



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA Y
TECNOLOGIAS AVANZADAS

Trabajo Terminal

“Brazo Robótico de Seis Grados de Libertad Guiado por Visión Artificial para Atornillar Placas Metálicas”

Qué para obtener el título de

“Ingeniero en Mecatrónica”

Presentan los alumnos

Meléndez Rivera Ángel Uriel

Pérez González Rodrigo

Vargas Belman Rodrigo

Asesores

Dr. Anzueto Ríos Álvaro

Dr. Lugo Peñaloza Armando Fabian

Ing. Peza Tapia Juan Manuel

Noviembre 2019



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA Y
TECNOLOGIAS AVANZADAS

Trabajo Terminal

“Brazo Robótico de Seis Grados de Libertad Guiado por Visión Artificial para Atornillar Placas Metálicas”

Qué para obtener el título de
“Ingeniero en Mecatrónica”

Presentan los alumnos

Meléndez Rivera Ángel Uriel

Pérez González Rodrigo

Vargas Belman Rodrigo

Asesores

Dr. Anzueto Rios Álvaro

Dr. Lugo Peñaloza Armando Fabián

Dr. Peza Tapia Juan Manuel

Presidente del Jurado

Dr. Corona Ramírez Leonel

Profesor Titular

M. en E. Rivas Bonilla Elizabeth



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Meléndez Rivera Angel Uriel
(se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Brazo Robótico de Seis Grados de Libertad Guiado por Visión Artificial para Atornillar Placas Metálicas

_____ ,
en adelante “La Tesis” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA “La Tesis” por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a “El IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, “El IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “La Tesis”.

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “La Tesis”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis”, por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de “La Tesis” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., 10 de Mayo de 2021

Atentamente

Meléndez Rivera Angel Uriel



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **Rodrigo Pérez González** (se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra **“Brazo Robótico de Seis Grados de Libertad Guiado por Visión Artificial para Atornillar Placas Metálicas”**, en adelante “La Tesis” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA “La Tesis” por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a “El IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, “El IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “La Tesis”. Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “La Tesis”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis”, por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de “La Tesis” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 23 de mayo de 2022

Atentamente



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Vargas Belman Rodrigo
(se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada Brazo Robótico de Seis Grados de Libertad
Guiado por Visión Artificial para Atornillar Placas Metálicas

_____ ,
en adelante “La Tesis” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA “La Tesis” por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a “El IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, “El IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “La Tesis”.

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “La Tesis”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis”, por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de “La Tesis” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a de de 2019.

Atentamente

Vargas Belman Rodrigo

Agradecimientos

Quiero agradecer principalmente a Dios por permitirme cumplir este sueño, a mis papas y a mi hermano por brindarme el soporte todos los días, a la UPIITA por darme el privilegio de ser formado como ingeniero, a mis maestros por compartirme su experiencia y conocimiento. A mis asesores el Dr. Fabián Lugo, el Dr. Juan Manuel Peza y el Dr. Álvaro Anzueto por creer en la realización del proyecto y darnos su guía y respaldo en cada paso. A nuestro jurado el Dr. Leonel Corona y la M. en C. Elizabeth Rivas, por brindarnos la comprensión y apoyo ante las circunstancias presentadas durante el proyecto. Y, por último, gracias a mis compañeros de carrera que fueron parte esencial de mi desarrollo e hicieron cada día único, en especial a Ángel Y Rodrigo, por cada proyecto que realizamos juntos y por el apoyo incondicional que me brindaron durante toda la carrera.

Rodrigo Pérez González

Quiero agradecer a mi familia por la educación que me brindó, las bases para nunca rendirse y seguir adelante por más obstáculos que estén en el camino, principalmente a mi abuelo, mi madre y hermanos, los cuales me dieron su apoyo todos los días. Agradezco a la UPIITA por proveerme todas las herramientas y recursos posibles para mi formación como ingeniero, a mis maestros por bríndame esa parte humana, experiencia y conocimiento para enriquecernos y aportar a nuestro crecimiento. A mis asesores el Dr. Fabián Lugo, el Dr. Juan Manuel Peza y el Dr. Álvaro Anzueto por confiar, apoyar y aportar al desarrollo de este proyecto en cada paso hasta su terminó. Igualmente me gustaría agradecer a nuestra profesora titular la M. en C. Elizabeth Rivas y presidente el Dr. Leonel Corona por apoyarnos en los momentos más difíciles del desarrollo del proyecto y su comprensión antes los resultados obtenidos. Por último, quiero agradecer a mis amigos y compañeros por apoyarnos en todo momento en diferentes aspectos a lo largo de la carrera y proyecto, especialmente a Rodrigo Pérez y Rodrigo Belman porque a pesar de lo difícil que sea siempre juntos podremos salir adelante.

Angel Uriel Meléndez Rivera

Quiero agradecer a cada persona que estuvo en mi vida en los cinco y medio años que estuve en la UPIITA, debido a que cada uno de ellos me ayudo a forjar los peldaños que me ayudaron a terminar mi camino. En especial quiero agradecer a mi familia y amigos, los cuales siempre me apoyaron y motivaron a superarme, a los profesores que nunca se detuvieron en su labor de enseñanza y principalmente a nuestros asesores por siempre estar presentes para ayudar a resolver nuestras dudas. Concluyendo con un especial agradecimiento a Ángel Meléndez y Rodrigo Pérez, debido a que sin ellos nada de lo expuesto en este escrito hubiera sido remotamente posible, esto es una prueba de que el trabajo en equipo lo es todo.

