

Para la conexión del sistema, que se muestra en la figura 3.31, si el controlador principal envía un paquete de instrucciones con el ID establecido en N, sólo la unidad Dynamixel con este valor de ID retorna su condición y ejecuta la instrucción requerida.

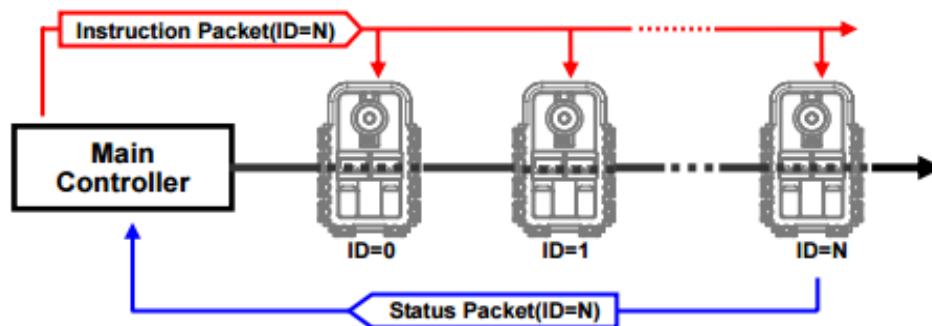


Figura 3. 31 Envío y recepción de datos para cada ID de la red de actuadores

Fuente: http://support.robotis.com/en/product/dynamixel/dxl_ax_main.htm

Por lo tanto al tener varias unidades Dynamixel que tienen el mismo valor de ID, múltiples paquetes enviados colisionan de forma simultánea, lo que resulta en problemas de comunicación. Con lo que es importante que ninguna unidad Dynamixel comparta el mismo ID de un mismo nodo de red. Los actuadores Dynamixel se comunican a través de comunicación en serie asíncrona de 8 bits de datos, 1 bit de

parada y sin paridad. La Serie de instrucciones es el paquete enviado por el controlador principal para las unidades Dynamixel para enviar los comandos. La estructura del paquete de instrucciones se muestra en la figura 3.32.

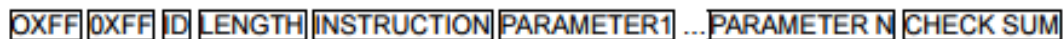


Figura 3. 32 Estructura del paquete de instrucciones para motores Dynamixel AX-12A

Donde:

0Xff	0xFF	Los dos bytes 0xFF indican el inicio de un paquete entrante.
ID		Es el identificador único de una unidad Dynamixel. Hay 254 valores de ID disponibles, que van desde 0X00 al 0xFD.
NOTA		El ID 0xFE es el ID que indica todas las unidades Dynamixel conectadas. Los paquetes enviados con este ID se aplican a todas las unidades Dynamixel en la red.
LENGHT		La longitud del paquete, donde su valor es "Número de parámetros (N) + 2"
INSTRUCTION		La instrucción a realizar del actuador Dynamixel.
PARAMETER0...N		Se utiliza si hay información adicional necesaria para ser enviados aparte de la propia instrucción.
CHECKSUM		El método de cálculo para el "Check Sum" es como se muestra a continuación: $\text{Check Sum} = \sim (\text{ID} + \text{LENGHT} + \text{INSTRUCTION} + \text{PARAMETER1} + \dots + \text{PARAMETER N})$

Si el valor calculado es mayor que 255, el byte inferior se define como la suma de comprobación.

~ Representa la operación lógica NOT.

3.2.1.5. Control del brazo robótico

Para simular el comportamiento del sistema, se utiliza un complemento de Matlab R2013b con ayuda del Simulink. Este complemento está diseñado para un manipulador robótico de 4 DOF. El diagrama de bloques del sistema se muestra en la figura 3.33.

Dentro de la planta, (brazo robótico), se encuentran divididas dos áreas principales. La electrónica y la mecánica. La electrónica se basa en un modelo de 4 servomotores como se va a utilizar en el diseño propuesto. Cada motor dentro del sistema es manejado de forma individual, por lo que se requiere una señal por cada actuador como se muestra en la figura 3.34, cada actuador está conectado a su respectiva articulación dentro del sistema mecánico.

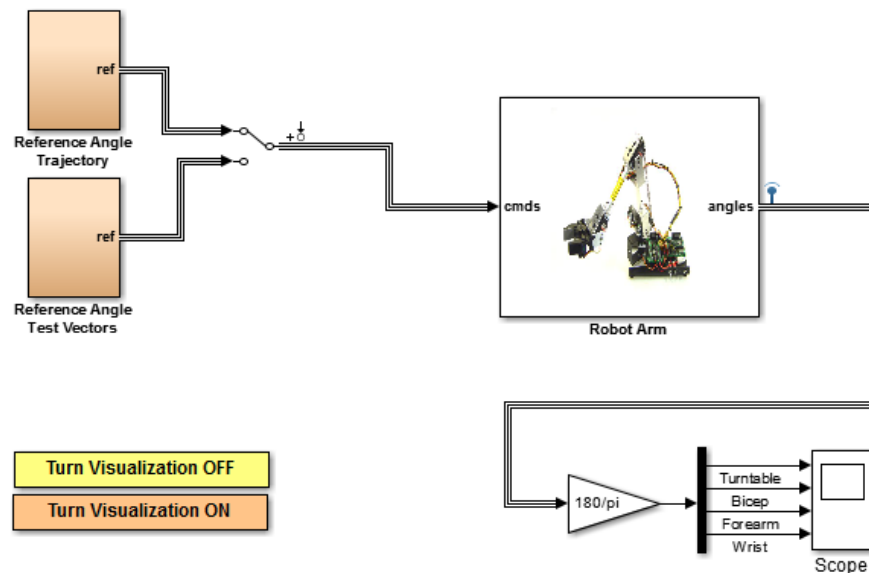


Figura 3. 33 Sistema sin control en Matlab R2013b

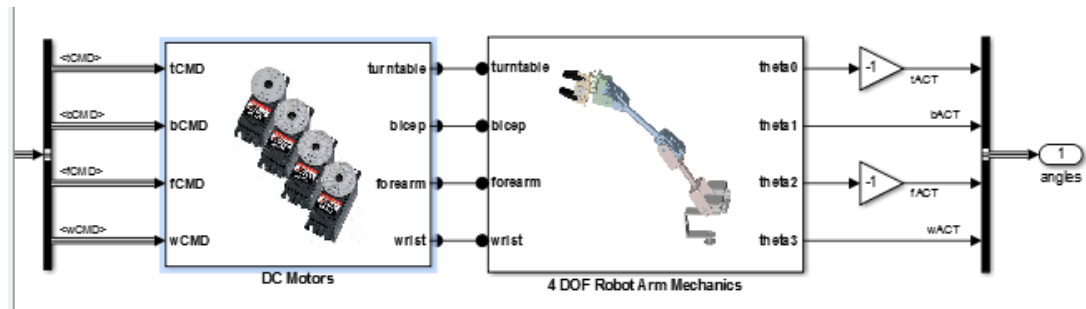


Figura 3. 34 Planta del sistema en Matlab

La figura 3.35, representa el comportamiento mecánico para la simulación, posee la siguiente configuración. Donde se representa cada eslabón como un sistema sólido, donde se configura la inercia del cuerpo para esa pieza. Cada articulación se conecta a su respectivo servomotor con la función “revolute”. Este bloque está conectado a su siguiente eslabón y así sucesivamente hasta llegar al efector final que también se lo representa como un sistema sólido. Los primeros dos bloques de la izquierda de la figura 3.35, “RootGround”, “Weld”, representan el anclaje a tierra del brazo robótico, el bloque “RigidSubsystem1” permite la unión de este anclaje con las partes móviles del brazo robótico.

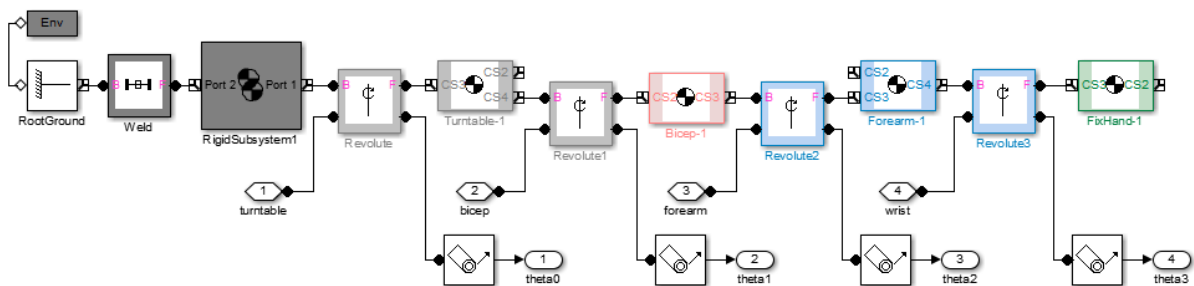


Figura 3. 35 Configuración mecánica en Simulink

Los resultados obtenidos del sistema no controlado para cada articulación empezando desde la base, brazo, antebrazo y muñeca se muestran en la figura 3.36 donde se puede observar que no se tiene estabilidad en tres de las cuatro articulaciones del robot. Para cada articulación se evaluó con ángulos de 60, 45, 50, 90 grados respectivamente. La respuesta obtenida para la base y el antebrazo muestra un sistema amortiguado donde se encontraran oscilaciones para cada cambio de posición que se realice.

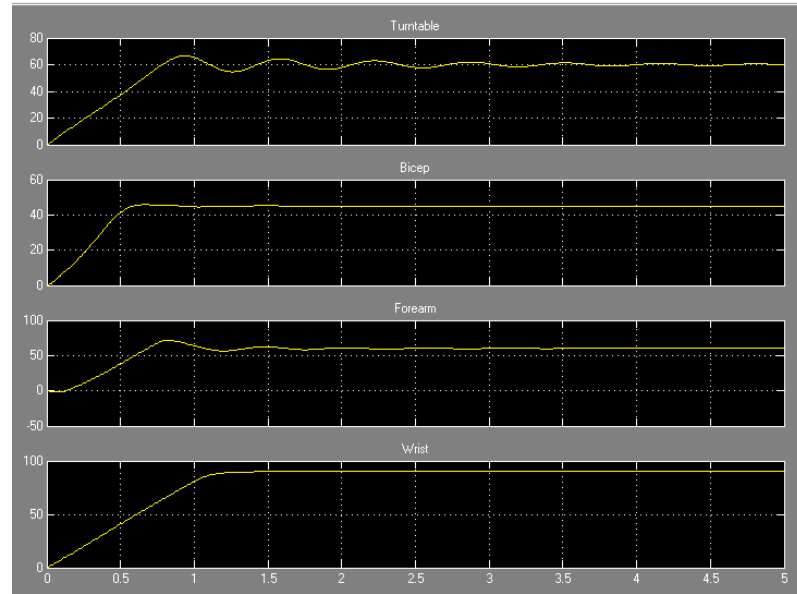


Figura 3. 36 Respuesta de ángulos de los actuadores vs tiempo. (5 segundos)

Con la implementación de un sistema de control a lazo cerrado a la planta, figura 3.37, se busca una respuesta estable de los actuadores según el ángulo establecido. Un control individual por cada actuador permite la disminución de las oscilaciones que tiene cada articulación con la ayuda de distintas ganancias K_p , K_i , K_d según sea el caso.

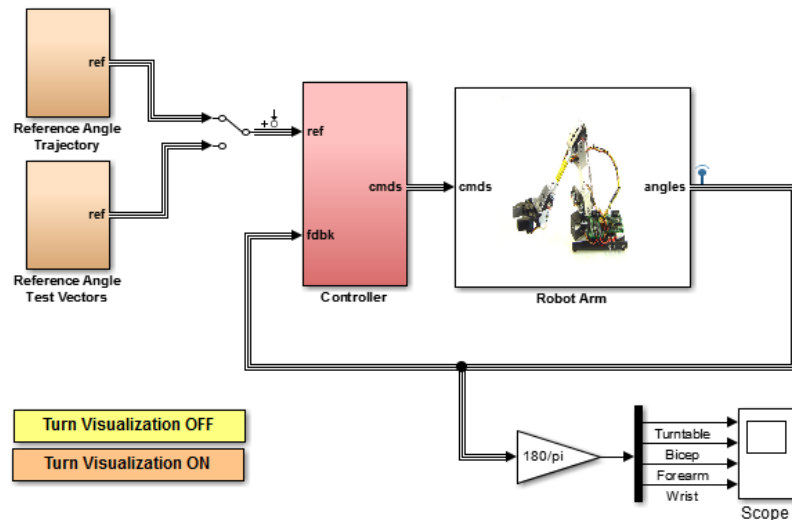


Figura 3. 37 Sistema con control de lazo cerrado en Matlab

Dentro del bloque de control, figura 3.38, se tiene un control a lazo cerrado por cada actuador, tabla 3.9, teniendo como entrada una función paso con amplitud del ángulo

deseado por actuador, y la señal de realimentación del estado actual de los servomotores por cada eslabón.

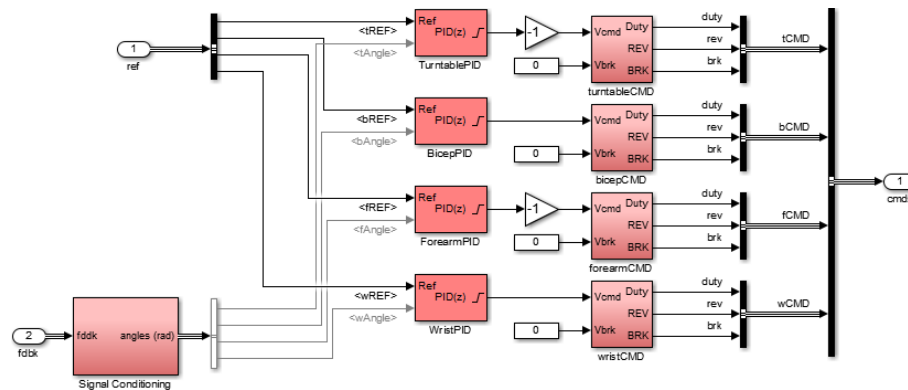


Figura 3. 38 Módulo de control lazo cerrado en Simulink

Tabla 3. 9 Constantes del control a lazo cerrado en módulo de Simulink

Eslabón	Control	P	I	D
Turntable (base)	PI	20.83	30.78	-
Bicep (antebrazo)	PI	40.97	20.56	-
Forearm (brazo)	PID	30.27	70.016	2.10
Wrist (muñeca)	PID	28.82	4.29	0.19

Para una misma señal de excitación en cada actuador, se vuelve a realizar la misma prueba al sistema, pero ahora este con el sistema de control incorporado. Se tienen los resultados que se muestran en la figura 3.39, donde se ve que el control eliminó las oscilaciones de los actuadores en estado transitorio, llegando así a su estado permanente de la manera más estable.

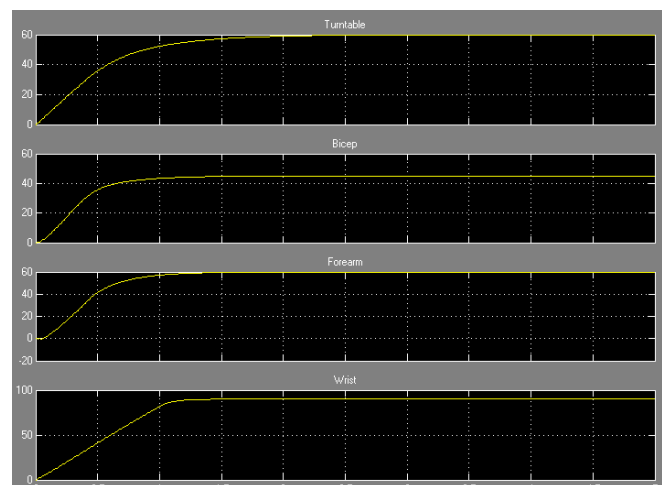


Figura 3. 39 Respuesta de ángulos de los actuadores vs tiempo con control. (5 segundos)

Se entiende entonces, de la figura 3.40, que la variación del ángulo con respecto al tiempo es mucho más estable y las oscilaciones se eliminan. Se puede apreciar que el actuador de la base, por ejemplo, mantiene una velocidad constante hasta que llega a 40 grados, es decir el 67% de la posición final, donde reduce su velocidad paulatinamente hasta que llega a su estado meta, este valor es tomado en cuenta para la configuración de los servomotores Dynamixel y así disminuir el comportamiento amortiguado frente a un movimiento.

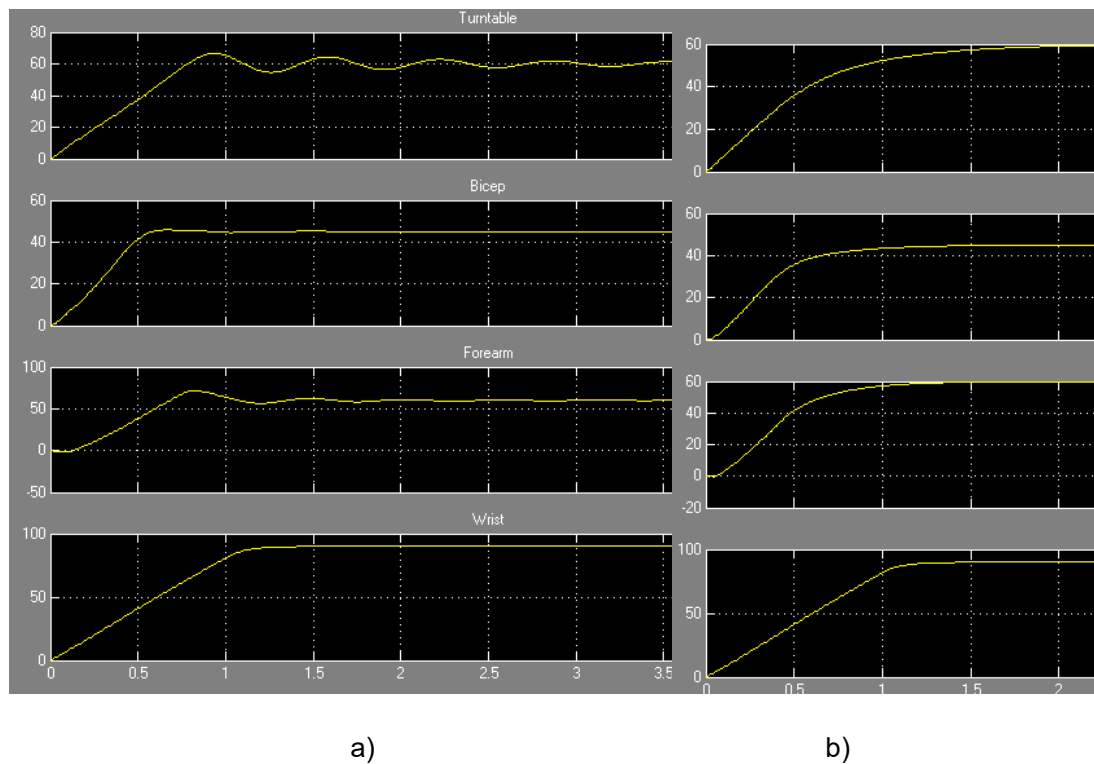


Figura 3. 40 a) Respuesta de actuadores sin control en simulación. b) Respuesta de actuadores control en simulación

La implementación de un control punto a punto, permite una interacción más cercana con los alrededores del manipulador. Para el proyecto, el saber la posición exacta de la cámara de luz como también de la posición de las placas que se están evaluando dentro de la cámara, ayuda para colocar el efector final en la posición correcta, grabando los ángulos de cada uno de los actuadores para cada una de las posiciones que se desean repetir. El proceso para grabar los ángulos de cada posición se muestra en la figura 3.41.

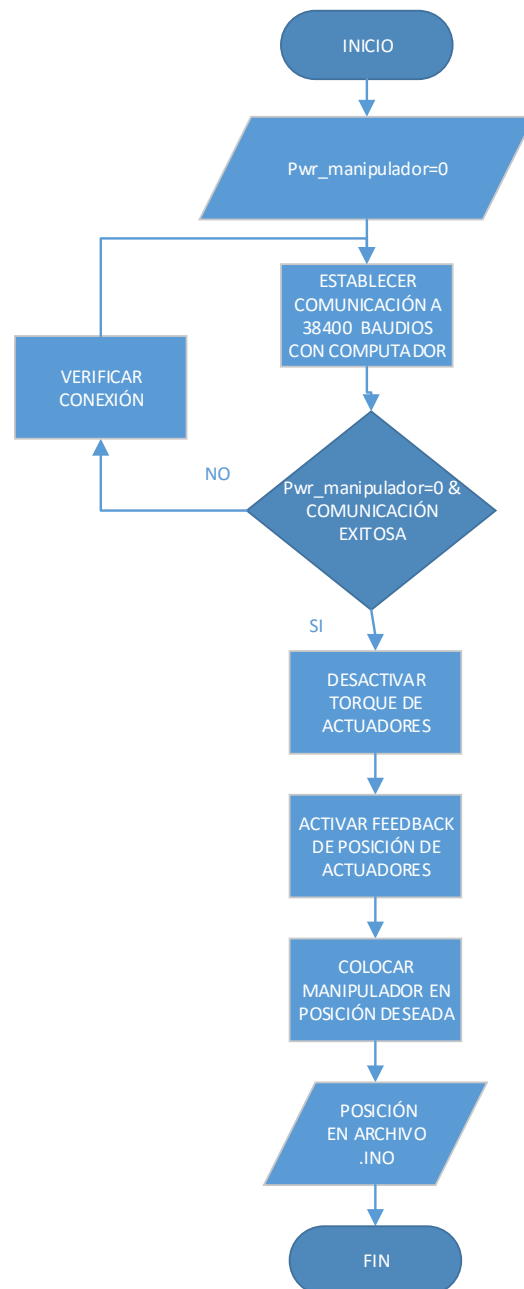


Figura 3. 41 Diagrama de flujo para grabar ángulos para cada posición del manipulador

Se estableció una comunicación RS232 entre la placa de control del manipulador y el computador, a una velocidad de 38400 Baudios. El manipulador tiene pregrabadas tres posiciones, clasificadas en el programa de la siguiente manera:

- Reposo

El manipulador se coloca en una posición de espera, esta es la posición de inicio de la rutina. Una vez iniciado el programa de control de calidad de sueldas, el brazo robótico se colocará en esta posición a la espera de una nueva orden.

- Aceptar

Partiendo de la posición de reposo, el manipulador se ubica en la posición necesaria para extraer la placa electrónica del punto de prueba, y llevarla a un compartimento en el cual se encuentren todas las placas aceptadas. Una vez que el manipulador coloque esta placa aceptada en el compartimento, vuelve a la posición de reposo.

- Rechazar

Partiendo de la posición de reposo, el manipulador se ubica en la posición necesaria para extraer la placa electrónica del punto de prueba, y llevarla a un compartimento en el cual se encuentren todas las placas rechazadas. Una vez que el manipulador coloque esta placa rechazada en el compartimento, vuelve a la posición de reposo.

3.2.1.6. Diseño del reporte

La necesidad de un reporte dinámico para esta aplicación es indispensable ya que el número de sueldas en cada placa varía, y más aún, el número de sueldas que no cumplen con los parámetros de calidad establecidos. Por esta razón, la implementación de un reporte capaz de mostrar los diferentes errores de suelda en cada placa electrónica debe de tener una comunicación directa con los resultados que arroje el software de control de calidad implementado. Con el uso de la librería docx que ofrece Python, es posible la creación de documentos de texto en el formato .doc a través de este lenguaje de alto nivel. El reporte consta de 3 partes:

- Encabezado
- Información general de los errores encontrados
- Información detallada de cada suelda que no cumplió con los estándares de calidad establecidos.

El diagrama ado para la obtención de este reporte dinámico se muestra en la figura 3.42.