Rodrigo Vargas Belman

Índice

ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
PALABRAS CLAVE	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. MARCO DE REFERENCIA	1
1.2.1. <i>Histórico</i>	1
1.2.2. <i>Teórico</i>	3
1.2.2.1. <i>Robot</i>	3
1.2.2.2. <i>Sistema de control</i>	3
1.2.2.3. <i>Visión artificial</i>	3
1.2.2.4. <i>Modelado cinemático</i>	3
1.2.2.5. <i>Modelado dinámico</i>	4
1.2.2.6. <i>Marcos coordenados</i>	5
1.2.2.7. <i>Matrices de rotación</i>	5
1.2.2.8. <i>Control servo-visual</i>	6
1.2.2.9. <i>Control Discontinuo (control por modos deslizantes)</i>	6
1.2.2.10. <i>Control por modos deslizantes de sistemas robóticos de cadena cinemática abierta</i>	7
1.3. ESTADO DEL ARTE	8
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.5. PROPUESTA DE SOLUCIÓN	9
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	9
1.7. OBJETIVOS.....	10
1.7.1. <i>General</i>	10
1.7.2. <i>Específicos</i>	10
1.8. METODOLOGÍA	10
2. ANÁLISIS Y DISEÑO.....	13
2.1. DIVISIÓN POR DISCIPLINAS.....	13
2.2. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	17
2.3. DISEÑO CONCEPTUAL.....	18
2.4. DISEÑO DETALLADO	21
2.4.1. <i>Análisis cinemático del robot de seis grados de libertad</i>	21

2.4.2.	<i>Análisis dinámico del robot de seis grados de libertad</i>	22
2.4.3.	<i>Diseño mecánico</i>	23
2.4.4.	<i>Selección de materiales</i>	27
2.4.5.	<i>Obtención de longitudes del sistema</i>	29
2.4.6.	<i>Obtención de masas e inercias del sistema</i>	33
2.4.7.	<i>Cálculo del área de trabajo</i>	36
2.4.8.	<i>Disposición de Placa</i>	39
2.4.9.	<i>Sistema de Visión Artificial</i>	41
2.4.10.	<i>Conversión mm-píxeles</i>	41
2.4.12.	<i>Implementación del control</i>	47
2.4.13.	<i>Sistema de Instrumentación</i>	49
2.4.14.	<i>Sistema de potencia</i>	50
2.4.15.	<i>Modos de funcionamiento de Puente-H</i>	51
2.4.16.	<i>Circuito impreso de sistema de potencia</i>	52
2.4.17.	<i>Vista tridimensional circuito de potencia</i>	53
2.4.18.	<i>Circuito de multiplexado</i>	53
2.4.19.	<i>Circuito impreso de multiplexado</i>	54
2.4.20.	<i>Vista tridimensional circuito de multiplexado</i>	55
2.4.21.	<i>Diseño de gabinete</i>	55
2.4.22.	<i>Interfaz Gráfica</i>	56
2.4.23.	<i>Efactor Final</i>	62
2.4.24.	<i>Selección de motores</i>	63
2.5.	INTEGRACIÓN DE DISCIPLINAS	68
3.	MANUFACTURA E IMPLEMENTACION	70
3.1.	MANUFACTURA DE ESLABONES	70
3.2.	MESA.....	72
3.3.	PLACA	73
3.4.	SISTEMA DE POTENCIA	74
3.5.	INTEGRACIÓN FINAL.....	75
1.	PRUEBAS Y RESULTADOS	76
1.1.	PROPIOS DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO	76
1.1.1.	<i>Validación mecánica</i>	76
1.1.2.	<i>Validación del Sistema de Visión Artificial</i>	79
1.1.3.	<i>Validación de Control</i>	82
1.1.3.1.	<i>Simulación de control dinámico</i>	82
1.1.3.2.	<i>Validación de control físico</i>	85
1.1.4.	<i>Validación de la Integración</i>	87
1.2.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	90
2.	CONCLUSIONES	92
3.	REFERENCIAS	94
4.	APÉNDICES	96
4.1.	DIAGRAMA GANTT	96
4.2.	SELECCIÓN DE MATERIALES	100
4.3.	PLANOS	103

5. ANEXOS.....120

Índice de Figuras

FIGURA 1.- CINEMÁTICA DIRECTA Y CINEMÁTICA INVERSA [11]	4
FIGURA 2.- RESULTADOS: ROBOT EN DOS PUNTOS DE LA TRAYECTORIA [15]	8
FIGURA 3.- RESULTADOS: MODULO CLASIFICADOR DE LULOS [16].....	8
FIGURA 4.- ESTRUCTURA DEL DISEÑO MECATRÓNICO.....	11
FIGURA 5.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DIVISIÓN POR DISCIPLINAS.....	13
FIGURA 6.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE VISIÓN	13
FIGURA 7.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA MECÁNICO	14
FIGURA 8.- REPRESENTACIÓN DE ROBOT DE 6GDL.....	15
FIGURA 9.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE CONTROL	15
FIGURA 10.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE ELECTRÓNICA	16
FIGURA 11.- PROPUESTA DE DISEÑO OPCIÓN 1	18
FIGURA 12.- PROPUESTA DE DISEÑO OPCIÓN 2	19
FIGURA 13.- PROPUESTA DE DISEÑO OPCIÓN 3	19
FIGURA 14.- DISPOSICIÓN DE MARCOS COORDENADOS SIGUIENDO METODOLOGÍA DENAVIT-HARTENVERG	21
FIGURA 15.- DISEÑO DE BASE.....	23
FIGURA 16.- DISEÑO DE ESLABÓN 1	23
FIGURA 17.- DISEÑO CUERPO DE MOTOR 2 Y 3	24
FIGURA 18.- DISEÑO CODO.....	24
FIGURA 19.- DISEÑO CUERPO MOTOR 4	24
FIGURA 20.- DISEÑO DE CODO PARA ARTICULACIÓN 4	25
FIGURA 21.-DISEÑO DE CUERPO PARA MOTOR 5 Y 6.....	25
FIGURA 22.-DISEÑO DE CUERPO PARA EFECTOR FINAL.....	25
FIGURA 23.-DISEÑO DE SUJETADOR PARA CÁMARA WEB.....	26
FIGURA 24.-DISEÑO DE TAPAS.....	26
FIGURA 25.- ENSAMBLE FINAL DE BRAZO ROBÓTICO	27
FIGURA 26.- ANÁLISIS ESTÁTICO DE SISTEMA MECÁNICO.....	28
FIGURA 27.- ESFUERZO MÁXIMO PRESENTADO EN ANÁLISIS ESTÁTICO	28
FIGURA 28.- FACTORES DE SEGURIDAD PRESENTADO EN ANÁLISIS ESTÁTICO	29
FIGURA 29.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 1	29
FIGURA 30.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 2.....	30
FIGURA 31.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 3.....	30
FIGURA 32.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 4.....	31
FIGURA 33.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 5.....	31
FIGURA 34.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 6.....	32
FIGURA 35.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 7.....	32
FIGURA 36.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 8.....	33
FIGURA 37.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL PRIMER ESLABÓN.	33
FIGURA 38.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL SEGUNDO ESLABÓN.....	34
FIGURA 39.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL TERCER ESLABÓN.....	34
FIGURA 40.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL CUARTO ESLABÓN.....	35
FIGURA 41.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL QUINTO ESLABÓN.....	35
FIGURA 42.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL SEXTO ESLABÓN.....	36

FIGURA 43.- CÓDIGO UTILIZADO PARA GENERACIÓN DE ÁREA DE TRABAJO DEL ROBOT	37
FIGURA 44.- GRÁFICA DE ESPACIO DE TRABAJO ALCANZABLE POR EL ROBOT (VISTA SUPERIOR)	38
FIGURA 45.- GRÁFICA DE ESPACIO DE TRABAJO ALCANZABLE POR EL ROBOT (VISTA ISOMÉTRICA)	38
FIGURA 46.- DISEÑO DE MESA	39
FIGURA 47.- SIMULACIÓN DE SUJECIÓN DE PLACA CON BARRENOS	39
FIGURA 48.-SIMULACIÓN DE MOMENTO EN LA BASE DE LA MESA	40
FIGURA 49.-DISEÑO FINAL DE LA MESA.....	40
FIGURA 50.-PRUEBAS ESTÁTICAS DE ESFUERZO EN MESA	41
FIGURA 51.- SEGMENTACIÓN DE PLACA EN CUADRANTES DE 50X50MM	41
FIGURA 52.- CÓDIGO PARA FILTRO DE PLACA SEGMENTADA	42
FIGURA 53.- MEDICIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE DIVISIONES DE LOS CUADRANTES	42
FIGURA 54.- COMPENSACIÓN UTILIZADA PARA CADA SEGMENTO	43
FIGURA 55.- CÓDIGO PARA LA COMPENSACIÓN	44
FIGURA 56.- FILTRADO PARA PLACA.....	45
FIGURA 57.- FILTRADO Y ETIQUETADO DE OBJETOS	45
FIGURA 58.- CALCULO DE CENTROIDES	46
FIGURA 59.-RECORTE DE IMAGEN PARA CALCULO DE ANGULO DE INCLINACIÓN.....	46
FIGURA 60.-CÓDIGO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN	47
FIGURA 61.-CÓDIGO PARA CONTROL.....	49
FIGURA 62.-CÓDIGO DE CONTEO DE PULSOS	49
FIGURA 63.-MEDICIÓN DE PULSOS POR MOTOR	50
FIGURA 64.- DISEÑO ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO DE POTENCIA	51
FIGURA 65.- CIRCUITO IMPRESO DE POTENCIA	52
FIGURA 66.- VISTA TRIDIMENSIONAL DE CIRCUITO DE POTENCIA.....	53
FIGURA 67.-DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE MULTIPLEXADO	54
FIGURA 68.-CIRCUITO IMPRESO DE MULTIPLEXADO	54
FIGURA 69.-VISTA TRIDIMENSIONAL DEL CIRCUITO DE MULTIPLEXADO	55
FIGURA 70.- VISTA TRIDIMENSIONAL DE GABINETE	56
FIGURA 71.- DISPOSICIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	57
FIGURA 72.-CÓDIGO DE INICIO DE INTERFAZ.....	57
FIGURA 73.-ENCENDIDO Y APAGADO DE CÁMARA	58
FIGURA 74.-CONECTAR/DESCONECTAR CÁMARA	58
FIGURA 75.-CÓDIGO PARA TOMA DE FOTO	59
FIGURA 76.-CÓDIGO PARA CÁLCULO DE RUTA EN BASE A CENTROIDES.....	59
FIGURA 77.-CÓDIGO PARA SIMULACIÓN DE RUTA.....	61
FIGURA 78.- CÓDIGO PARA CONFIRMACIÓN Y ENVÍO DE RUTA	62
FIGURA 79.-CUERPO DE RETENCIÓN DE MOTOR PARA EFECTOR FINAL	62
FIGURA 80.-RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTÁTICO A EFECTOR FINAL	63
FIGURA 81.-PRIMER FASE DE MOVIMIENTO SECUENCIAL.....	63
FIGURA 82.-SEGUNDA FASE DE MOVIMIENTO SECUENCIAL	64
FIGURA 83.-TERCER FASE DE MOVIMIENTO SECUENCIAL	64
FIGURA 84.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 1	65
FIGURA 85.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 2	65
FIGURA 86.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 3	66
FIGURA 87.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 4	66
FIGURA 88.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 5	66
FIGURA 89.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 6	67
FIGURA 90.-TABLA DE CARACTERÍSTICAS MOTOR GW4058-55	67