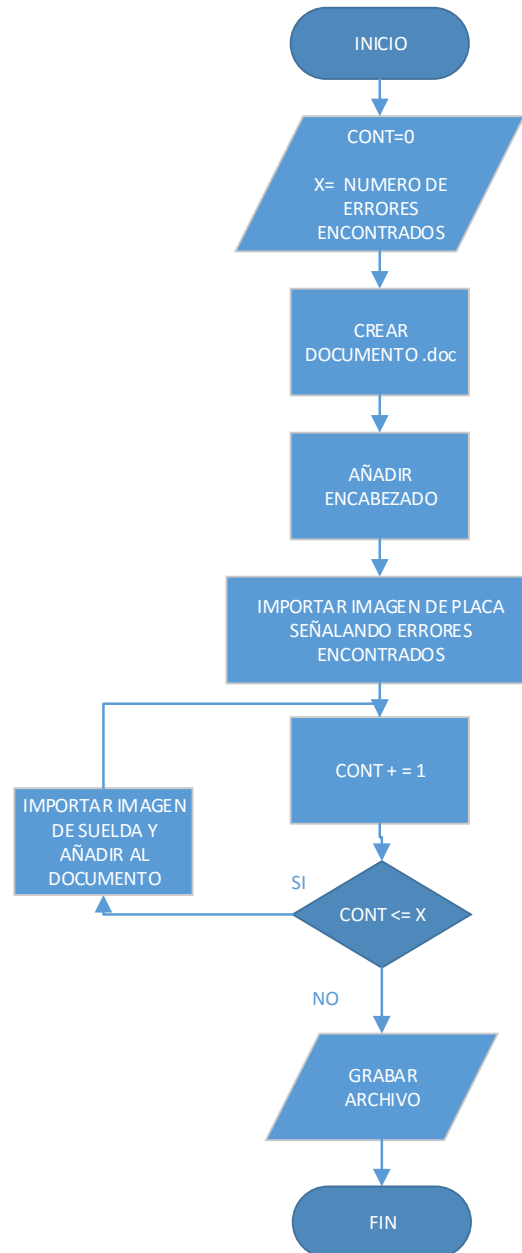


Figura 3. 42 Diagrama de flujo para obtención de reporte de soldaduras defectuosas en PCB

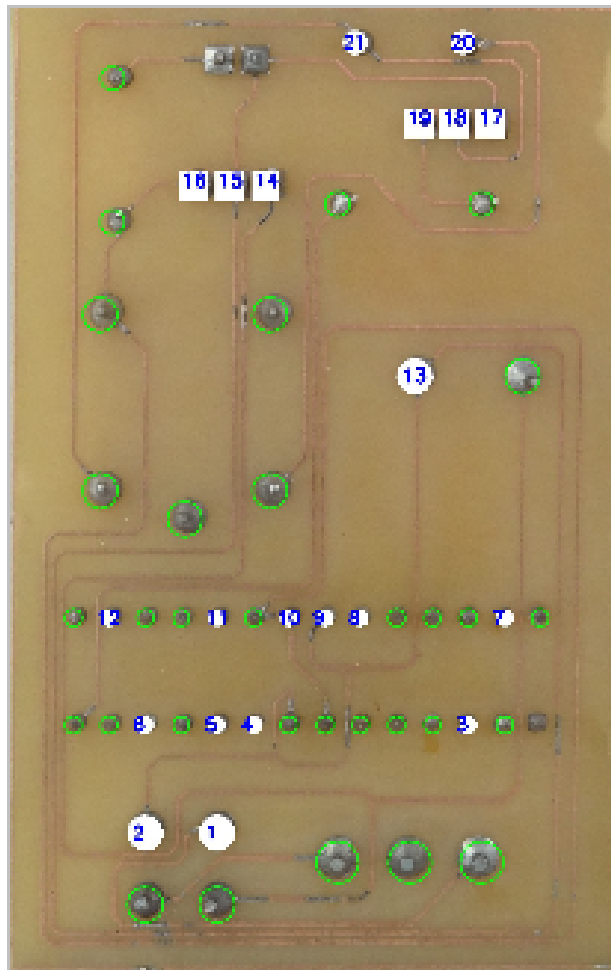
El diseño y partes del reporte se las puede apreciar en la figura 3.43, en la cual se muestra todas las partes del documento, en la primera hoja se tiene datos de creación del documento y descripción general de cada uno de los puntos de suelda dentro de la placa electrónica, en la segunda hoja se muestran los detalles de cada uno de los errores encontrados por el programa.

CREADO: 2013-12-23 23:15:00

REPORTE DE FALLA EN SUELDA DE PLACA ELECTRONICA

El programa ha detectado 21 fallas dentro de la placa sometida a prueba. A continuacion se numeran los errores encontrados

Descripcion de errores en suelda



a)



b)

Figura 3. 43 a) Reporte general en caso de falla en placa electrónica generado por el sistema de control de calidad. b) Especificaciones de error en cada punto de suelda no aceptado por el sistema de control de calidad

3.2.1.7. Dimensionamiento eléctrico y conexiones

La parte eléctrica del proyecto consta de los siguientes componentes:

- Servomotores Dynamixel AX12 A
- Controlador

- Botón de paro de emergencia
- Lámparas voltech 8W

El diseño del manipulador angular consta de 7 servomotores Dynamixel AX12A, cada uno con un consumo promedio de 500mA, por lo tanto:

$$I_s = I \times N$$

Donde:

I_s = Corriente de servomotores

I = Consumo servomotores Dynamixel AX12A

N = Número de servomotores en el brazo robótico

$$I_s = 500 \text{ mA} * 7 = 3.5 \text{ A}$$

Entonces:

$$I_t = I_s + I_c$$

Donde:

I_t = Corriente total del brazo robótico

I_s = Corriente de servomotores

I_c = Corriente del control

$$I_t = 3.5 \text{ A} + 200 \text{ mA}$$

$$I_t = 3.7 \text{ A}$$

Por motivos de seguridad y para garantizar el correcto funcionamiento del prototipo, se implementa una fuente de 12 voltios a 5 amperios.

El conexionado será en cadena margarita, con lo que su configuración recomendada de conexionado de los servos dentro de la estructura se muestra en la figura 3.44.

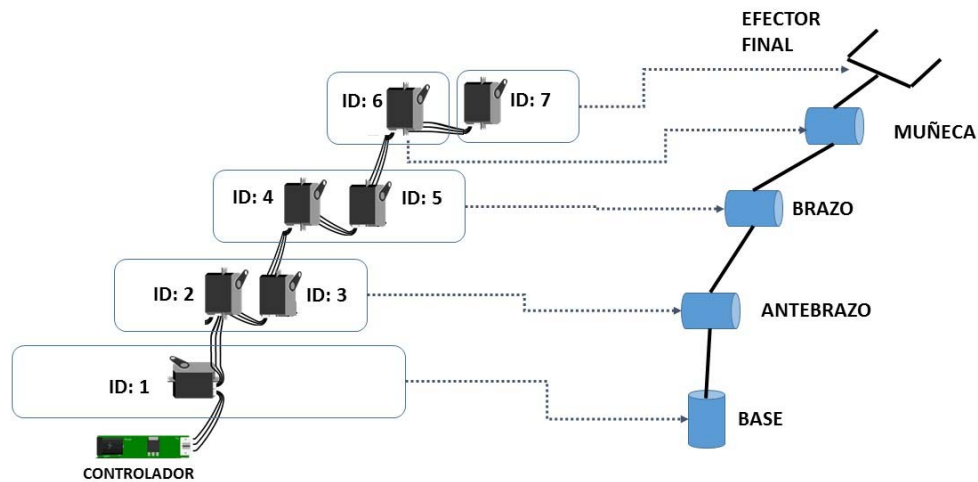


Figura 3. 44 Identificador de ID de cada actuador para todas las articulaciones del manipulador

Teniendo en cuenta el diseño mecánico de la estructura del manipulador, la corriente de trabajo y los componentes existentes en el mercado, para la optimización de los costos, el cableado dentro del manipulador se lo establece de la siguiente manera. El inter conexionado dentro del manipulador, estará con cables compatibles con los requerimientos de los actuadores usados:

Tabla 3. 9 Longitud de cables para conexión de actuadores dentro del manipulador

Conexión entre actuador:	Longitud de cable (mm)
Controlador - ID1	100
ID1 – ID2	100
ID2 – ID3	60
ID3 – ID4	200
ID4 – ID5	60
ID5 – ID6	100
ID6 – ID7	60

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

4.1. PRUEBAS DE TRACCIÓN A LAS PROBETAS DE PLA

Para obtener valores más aproximados en las simulaciones, se realizaron pruebas de tracción según la norma ASTM 638. Esta prueba se la realizó en el laboratorio de nuevos materiales de la Escuela Politécnica Nacional en una máquina de ensayos universal marca TINIUS OLSEN serie número H25K-S, figura 4.1, la cual se conecta mediante un software al computador y tiene una capacidad máxima de 25KN.



Figura 4. 1 Máquina de Ensayos Universales TINIUS OLSEN

En la tabla 4.1 se muestran las características técnicas para la máquina de ensayos universales utilizada.

Tabla 4. 1 Características Técnicas de la Máquina de Ensayos Universales

Marca	TINIUS OLSEN
Número de serie	H25K-S
Capacidad máxima	25 KN
Voltaje de alimentación	220 V
Asistencia	Computador

La norma ASTM D638 sección 14 da los estándares de pruebas para obtener propiedades de plásticos sometidos a tensión, donde se encuentran las medidas de los especímenes puestos a prueba. En la figura 4.2, se muestran las dimensiones que establece esta norma para las probetas, con un espesor de 5 mm.

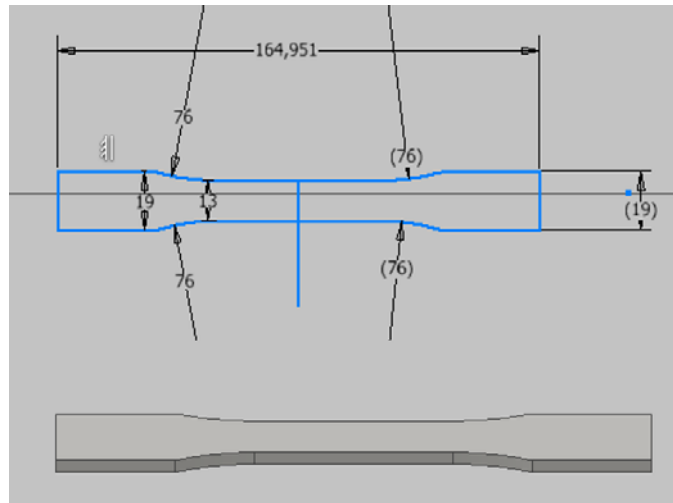


Figura 4. 2 Dimensiones de Probetas según Norma ASTM D 638 - 14

Ya que esta pieza y las diseñadas para el manipulador son fabricadas con ayuda de una impresora 3D a partir de PLA en hilo, se establecieron los parámetros de impresión que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Parámetros de impresión

Acabado	Estándar
Tipo de mallado	Diagonal (Línea a 45 grados)
Relleno	40%
Temperatura del extrusor	200
Impresora 3D	Dremel 3D printer

Se tomó estos valores después de analizar varios estudios realizados detalladamente con probetas de PLA fabricadas por impresoras 3D.^{6 7 8}

⁶ <http://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>

⁷ A. Albuquerque, "Optimización y Caracterización de Piezas de PLA Fabricadas Mediante Técnicas Aditivas", proyecto grado, dept.Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2014.

⁸ B.M. Tymrak, M. Kreiger, J. M. Pearce, Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, Materials & Design, 58, pp. 242-246 (2014).

En la figura 4.3, se muestran las probetas impresas utilizadas para realizar los ensayos.



Figura 4. 3 Probetas Fabricadas

4.1.1. RESULTADOS OBTENIDOS LUEGO DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

Ya que se realizó un ensayo destructivo, se aplicó una fuerza hasta que se rompan las 5 probetas a una velocidad constante de 5 mm/min, como señala la norma, teniendo como resultado las curvas de esfuerzo deformación de cada una de las probetas. En el Anexo E se encuentra el informe detallado de la prueba realizada. A continuación, en la tabla 4.3 se muestran los valores obtenidos para las 7 probetas, de las cuales dos fueron descartadas para obtener mejores resultados.