FIGURA 91.-TABLA DE CARACTERÍSTICAS MOTOR JGY-371	67
FIGURA 92.- SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS DE LA INTEGRACIÓN DEL SISTEMA	68
FIGURA 93.- DIAGRAMA DE FLUJO FINAL	69
FIGURA 94.-FACTORES DE SEGURIDAD FINALES DEL ENSAMBLE	70
FIGURA 95.-CORTE DE ESLABONES POR SEGUETA MECÁNICA.....	71
FIGURA 96.-CAREADO Y REDONDEO DE TUBOS PARA ESLABONES	71
FIGURA 97.-PERFORACIÓN Y GENERACIÓN DE CUERDA DE TUBOS	71
FIGURA 98.-ELABORACIÓN DE BASE DE ROBOT	72
FIGURA 99 .-INTEGRACIÓN DE BASE PARA CÁMARA Y PLACA.....	72
FIGURA 100.-PERFORACIÓN DE PLACA PARA ESCENARIO DE PRUEBAS	73
FIGURA 101.-FOTO DE PLACA CON LOS BARRENOS DE PRUEBA	74
FIGURA 102.-ELABORACIÓN DE TARJETAS DE POTENCIA.....	74
FIGURA 103.-INTEGRACIÓN FINAL DE TODOS LOS SISTEMAS	75
FIGURA 104.-GRÁFICA DE ESFUERZOS EN POSICIÓN DE MÁXIMA EXTENSIÓN	76
FIGURA 105.-ESFUERZO MÁXIMO PRESENTADO EN POSICIÓN DE MÁXIMA EXTENSIÓN	77
FIGURA 106.- FIGURAS MODALES DE LAS PRIMERAS 5 FRECUENCIAS RESONANTES	78
FIGURA 107.-RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CENTROIDE.....	79
FIGURA 108.-MEDICIÓN EN MM DEL PRIMER BARRENO	79
FIGURA 109.- MEDICIÓN EN MM DEL SEGUNDO BARRENO	80
FIGURA 110.- MEDICIÓN EN MM DEL TERCER BARRENO.....	80
FIGURA 111.- MEDICIÓN EN MM DEL CUARTO BARRENO	80
FIGURA 112.- MEDICIÓN EN MM DEL QUINTO BARRENO.....	81
FIGURA 113.- MEDICIÓN EN MM DEL SEXTO BARRENO.....	81
FIGURA 114.- MEDICIÓN EN MM DEL SÉPTIMO BARRENO	81
FIGURA 115.-CALCULO DE MATRIZ DE INERCIA	82
FIGURA 116.-CALCULO DE MATRIZ DE CORIOLIS	82
FIGURA 117.-CALCULO DE VECTOR GRAVITACIONAL.....	82
FIGURA 118.-EDICIÓN DE ECUACIONES PARA INCORPORACIÓN A MATLAB	83
FIGURA 119.-IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE CONTROL CON EL MODELO DINÁMICO.....	84
FIGURA 120.-GRÁFICA DE ERRORES EN SIMULACIÓN DE CONTROL	84
FIGURA 121.-REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ROBOT ALCANZANDO EL PUNTO DESEADO	85
FIGURA 122.-CÓDIGO DE CONTROL.....	86
FIGURA 123.- MEDICIÓN DEL ERROR PARA CADA JUNTA	86
FIGURA 124.-INICIALIZACIÓN DE INTERFAZ	87
FIGURA 125.-CONEXIÓN INTERFAZ-TARJETA NÚCLEO	87
FIGURA 126.-CALCULO DE RUTA	88
FIGURA 127.-SIMULACIÓN DE RUTA	88
FIGURA 128.-CONFIRMACIÓN PARA EJECUCIÓN DE RUTA.....	89
FIGURA 129.- EJECUCIÓN EN TIEMPO REAL DE RUTA	89
FIGURA 130.- COMPARACIÓN DE MATERIALES POR DENSIDAD [GRÁFICA OBTENIDA A PARTIR DE SOFTWARE CES EduPACK 2013]	102
FIGURA 131.- COMPARACIÓN DE MATERIALES POR MÓDULO DE YOUNG [GRÁFICA OBTENIDA A PARTIR DE SOFTWARE CES EduPACK 2013].....	102
FIGURA 132.- COMPARACIÓN DE MATERIALES POR LIMITE ELÁSTICO [GRÁFICA OBTENIDA A PARTIR DE SOFTWARE CES EduPACK 2013].....	102