Tabla 4. 3 Resistencia a la Fluencia, Deformación y Módulo de elasticidad para las probetas de PLA con mallado lineal

ENSAYO DE TRACCIÓN ASTM D638-15							
Muestra No.	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm ²)	Carga última (N)	Resistencia última (MPa)	Módulo tangente (MPa)	Deformación a la rotura (%)
1	13,00	5,58	72,54	917,0	12,70	2210	1,11
2	13,00	5,55	72,15	952,0	13,20	2160	1,07
3	13,00	5,76	74,88	1230,0	16,40	2330	1,47
4	13,00	5,81	75,53	1230,0	16,30	2750	1,23
5	12,99	5,77	74,95	1258,0	16,79	2250	1,26
6	13,05	5,49	71,64	919,9	12,84	1504	0,89
7	12,95	5,83	75,50	1199,0	15,88	1437	1,43
Promedio $\bar{x}$				1106,2	14,92	2036	1,22
Desviación estándar $S_{(n-1)}$				156,3	1,75	560	0,24
Coeficiente de variación CV				14,1	11,75	27	20,03

** Nota: Muestras resaltadas (1,5) fueron excluidas del estudio

Con lo que se agregan el valor de 14.9 MPa al programa Inventor 2016 versión estudiantil en el módulo de CAE al material PLA, confirmando ya que estos valores son lo más próximos posibles a la realidad.

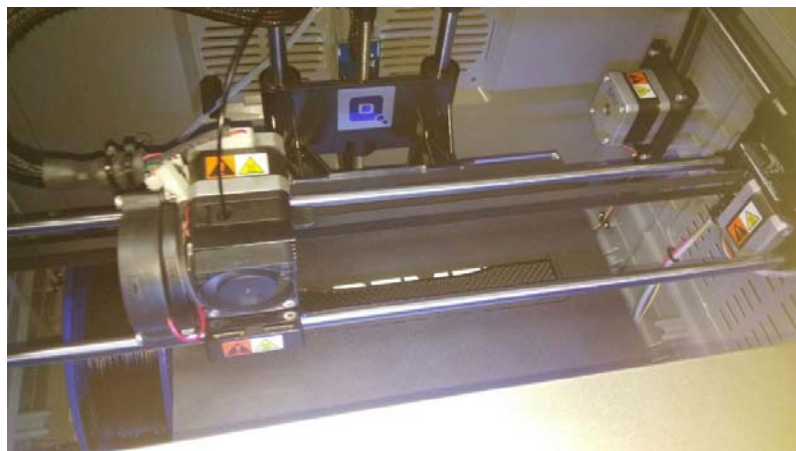
Cada una de las probetas tomadas en la muestra del estudio, se muestran en la figura 4.4.



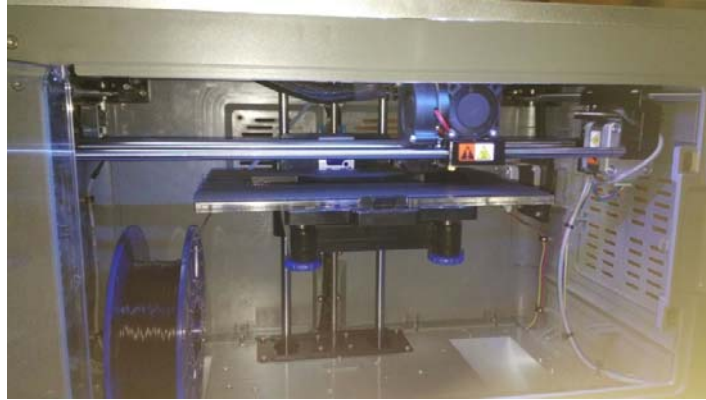
Figura 4. 4 Probetas sometidas a prueba de tracción

4.2. PROCESO DE CONTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

El primer elemento construido, fueron las probetas con especificaciones de la norma ASTM D638. En la figura 4.5, se muestra el mallado interno de las piezas así como su proceso de impresión.



a)



b)



c)

Figura 4. 5 Impresión 3D de probetas según ASTM D638. a) Impresora 3D estableciendo área de trabajo. b) Impresión de primera capa en PLA. c) Configuración de la impresora

Terminado el diseño, se procede a realizar los planos. Una vez establecidos los materiales necesarios, se realizó la compra de los mismos y se empezó la impresión y corte de las piezas diseñadas. Obtenidos los valores requeridos de la prueba a tracción, implementados en el software de simulación, simuladas las piezas y cumpliendo con los requerimientos mínimos, se procedió a la impresión de la junta del antebrazo y brazo en 3D como se muestra en la figura 4.6, tomando en cuenta que los parámetros de impresión son los mismos que el de las probetas impresas anteriormente.

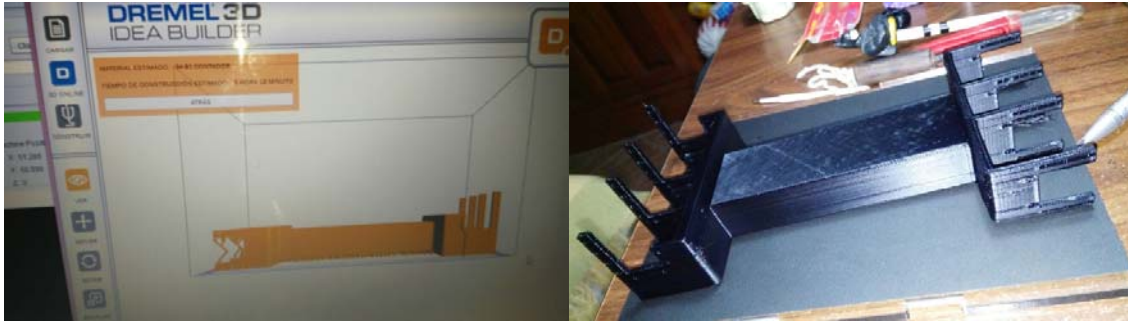


Figura 4. 6 Proceso de impresión en 3D de pieza antebrazo en PLA

Se hicieron los cortes en láser de las piezas de la base de acuerdo al plano del anexo D. (Figura 4.7)



Figura 4. 7 Corte láser de piezas de la base en MDF

Se incorpora a la cámara de luz fabricada las lámparas con focos fluorescentes lineales y se realizaron perforaciones para las sujeciones del manipulador en la base de toda la estructura. (Figura 4.8)



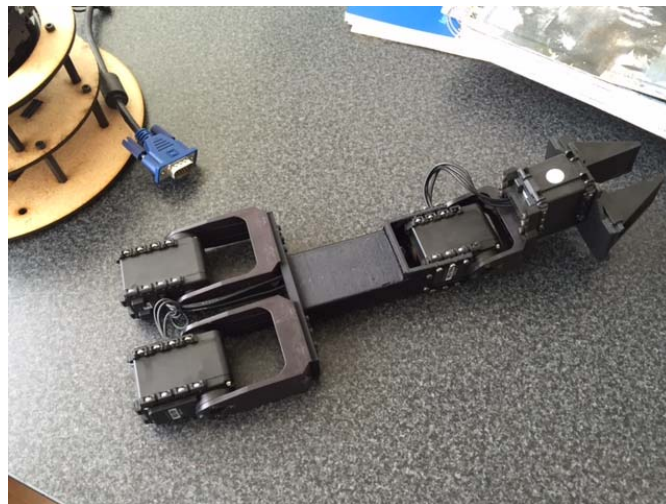
a)

b)

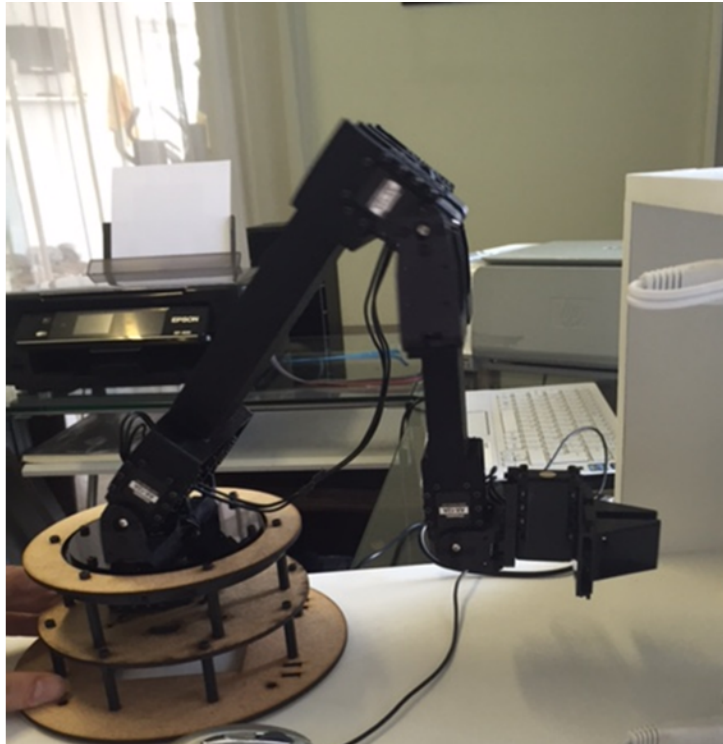


c)

Figura 4. 8 Cámara de luz con iluminación difusa. a) Vista superior. b) Vista frontal. c) Vista lateral
En la figura 4.9, se muestra el resultado final tras armar la estructura del manipulador robótico.



a)



b)

Figura 4. 9 a) Brazo y efector final del manipulador robótico armado. b) Manipulador robótico ensamblado

Finalmente, se ensamblan todas las piezas del sistema de control de calidad obteniendo el prototipo final, figura 4.10.



Figura 4. 10 Sistema de control de calidad

4.3. PROTOCOLO DE PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para la verificación del sistema se diseñó y construyó un total de 9 placas de circuito impreso. Estas placas llevan los elementos más usados por los estudiantes de la Universidad Internacional del Ecuador como son: resistencias, circuitos integrados, borneras, transistores, puente de diodos, diodos, relés, entre otros. Estas 9 placas se las dividió en 3 grupos de la siguiente manera, y cada grupo tiene un total de 3 placas del mismo tipo, figura 4.11, 4.12, 4.13:

- Prueba Control Calidad

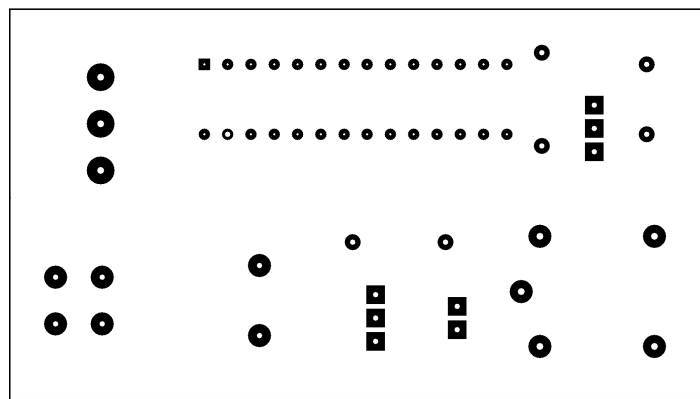


Figura 4. 11 Diseño placa archivo prueba control calidad

- Prueba Control Calidad 1

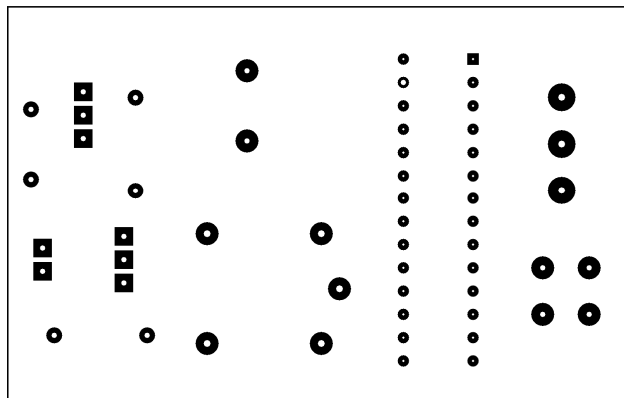


Figura 4. 12 Diseño placa archivo prueba control calidad 1

- Prueba Control Calidad 2

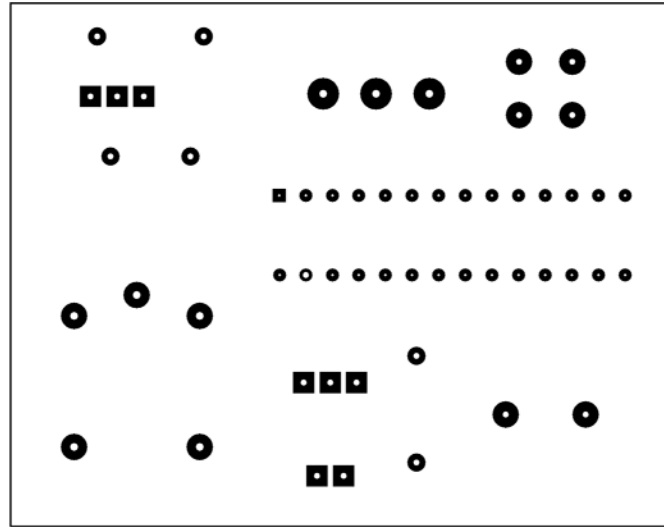


Figura 4. 13 Diseño placa archivo prueba control calidad 2

Las placas del archivo “Prueba Control Calidad 2” tienen las siguientes características:

PLACA1.- La parte del borde de la placa está cortada 2mm menos de lo indicado en el esquema del diseño.