Índice de Tablas

TABLA 1.- TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	17
TABLA 2.- MATRIZ MORFOLÓGICA	18
TABLA 3.- PARÁMETROS α_i , a_i , d_i Y θ_i DEL ROBOT	21
TABLA 4.-PRIMERAS 5 FRECUENCIAS RESONANTES DEL ENSAMBLAJE	77

Lista de Abreviaturas

GDL. - Grados de libertad.

ABS. - Acrilonitrilo-butadieno-estireno.

PLA. - Ácido poli láctico.

mm.- Milímetros

Lista de Símbolos

α_i : Ángulo entre z_{i-1} y z_i medido en un plano norma a x_i .

a_i : Distancia entre z_{i-1} y z_i medido a lo largo de x_i .

d_i : Distancia perpendicular del origen O_{i-1} a la intersección de x_i con z_{i-1} medida a lo largo de z_{i-1} .

θ_i : Ángulo entre x_{i-1} y x_i medido en un plano norma a z_{i-1} .

Q_i : Posición de las articulaciones.

e : Excentricidad de la elipse.

[A]: Amperes.

[V]: Volts.

[VCD]: Volts de Corriente Directa.

Resumen

En este documento, se expone acerca del diseño y construcción de los sistemas que integran un brazo robótico de seis grados de libertad, cuya finalidad es el atornillado automático en placas metálicas con apoyo de un control servo-visual. Si bien, los sistemas de visión artificial dentro del ámbito industrial y de investigación se están enfocando a sistemas de control de calidad o identificación y clasificación de objetos, actualmente se están desarrollando avances tecnológicos que permiten incluirlos dentro de sistemas robóticos, con la finalidad de proporcionar a los robots una manera de interactuar con su ambiente de trabajo y con esto mejorar los procesos de automatización. Es por esto, que buscando generar un aporte tecnológico a la interacción de los sistemas robóticos con su entorno de trabajo, se desarrolló el control de movimiento de un robot, con la utilización de un sistema de visión artificial para la detección de barrenos dentro de un espacio de trabajo.

Para esto se realizó el diseño mecánico y la construcción de los diferentes eslabones que conforman al brazo robótico partiendo de la necesidad de alcanzar diferentes puntos dentro del área de la placa, también se realizó la selección de componentes para la constitución del sistema de potencia requerido para alimentar el sistema, así como la implementación de diferentes métodos de visión artificial basados en procesamiento de imágenes y detección de objetos para el cálculo de las posiciones y el ángulo de inclinación de los barrenos, además se realizó el cálculo del área de trabajo, la cinemática directa e inversa y el control requerido para cada una de las juntas de revoluto, por último se realizó el diseño y la construcción del efector final así como de las bases para la placa, la cámara y el brazo robótico.

Abstract

In this document, we expose about the design and construction of the systems that integrate a robotic arm of six degrees of freedom, whose purpose is the automatic screwing on metal plates with the support of a servo-visual control. Although, artificial vision systems within the industrial and research field are focused on quality control systems or identification and classification of objects, technological advances are currently being developed that allow them to be included within robotic systems, in order to provide to robots a way to interact with their work environment and thereby improve automation processes. That is why, seeking to generate a technological contribution to the interaction of robotic systems with their work environment, the control of a robot's movement was developed, with the use of an artificial vision system for the detection of holes within a work space.

For this, the mechanical design and construction of the different links that make up the robotic arm was made based on the need to reach different points within the plate area, the selection of components for the constitution of the power system required for feed the system, as well as the implementation of different artificial vision methods based on image processing and object detection for the calculation of the positions and the angle of inclination of the holes, in addition the calculation of the work area, the direct kinematic and reverse kinematic and the control required for each of the boards of revolute joints, finally the design and construction of the final effector was carried out as well as the bases for the plate, the camera and the robotic arm.

Palabras clave

Brazo robótico, visión artificial, control servo-visual, planeación de trayectorias.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los robots a lo largo de los años han ido sustituyendo al ser humano en tareas que implican la realización de movimientos repetitivos, esto se ha logrado sin disminuir la calidad del trabajo y aumentando la productividad, además reducen costos de mano de obra y aprovechan de manera más eficiente los recursos materiales y energéticos, sin embargo, a pesar de todas las virtudes que poseen los robots, presentan grandes limitaciones al no ser capaces de interactuar con su entorno y adaptarse a él, es por esto que se han desarrollado diferentes técnicas para eliminar estas desventajas, una de ellas son la aplicación de sistemas de visión artificial.