PLACA2.- La parte del borde de la placa está cortada 4mm más de lo indicado en el esquema del diseño.

PLACA3.- La parte del borde de la placa está cortada tal como está indicado en el esquema

Para estas 3 placas solamente se soldó el 50% de las sueldas disponibles en la placa de circuito impreso, esto con el fin de comprobar que tanto el algoritmo de visión artificial es afectado con el cambio de la medida del borde de la placa.

Las placas del archivo “Prueba Control Calidad 1” poseen las siguientes características:

PLACA 1, 2, 3 Tiene todas las sueldas correctas y el borde de la placa está cortado tal como está indicado en el esquema, esto con el fin de identificar las falencias del algoritmo en placas supuestamente fabricadas al 100%.

Por último, las placas del archivo “Prueba Control Calidad” tienen las siguientes características:

PLACA1- Aproximadamente el 25% de sueldas de elementos de toda la placa deben estar correctas (las demás sueldas tienen defectos tales como: falta de suelda, poca suelda o mucha suelda) y el borde de la placa está tal como está indicado en el esquema.

PLACA2- Aproximadamente el 50% de sueldas de elementos de toda la placa están correctas (las demás sueldas tienen defectos tales como: falta de suelda, poca suelda o mucha suelda) y el borde de la placa está tal como está indicado en el esquema.

PLACA3- Aproximadamente el 75% de sueldas de elementos de toda la están correctas (las demás sueldas tienen defectos tales como: falta de suelda, poca suelda o mucha suelda) y el borde de la placa está tal como está indicado en el esquema.

4.3.1. DETECCIÓN DE POSICIONES DE SUELDAS EN EL DISEÑO DE LA PLACA

En este proceso se alcanzó el 100% de reconocimiento de las sueldas dentro de la imagen del diseño de la placa. Para esto, es indispensable la identificación del borde como primer paso, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.14, donde el borde es identificado con una línea de color verde.

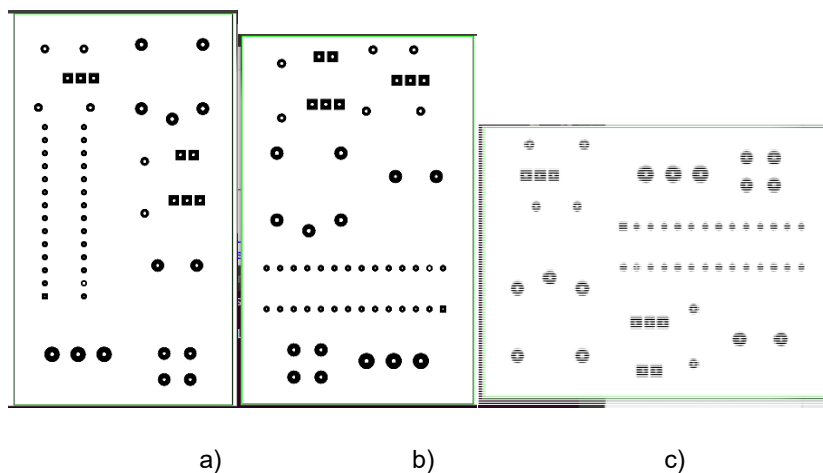


Figura 4. 14 Detección de borde en diseño de archivos a) "Prueba Control Calidad", b) "Prueba Control Calidad 1", c) "Prueba Control Calidad 2" puestos a prueba

En la figura 4.15, se muestra la identificación y clasificación de las sueldas encontradas dentro de la imagen. En color rojo se señalan las sueldas circulares encontradas, mientras que de color amarillo se señalan las sueldas cuadradas. En las pruebas realizadas no se encontraron factores que alteren el resultado obtenido por el algoritmo implementado.

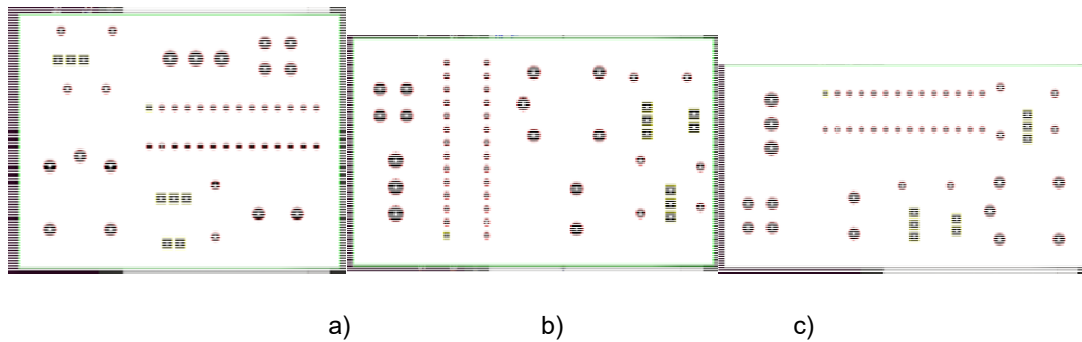
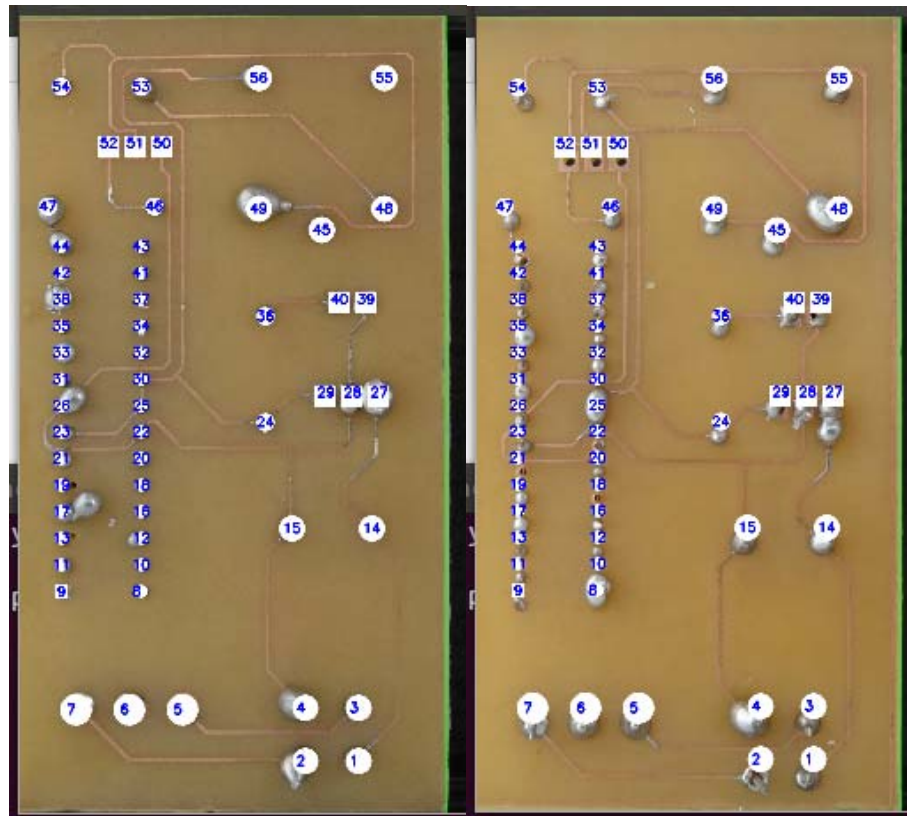


Figura 4. 15 Detección de sueldas en imágenes obtenidas de Ares de archivos a) “Prueba Control Calidad”, b) “Prueba Control Calidad 1”, c) “Prueba Control Calidad 2” puestos a prueba

4.3.2. COMPARACIÓN POSICIONES DE SOLDADURA EN EL DISEÑO DE LA PLACA CON LA FABRICADA

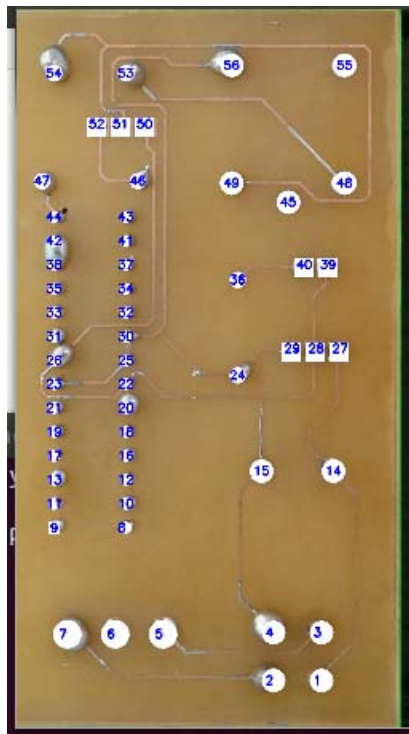
Con las posiciones obtenidas de cada una de las sueldas dentro del diseño, se procede a sobre poner la imagen real del circuito impreso en la del diseño para empezar a trabajar en la imagen real. Para esta prueba, se señaló de blanco las posiciones de las soldaduras que buscará el algoritmo, con esto se puede establecer que tan cerca o lejos el sistema identifica cada una de las sueldas disponibles en la placa de circuito impreso. Se puede ver entonces que para el primer grupo (Prueba control calidad), a pesar que se estableció que los bordes serían de las mismas dimensiones que en el diseño, en la figura 4.16 b, se tiene un error de fabricación de aproximadamente 1mm de lo que es el borde del diseño y lo real, por lo que se puede apreciar un ligero desplazamiento de las sueldas hacia arriba. En cuanto a las demás muestras, figura 4.16 a, c, se muestra la efectividad del método usado identificando las posiciones de cada suelda dentro de la placa.

Para placas que estén fabricadas de acuerdo a lo señalado en el diseño, figura 4.17, se muestra que los resultados obtenidos por el método usado se ajustan a las necesidades, permitiendo que el sistema de control de calidad entregue resultados precisos, o que en caso de que la placa sea usada para el enriquecimiento de la base del conocimiento implementada, las imágenes añadidas a la misma den ejemplos de sueldas correctas. Para el tercer grupo (Prueba control calidad2), figura 4.18 se puede apreciar que para placas con un error mayor a 2 mm en la dimensión del borde de la placa a lo establecido en el diseño, el sistema no verifica las sueldas haciendo imposible que se entreguen resultados de error de suelda en esas placas o entregando resultados erróneos.