Un ejemplo de esta búsqueda fue Shakey, el primer robot con visión artificial móvil, desarrollado en 1972 por Nils Nilsson en Stanford, el cual determinaba su entorno a través de una cámara y un sensor de telemetría que le permitía al robot trazar una ruta a seguir esquivando obstáculos, y siendo capaz de tomar decisiones en cuanto a la dirección a seguir.

Con base en lo anterior, se propone el desarrollo de un robot de 6 grados de libertad cuya finalidad sea el atornillado en placas metálicas de manera automática sin la intervención de un operador, implementando un sistema de visión artificial, el cual permita al robot tener una percepción de su entorno, que le permita identificar los barrenos a atornillar y generar los movimientos necesarios para llegar a los diferentes puntos deseados.

A lo largo de este documento se describirán las bases teóricas necesarias para entender el desarrollo del proyecto, además de reportar el desarrollo tecnológico del diseño de cada uno de los sistemas que conforman al robot, presentando las validaciones requeridas para obtener las conclusiones del diseño.

1.2. Marco de Referencia

1.2.1. Histórico

A lo largo de la historia el ser humano siempre ha buscado la manera de realizar las tareas que lleva acabo de la manera más rápida y sencilla, creando así diferentes herramientas o métodos que le faciliten la realización de todas estas actividades, las cuales han ido evolucionando a lo largo del tiempo, un claro ejemplo de esto fue el cambio en las formas de producción derivado de la Revolución Industrial a mediados del Siglo XVII, pasando de una producción puramente artesanal a una producción en masa potencializada por la adición de máquinas en los diferentes procesos de fabricación de los productos permitiendo desarrollar actividades cada vez más complejas pero a su vez también que representaban un mayor riesgo.

Fue por esto que en el año de 1961 George Devol y Joseph Engelberger inspirándose en la primera ley de la robótica escrita por Isaac Asimov en su libro “Yo Robot” la cual dice que *“un robot no puede lastimar*

*a un ser humano o permanecer inactivo ante un daño que se le pueda hacer*¹ decidieron crear un robot que realizara las tareas que para el ser humano eran peligrosas, siendo el Unimate 1900 el primer robot industrial en instalarse en una línea de ensamble de General Motors donde se encargaba de tomar las piezas que recién salían del horno para dejarlas en un recipiente con líquido refrigerante, de tal forma que los trabajadores ya no tenían que tomar las piezas al rojo vivo. [1]

Fue tal el impacto y la expectativa generada por el Unimate que en 1969 General Motors decidió automatizar toda su planta de Lordstown, Ohio la cual adaptó con una variante del Unimate que le permitía realizar soldadura por puntos, aumentando su producción a 110 automóviles por hora, doblando la velocidad de producción de cualquier otra planta en ese momento. [2]

Desde ese entonces se empezó a explorar otras aplicaciones para los robots, ejemplo de ello fue en 1972 en Stanford fue desarrollado por Nils Nilsson el primer robot con visión artificial móvil llamado Shakey, este determinaba su entorno a través de una cámara y un sensor de telemetría procesando la información recabada por una computadora lo que le permitía al robot trazar una ruta a seguir esquivando obstáculos, y siendo capaz de tomar decisiones en cuanto a la dirección a seguir. [3]

Después de eso en el año 1978 fue creado el primer robot programable llamado Programmable Universal Machine for Assembly (PUMA) por Victor Scheiman el cual permite reprogramar la ruta a seguir por parte del robot, algo que hasta el momento no se hacía puesto que versiones anteriores solamente podían realizar un tipo de ruta sin capacidad de ser modificada después. A partir de ese momento la popularidad de los brazos robóticos fue en aumento de tal forma que actualmente son una de las bases de los procesos de fabricación de las grandes y medianas industrias. [4]

Por tal motivo se han ido desarrollando más y mejores formas de realizar la programación y el control de estos, siendo actualmente la más popular el “Teach Pendant” el cual consiste en un dispositivo que permite programar de forma manual la ruta a seguir por parte del robot y las actividades a realizar en cada punto, estos movimientos y coordenadas son almacenadas en una memoria interna para después poder repetirlos de forma idéntica las veces que se requieran, evitando la programación por código de los robots programables. [5]

Si bien la técnica de Teach Pendant es la más popular no es precisamente la forma más efectiva, ya que aunque es una forma más rápida de realizar la programación sigue implicando la intervención humana dentro del proceso, además de que de no manejarse con el cuidado necesario puede llegar a ocasionar accidentes en los operadores. [6] Por esta razón, se han estado investigando nuevas formas de que el robot sea totalmente autónomo en cuanto al trazado de rutas se refiere. Un ejemplo de esto es la tesis realizada por M. en C. Marco Antonio Moreno Armendariz investigador del CINVESTAV en el 2003 en la cual nos habla acerca de la visión estereoscópica para el control de un brazo robot, en la que se describe una forma de lograr obtener la posición del brazo a través del uso de la visión estereoscópica, así como una propuesta de solución para el control del brazo a través de un control PD difuso. [7]

¹ I. Asimov, Yo, Robot, Estados Unidos: Gnome Press, 1950.