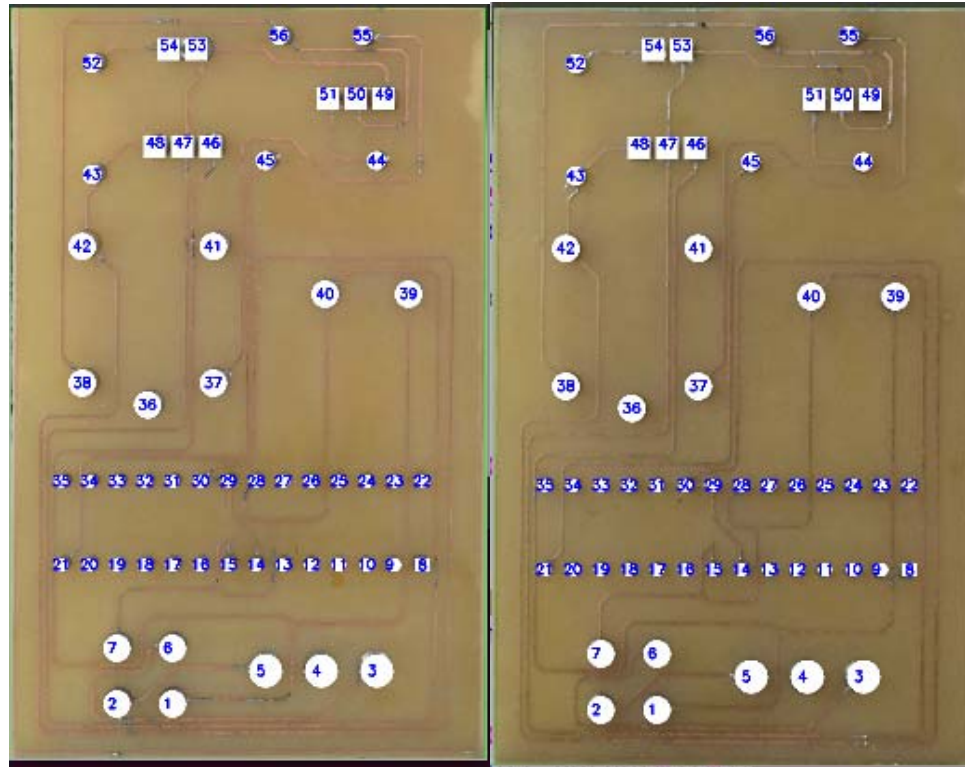
a)

b)



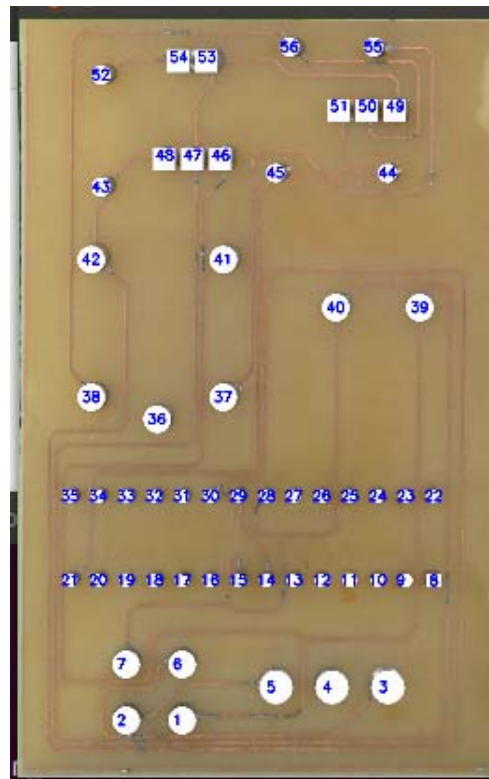
c)

Figura 4. 16 Detección de posición de soldas en placa de circuito impreso grupo "Prueba Control Calidad". a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3



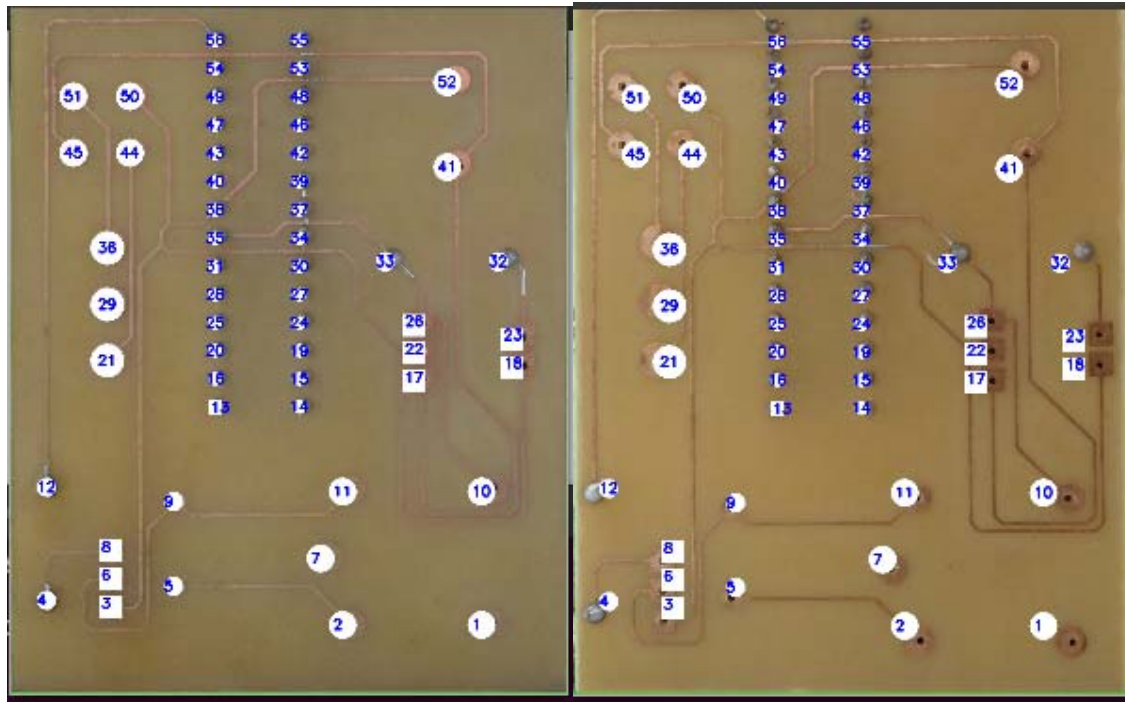
a)

b)



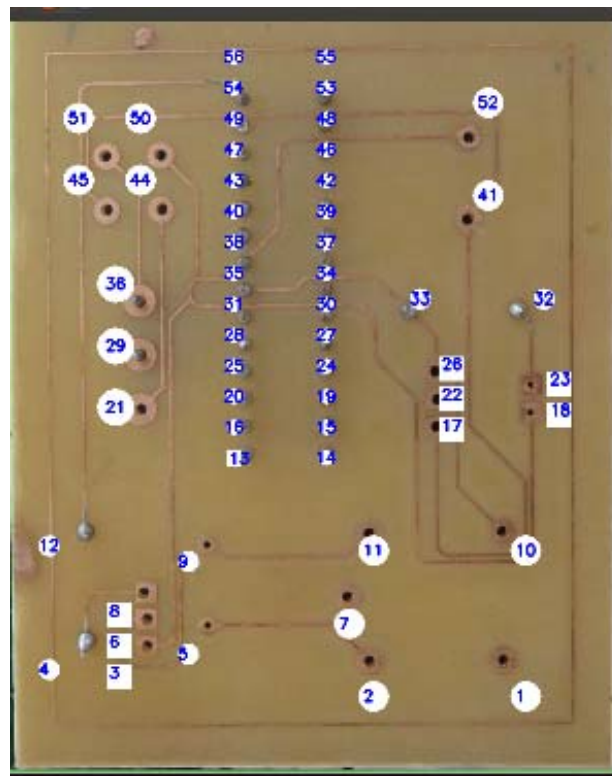
c)

Figura 4. 17 Detección de posición de soldas en placa de circuito impreso grupo "Prueba Control Calidad 1". a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3



a)

b)



c)

Figura 4. 18 Detección de posición de soldas en placa de circuito impreso grupo "Prueba Control Calidad 2". a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3

4.3.3. VERACIDAD DEL EQUIPO

En las pruebas realizadas para la detección de errores en placas de circuito impreso, con una base de datos de 70 y 17 ejemplos de sueldas correctas circulares y cuadradas respectivamente, se obtiene los resultados que se muestran en las figuras 4.19, 4.20 y 4.21. Estas pruebas fueron realizadas sin la necesidad de la iluminación incorporada en la cámara de luz. En la tabla 4.4 se resumen los valores obtenidos para las placas electrónicas mostradas en la figura 4.19. Dentro de esta primera prueba de tres, se logró una efectividad de reconocimiento de errores de 80%. Esta efectividad está basada en cuantas sueldas se reconoció la calidad de manera correcta, ya que se encontró que el algoritmo detecta falsos negativos, pasando ciertas sueldas con errores como buenos o viceversa.

Tabla 4. 4 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad)

Muestra Nro.	Número de experimentos	Nro. Errores reales (observación visual)	Nro. Errores encontrados	Nro. De errores del sistema
1	15	30	31	7
2	15	33	24	11
3	15	35	37	9
EFFECTIVIDAD		80.35 %		

A pesar que se especificó que para el segundo grupo de placas electrónicas, todas las soldaduras se encuentren al 100%, no sucedió lo establecido, se encontraron visualmente un número de errores bajo en las placas electrónicas, de igual manera lo hizo el sistema de control de calidad identificando de igual forma falsos negativos, obteniendo una efectividad del 82%, tabla 4.5.

Tabla 4. 5 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad 1)

Muestra Nro.	Número de experimentos	Nro. Errores reales (observación visual)	Nro. Errores encontrados	Nro. De errores del sistema
1	15	0	3	3
2	15	9	17	8
3	15	10	21	10
EFFECTIVIDAD		82 %		

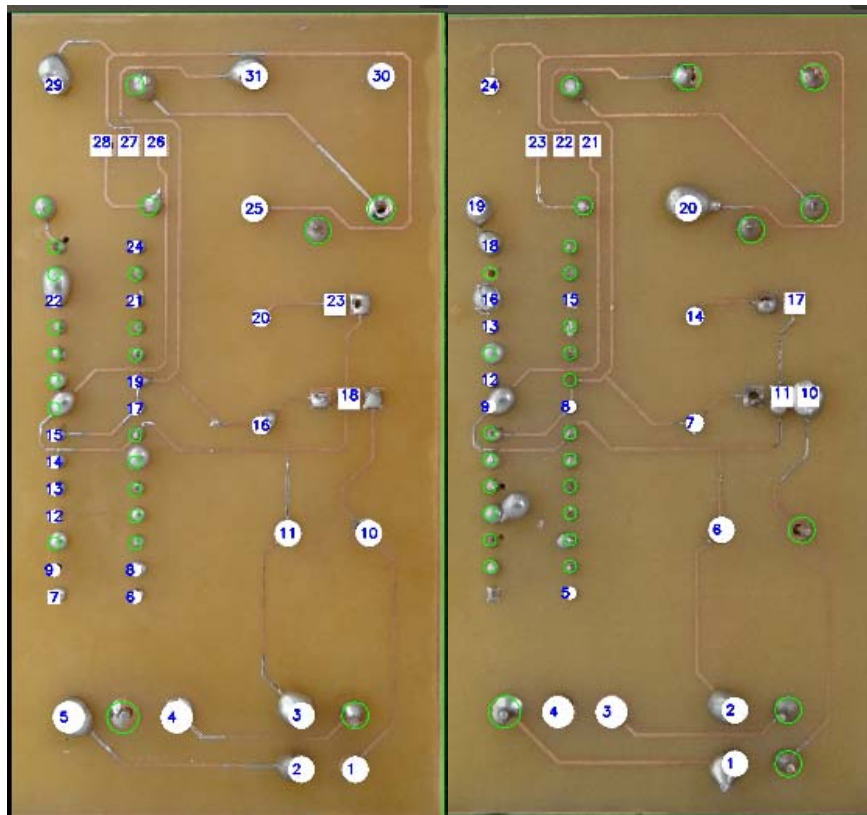
En la tabla 4.6, se resumen los resultados obtenidos en el último grupo de prueba, se determinó entonces que el algoritmo utilizado es propenso a ser afectado drásticamente según el error de fabricación que exista en la medida del borde de la placa de circuito impreso. Tomando en cuenta que la muestra número 2, figura 4.21 b, que se fabrica con las especificaciones de tamaño del borde según el diseño, se obtiene buenos resultados en cuanto a la detección de errores en las sueldas, con un total de 7 errores detectados en el sistema (contando falsos negativos). Mientras que para las siguientes dos pruebas, figura 4,21 a y c, la imprecisión del sistema aumento de forma significativa, llegando a detectar hasta 19 errores, haciendo que la efectividad del mismo baje a un 66%.