1.2.2. Teórico

1.2.2.1. Robot

Según la Organización Internacional de Estandarización (International Organization for Standardization, “ISO”), un robot es mecanismo totalmente actuado y programable en 2 o más grados de libertad con un cierto grado de autonomía, capaz de moverse dentro de su entorno para realizar tareas previstas.

1. Todo robot debe de poseer sistema de control y una interfaz del sistema de control.
2. La clasificación como robot industrial o robot de servicio es realizada según el propósito del robot. [8]

1.2.2.2. Sistema de control

Un sistema de control es un conjunto de dispositivos encargados de administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de otro sistema, con el fin de reducir las probabilidades de fallo y obtener los resultados deseados. Por lo general, se usan sistemas de control industriales en procesos de producción industriales para controlar equipos o máquinas. [9]

1.2.2.3. Visión artificial

La visión artificial se puede definir como la utilización de cámaras para el análisis y comprensión de escenarios dentro del mundo real. Esta disciplina estudia la metodología y el desarrollo de algoritmos, así como los temas relacionados con la implementación de soluciones.

En años recientes, la visión artificial se convirtió en una herramienta tecnológica en varios campos de acción. En objetos de consumo comunes como teléfonos celulares, autos con detector de colisión o juegos de video. Dentro de la industria es usada para control de calidad o control de procesos. Igualmente, ampliamente utilizada dentro de la industria filmográfica. Esto es solo una mención de en donde podemos encontrar el uso de visión artificial y las amplias aplicaciones que tiene dentro del mundo procesando imágenes y video. [10]

1.2.2.4. Modelado cinemático

La cinemática es la rama de la física que estudia el movimiento sin considerar las fuerzas o pares que lo causan, es decir, estudia las leyes de movimiento sin tener en cuenta aspectos tales como masas e inercias. Se limita por tanto al estudio de la trayectoria que tiene el robot a lo largo del tiempo, considerando tan solo la posición, la velocidad y en ocasiones la aceleración. Por lo tanto, se trata de una descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo.

La cinemática del robot consiste en estudiar su movimiento con respecto a un sistema de referencia que determina las relaciones entre la posición y orientación del extremo del robot (localización) y los valores de sus coordenadas articulares.

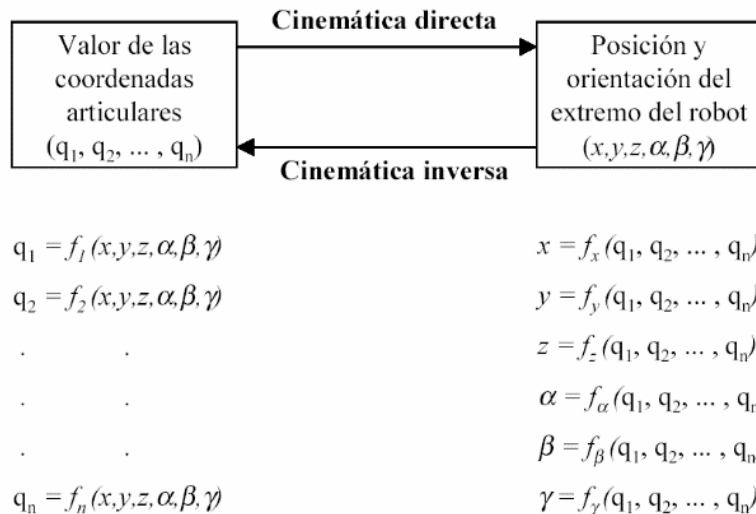


FIGURA 1.- CINEMÁTICA DIRECTA Y CINEMÁTICA INVERSA [11]

Se conoce como cinemática directa a los modelos matemáticos que permiten calcular la posición de los eslabones de un robot (estructura articulada) a partir de sus componentes fijos y configuración de las articulaciones.

La cinemática directa se refiere al uso de ecuaciones cinemáticas para el cálculo de la posición del actuador final (TCP) en un robot articulado a partir de los ángulos y/o desplazamientos de las articulaciones o de la posición y orientación de la base de un robot móvil a partir de las velocidades de las ruedas. De igual forma, otro tipo de robots, también disponen de modelos cinemáticos directos que permiten en última instancia calcular la posición y orientación de determinados elementos del robot a partir de sus variables de actuación.

Es el proceso inverso por el cual se obtienen modelos matemáticos que permiten, a partir de una posición específica del actuador final, calcular la posición (ángulos) y/o desplazamientos de los actuadores. Por lo general podemos encontrar configuraciones que no son factibles, es decir, que no son alcanzables, configuraciones singulares que requieren una dirección de movimiento no-holónoma o incluso soluciones múltiples, típicamente soluciones de codo arriba o codo abajo en los brazos robots articulados. [11]

1.2.2.5. Modelado dinámico

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que éstas generan. En el caso del modelo dinámico de un robot, se trataría de conocer la relación entre el movimiento del brazo del robot y las fuerzas que se origina. Matemáticamente relacionaría:

- 1.1. Las variables articulares y sus derivadas (velocidad, aceleración).
- 1.2. Las fuerzas y los momentos aplicados a las articulaciones.
- 1.3. Los parámetros propios del robot (longitud, masa e inercias).