Ya que en el primer grupo de pruebas, figura 4.19 c, se verificó que se tenía un error de fabricación en la medida del borde de aproximadamente 1mm y aun así el sistema continuo trabajando con una efectividad mayor al 80%, se establece que el borde de las placas de circuito impreso es un factor determinante para el correcto funcionamiento del prototipo, tomando en cuenta que los algoritmos utilizados toman como referencia las medidas de los bordes tanto de la placa como del diseño para identificar las posiciones de las sueldas dentro de la placa.

Tabla 4. 6 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad 2)

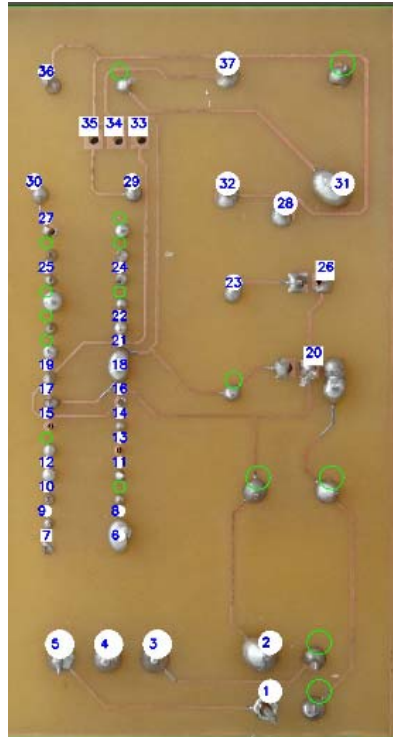
Muestra Nro.	Número de experimentos	Nro. Errores reales (observación visual)	Nro. Errores encontrados	Nro. De errores del sistema
1	15	28	43	19
2	15	28	31	7
3	15	28	41	17
EFFECTIVIDAD		66 %		

Para todas las pruebas se realizó un total de 15 experimentos por placa electrónica obteniendo los mismos resultados para cada una de las pruebas en la misma imagen, mientras que si se realiza la misma prueba con imágenes diferentes, se obtiene un rango de error de más, menos 4 errores detectados.



a)

b)



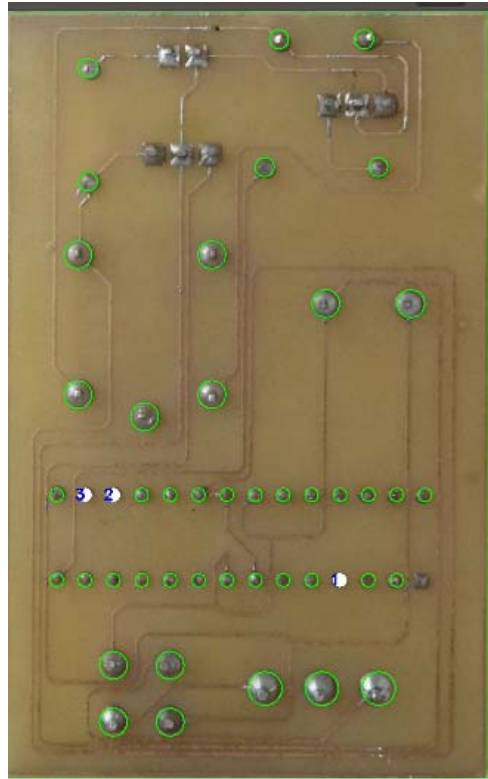
c)

Figura 4. 19 Detección de errores en soldas en placa de circuito impreso grupo "Prueba Control Calidad". a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3



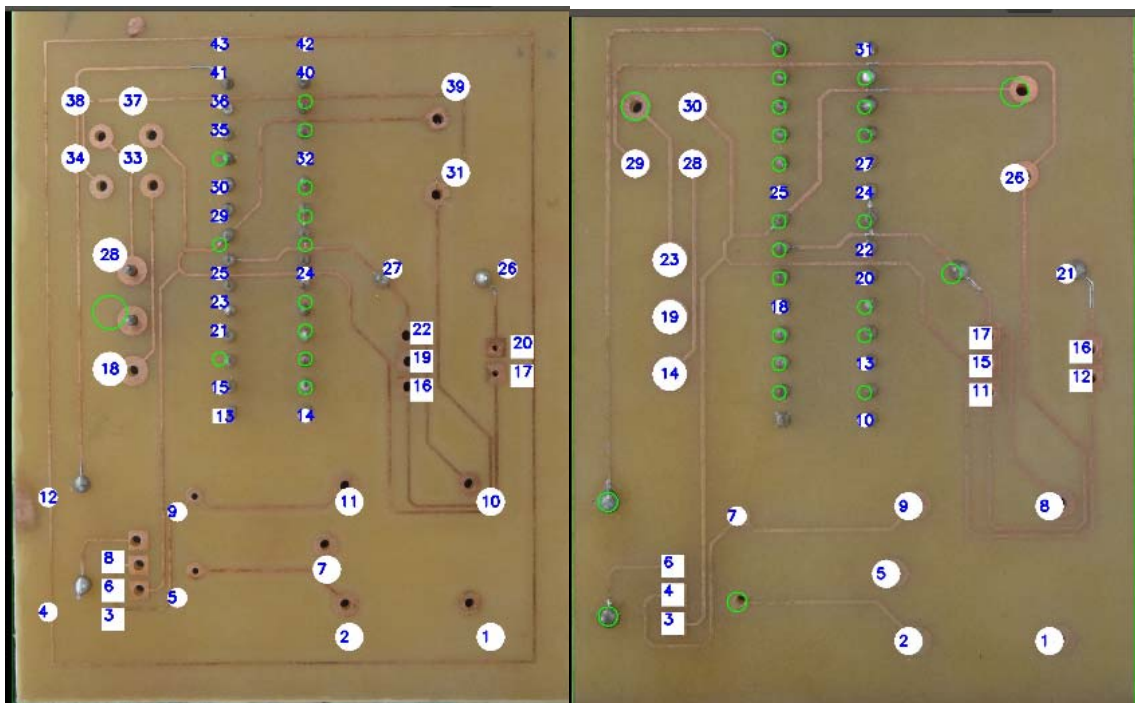
a)

b)



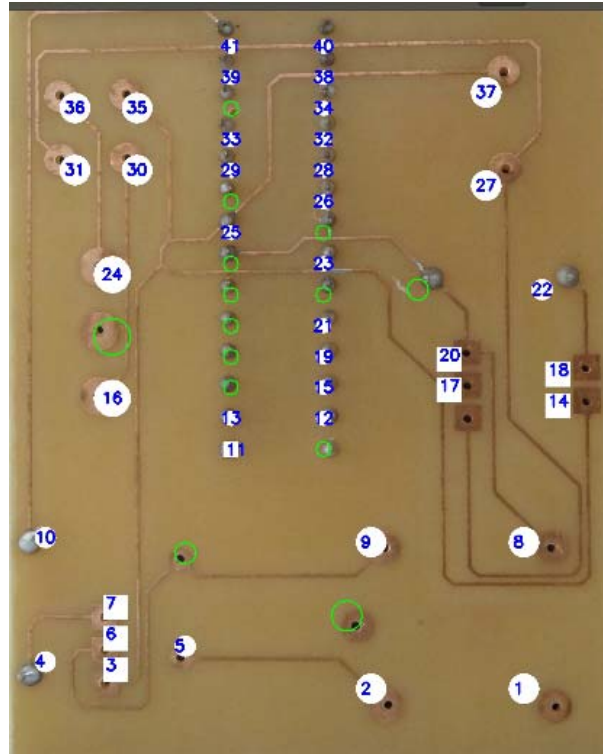
c)

Figura 4. 20 Detección de errores en soldas en placa de circuito impreso grupo "Prueba Control Calidad 1". a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3



a)

b)



c)

Figura 4. 21 Detección de errores en soldas en placa de circuito impreso grupo “Prueba Control Calidad 2”. a) PLACA1. b) PLACA2. c) PLACA3

Por otro lado, con el uso de una iluminación difusa para la detección de errores, con una base de datos de 63 y 15 ejemplos de soldas correctas circulares y cuadradas respectivamente, se obtuvo una mejor efectividad. En la tabla 4.7 se resumen los valores obtenidos para las placas electrónicas mostradas en la figura 4.19 (grupo Prueba control calidad). Dentro de esta primera prueba de tres, se logró una efectividad de reconocimiento de errores de 85%. Esta efectividad está basada en cuantas soldas se reconoció la calidad de manera correcta, ya que se encontró que el algoritmo detecta falsos negativos, pasando ciertas soldas con errores como buenos o viceversa.

Tabla 4. 7 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad)

Muestra Nro.	Número de experimentos	Nro. Errores reales (observación visual)	Nro. Errores encontrados	Nro. De errores del sistema
1	15	30	37	7
2	15	33	35	8
3	15	35	35	4
EFFECTIVIDAD		85.71 %		

Dentro del segundo grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad1) se encontraron visualmente un número de errores bajo en las placas electrónicas, de igual manera lo hizo el sistema de control de calidad identificando de igual forma falsos negativos, obteniendo una efectividad del 91%, tabla 4.8.

Tabla 4. 8 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad 1)

Muestra Nro.	Número de experimentos	Nro. Errores reales (observación visual)	Nro. Errores encontrados	Nro. De errores del sistema
1	15	5	9	5
2	15	9	10	3
3	15	10	12	4
EFFECTIVIDAD		91 %		

En la tabla 4.9, se resumen los resultados obtenidos en el último grupo de prueba (Prueba control calidad2). Se determinó que el algoritmo utilizado es propenso a ser afectado drásticamente según el error de fabricación que exista en la medida del borde de la placa de circuito impreso se use o no la iluminación difusa. En estas pruebas la imprecisión del sistema aumento de forma significativa, llegando a detectar hasta 19 errores, haciendo que la efectividad del mismo baje a un 66%. Se establece que el borde de las placas de circuito impreso es un factor determinante para el correcto funcionamiento del prototipo, tomando en cuenta que los algoritmos utilizados toman como referencia las medidas de los bordes tanto

de la placa como del diseño para identificar las posiciones de las sueldas dentro de la placa.

Tabla 4. 9 Efectividad del sistema para grupo de placas electrónicas (Prueba control calidad 2)

Muestra Nro.	Número de experimentos	Nro. Errores reales (observación visual)	Nro. Errores encontrados	Nro. De errores del sistema
1	15	28	35	7
2	15	28	42	19
3	15	28	42	19
EFFECTIVIDAD		66 %		

13.1.1. RESPUESTA DEL BRAZO ROBÓTICO ANTE POSICIONES DADAS

Para esta prueba se probó la repetitividad que posee el brazo robótico frente a una misma posición dada un sin número de veces, en la figura 4.22 se puede apreciar los resultados de la prueba realizada. Se le incorporó un esfero al brazo robótico el cual tenía que alcanzar una posición, al momento de llegar a la misma, se generó una marca y así sucesivamente.

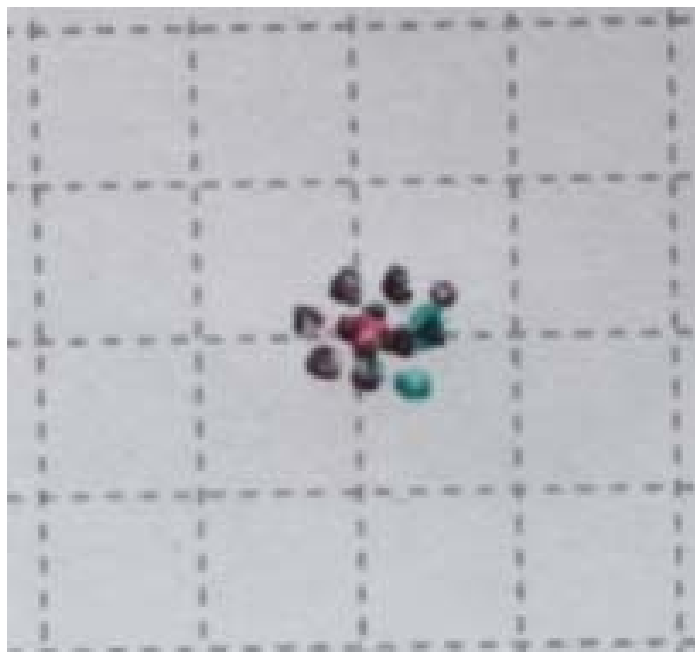


Figura 4. 22 Resultado prueba de repetitividad en el manipulador robótico. Marcas de esfero de efector final en hoja a cuadros A4

En la tabla 4.10 se resumen los datos obtenidos en esta prueba donde se obtiene un valor promedio de desviación de 0,915 mm con lo que se establece que la repetitividad del manipulador robótico es de 1 mm.

Tabla 4. 10 Resumen resultados de prueba de repetitividad

Prueba Nro.	Distancia del objetivo (mm)
1	0.3
2	0.5
3	0.5
4	0,7
5	0,7
6	0,8
7	1
8	1,3
9	1,5
10	1,5
11	1,5
12	2
13	2
Promedio	0,915

13.2. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Dentro del anexo F se encuentran las plantillas y código de resolución para los laboratorios de la materia de robótica I de la Universidad Internacional del Ecuador. Las prácticas propuestas están basadas en la librería OpenCV utilizando Python como lenguaje de programación. Los temas a tratar en visión artificial son, la manipulación de píxeles, el reconocimiento de figuras geométricas, colores y la clasificación de objetos. Se contempla también en cada laboratorio el manejo del robot manipulador implementado según se requiera. Los laboratorios están elaborados para que los alumnos no necesiten una cámara digital para la obtención de imágenes ya que todo el material se encuentra a disposición de los mismos en el CD adjunto.

CONCLUSIONES

- Con el algoritmo implementado, se obtuvo un 100% de efectividad al identificar los bordes y posición de soldaduras circulares y cuadradas cuando se tiene como entrada la imagen obtenida del programa Ares.
- Se obtuvo una repetitividad del manipulador robótico de ± 1 mm de radio.
- Dentro de las pruebas realizadas al sistema de control de calidad, con el método utilizado se logró una efectividad de reconocimiento de errores de entre 85 - 92%. Esta efectividad está basada en cuantas sueldas se reconoció la calidad de manera correcta, ya que se encontró que el algoritmo detecta falsos negativos, pasando ciertas sueldas con errores como buenos o viceversa ya que no se está utilizando un método de aprendizaje sino más bien uno probabilístico.
- El tamaño del borde de la placa de circuito impreso es un factor determinante en cuanto a la efectividad del sistema incorporado. Se demostró que para placas electrónicas con un error de fabricación del borde mayor a 1mm el sistema es incapaz de realizar el reconocimiento de errores en las soldaduras de manera correcta, tomando en cuenta que los algoritmos utilizados toman como referencia las medidas de los bordes tanto de la placa como del diseño para identificar las posiciones de las sueldas dentro de la placa.
- El establecer en el diseño que los motores no trabajen a máxima capacidad, aseguró que los servomotores, trabajando en condiciones normales, no den señales de alerta por sobrecarga.
- En comparación con las pruebas realizadas principalmente sin la cámara de luz, los resultados obtenidos fueron mejores una vez que se implementó la misma ya que se creó una atmosfera controlada para la captura de la imagen.
- El uso del módulo de Matlab 2013b, ayudó para la configuración de forma correcta de los servomotores utilizados eliminando el amortiguamiento que existía en cada eslabón al realizarse un movimiento.
- La disponibilidad de servomotores digitales, ayudó a su control. El ajuste del torque, velocidad y posición con retroalimentación de cada uno de los servomotores Dynamixel aumentaron el anejo de los mismos al momento de la programación.

- El realizar las pruebas de tracción del material PLA, y el añadir los datos de resistencia en la biblioteca del Inventor 2016 versión estudiantil en su módulo de simulación aseguran que los datos arrojados serán similares a los reales.
- El uso de luces fluorescentes lineales superior e inferior es fundamental para el correcto funcionamiento de la cámara de luz en cuanto a la homogeneidad de iluminación y eliminación de sombras.
- El costo beneficio es mayor al usar dos servomotores en los eslabones que requieren un mayor torque que usa solamente un servomotor.
- Con la implementación del algoritmo de aproximación DP, se obtuvo excelentes resultados en las pruebas realizadas. Este algoritmo es una buena herramienta para identificar figuras geométricas básicas.
- La manipulación de los pixeles dentro de las imágenes de cada suelda electrónica, permitió el identificar las formas y tamaños de cada punto de suelda dentro de la placa electrónica.
- La programación punto a punto, para la aplicación usada, brindó de forma detallada cada posición de los servomotores para que la cadena cinemática alcance cierta posición teniendo como referencia el efector final.
- Para cadenas cinemáticas largas o para robots con varios actuadores, el uso de la configuración de cableado tipo cadena margarita, simplifica el número de cables requeridos.
- El uso de la librería docx de Python fue una herramienta útil para elaboración del informe, permitiendo la creación de un documento de texto dinámico.
- El algoritmo utilizado falla en placas electrónicas cuyo borde no posee las dimensiones establecidas en el diseño, se tiene una tolerancia de ± 2 mm.

RECOMENDACIONES

- Incorporar una red neuronal con una base de datos de aprendizaje amplia para obtener una mayor efectividad en el sistema, modificando el método probabilístico usado, por uno de aprendizaje.
- Incorporar un sistema de video y mecánico cartesiano para que se pueda realizar este procedimiento en un proceso de producción masiva.
- Para un siguiente prototipo fabricar la cámara de luz de color negro ya que este color ayuda a que contraste el borde de la placa en la imagen, permitiendo una mayor efectividad del algoritmo.
- Si no se ha trabajado antes con programas de simulación de comportamiento mecánico, pedir asesoría ya que a pesar de que parezca fácil de usar, la configuración errónea de uno de los parámetros puede llevar a resultados falsos.
- En programas con código extenso, es recomendable usar programación orientada a objetos y así crear los bloques necesarios de una forma ordenada.
- Para cuando se desee implementar un manipulador como el diseñado, tomar en cuenta en los cálculos, cuando el eslabón más crítico está soportando la carga máxima, y a eso añadirle un factor de seguridad de diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] O. Rojas. "Ingeniería asistida por computadora", Industrial Data, vol.8, 2005. [En línea]. Perú, Disponible en:

<http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/idata/article/view/6150>

[2] Ncba, Especificaciones de PCB [En línea]. España, Disponible en:

<http://www.ncabgroup.com/es/especificaciones-de-pcb/>, Accedido en: May. 20, 2015.

[3] A. Salazar. "Control de manipuladores", Robótica y Mecatrónica, Jun. 12, 2012. [En línea]. Argentina, Disponible en:

<http://informecatronica-robotica.blogspot.com/p/estructura-de-un-robot-industrial.html>

[4] H. Khemani, Beneficio del uso de sistemas CAD [En línea]. Estados Unidos, Disponible en:

<http://www.brighthubengineering.com/cad-autocad-reviews-tips/17593-benefits-of-using-the-cad-software/>Accedido en: Feb. 23, 2015.

[5] S. Fernandez. Fundamentos del Diseño de Programación Orientada a Objetos, Madrid, España:McGraw Hill, 2010, pp. 35-90.

[6] A.Ollero, Robótica Manipuladores y Robots Móviles, Sevilla, España: Marcombo S.A, 2001.

[7] R. Schilling, Fundamentals of Robotics: Analysis and Control, Englewood Cliffs, Estados Unidos: Prentice Hall, 1999.

[8] M. Alonzo, Diseño, "Construcción y control de un brazo robótico", proyecto pre grado, dept. Electrónica, USFQ, Quito, Ecuador, 2014.

[9] C. Prócel, "Diseño e implementación de un prototipo de brazo robótico para aplicaciones de clasificación y reconocimiento de formas en el proceso de paletizado empleando procesamiento digital de imágenes", proyecto de pre grado, dept. Mecatrónica, ESPE, Latacunga, Ecuador, 2012.

[10] Y. Nakagawa, "Automatic visual inspection of solder joints on printed circuit boards", Proc. SPIE, vol. 336, pp.121 -127, 1982.

- [11] Li, J.; Bennett, B.L.; Karam, L.J.; Pettinato, J.S., "Stereo Vision Based Automated Solder Ball Height and Substrate Coplanarity Inspection," Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on , vol.PP, no.99, pp.1,15
- [12] Kobayashi, S.; Tanimura, Y.; Yotsuya, T., "Identifying solder surface orientation from color highlight images," Industrial Electronics Society, 1990. IECON '90., 16th Annual Conference of IEEE , vol., no., pp.821,825 vol.1, 27-30 Nov 1990

ANEXOS

INDICE DE ANEXOS

ANEXO A: HOJA DE DATOS SERVOMOTORES DYNAMIXEL AX12A Y HITECH HS805

ANEXO B: HOJA DE DATOS ROBOT INDUSTRIAL KUKA (DIGITAL)

ANEXO C: INFORME DE SIMULACIÓN MECÁNICA EN INVENTOR VERSIÓN ESTUDIANTIL 2016 (DIGITAL)

ANEXO D: PLANOS

ANEXO E: RESULTADOS PRUEBAS DE TRACCIÓN PLA

ANEXO F: PLANTILLA Y RESOLUCIÓN DE LABORATORIOS PARA MATERIA DE ROBÓTICA I

ANEXO G: MANUAL DE OPERACIÓN

ANEXO H: MANUAL DE MANTENIMIENTO

ANEXO A: HOJA DE DATOS SERVOMOTORES DYNAMIXEL AX12A Y HITECH
HS805

ANEXO B: HOJA DE DATOS ROBOT INDUSTRIAL KUKA (DIGITAL)

En el CD adjunto, en la parte de anexos, se encuentran las características del robot manipulador KUKA KR 6 sixx. Varias de las cuales sirvieron como referencia para los parámetros de diseño del brazo robótico diseñado.

ANEXO C: INFORME DE SIMULACIÓN MECÁNICA EN INVENTOR VERSIÓN ESTUDIANTEL 2016 (DIGITAL)

En el CD adjunto, en la parte de anexos, se encuentra el archivo generado por el programa Inventor versión estudiantil 2016 donde se da detalladamente los resultados de cada una de las simulaciones realizadas para la implementación de la parte mecánica del sistema de control de calidad de soldas en placas electrónicas.

ANEXO D: PLANOS

D02: Plano conexionado eléctrico

D03: Planos mecánicos

ANEXO E: RESULTADOS PRUEBAS DE TRACCIÓN PLA

Informe entregado por el Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela Politécnica Nacional, revisado por el jefe del departamento, el Ph.D Victor Hugo Guerrero para el ensayo de tracción a un grupo de 5 muestras de PLA obtenidas por impresión 3D según la norma ASTM D638-14.

ANEXO F: PLANTILLA Y RESOLUCIÓN DE LABORATORIOS PARA MATERIA DE ROBÓTICA I

Prácticas de laboratorio planteadas para la materia de Robótica I de la Universidad Internacional del Ecuador. Las prácticas se enfocan en el área de visión artificial y se aplican conocimientos desde manipulación de píxeles dentro de una imagen hasta reconocimiento de objetos.