El modelo dinámico para el caso de robots de uno o dos grados de libertad no es muy complejo, pero el modelado de robots con más grados de libertad aumenta en complejidad y es necesario el empleo de métodos computacionales para resolverlo. Pudiendo obtener el modelo dinámico por las técnicas de Euler-Lagrange o Newton-Euler.

Formulación de Euler-Lagrange: Se basa en el balance de energía a través del Lagrangiano. Permite describir la dinámica del robot considerándolo como una caja negra y teniendo en cuenta la energía almacenada en términos de energía cinética y potencial.

Formulación de Newton-Euler: Se basa en efectuar un balance de fuerzas y momentos o pares existentes. Para ello, se formulan las ecuaciones que describen el movimiento lineal y angular de cada eslabón del robot. [12]

1.2.2.6. Marcos coordenados

Para localizar un cuerpo rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita la localización espacial de sus puntos. En un plano el posicionamiento tiene dos grados de libertad, y por tanto la posición de un punto vendrá definida por dos componentes independientes. En el caso de un espacio tridimensional será necesario emplear tres componentes.

La forma más intuitiva y utilizada de especificar la posición de un punto son coordenadas cartesianas. Existen además otros métodos, igualmente válidos, y también ampliamente extendidos, como son las coordenadas polares para dos dimensiones, y las cilíndricas y esféricas para espacios de tres dimensiones.

Un punto queda totalmente definido en el espacio a través de los datos de su posición. Sin embargo, para el caso de un sólido, es necesario además definir cuál es su orientación con respecto a un sistema de referencia. En el caso de un robot, no es suficiente con especificar cuál debe ser la posición de su extremo, sino que en general, también es necesario indicar su orientación. Por ejemplo, en el caso de un robot que tenga que realizar sobre una pieza curva una operación de pulido, no bastaría con especificar los puntos de la superficie para situar adecuadamente la herramienta, sino que será necesario también conocer la orientación con que la herramienta ha de realizar la operación.

Una orientación en el espacio tridimensional viene definida por tres grados de libertad o tres componentes linealmente independientes. Para poder describir de forma sencilla la orientación de un respecto a un sistema de referencia, es habitual asignar solidariamente al objeto un nuevo sistema, y después estudiar la relación espacial existente entre los dos sistemas. De forma general, esta relación vendrá dada por la posición y orientación del sistema asociado al objeto respecto al de referencia. Para el análisis de los distintos métodos de representar orientaciones se supondrá que ambos sistemas coinciden en el origen, y que por tanto no existe cambio alguno de posición entre ellos. [13]

1.2.2.7. Matrices de rotación

Las matrices de rotación son el método más extendido para la descripción de orientación, debido principalmente a la comodidad que proporciona el uso de álgebra matricial. La principal utilidad de esta matriz de rotación corresponde a la representación de la orientación de sistemas girados únicamente sobre uno de los ejes principales del sistema de referencia.

Las matrices de rotación pueden componerse para expresar la aplicación continua de varias rotaciones. Así, si al sistema OUVW se le aplica una rotación de ángulo α sobre OX, seguida de una rotación de ángulo Φ OY y de una rotación de ángulo θ OZ, la rotación global puede expresarse como:

$$T = R(z, \theta)R(y, \Phi)R(x, \alpha)$$

Representando así, la rotación total del sistema. [13]

1.2.2.8. Control servo-visual

El control servo-visual se refiere al empleo de un sistema de visión para controlar el movimiento de un robot. Los datos deben adquirirse desde una cámara que se fija directamente en un robot manipulador o en un robot móvil, en cuyo caso el movimiento de un robot inducido por el movimiento de la cámara, o la cámara puede estar fija en el lugar de trabajo con una configuración estacionaria. Pueden considerarse otras configuraciones, por ejemplo, tener cámaras montadas observando el movimiento del robot el control servo-visual depende de técnicas de procesamiento de imagen, visión por computador y teoría de control. [14]

1.2.2.9. Control Discontinuo (control por modos deslizantes)

El control por modos deslizantes parte del concepto desarrollado en un control por relevador, en el cual se disponía de un cambio de estado en la señal de entrada según el signo del error. Propiciando con esto un castaño en el estado a controlar, es decir, que el sistema este oscilando alrededor de la referencia deseada, pero causando con esto una convergencia en tiempo finito, cosa que no se causa con los controles convencionales. Siendo el modelo matemático el siguiente:

$$\dot{x} = ku$$

$$u \in \{-1,1\}$$

$$x^* = \bar{x}$$

$$u = -1$$

$$\dot{x} = -k$$

$$x(t) = -kt$$

$$u = 1$$

$$\dot{x} = k$$

$$x(t) = kt$$

$$u(t) = u(\bar{x})$$

$$u(\bar{x}) = \begin{cases} 1 & x(t) < \bar{x} \\ -1 & x(t) > \bar{x} \end{cases}$$

$$u = -k * \text{sign}(x - \bar{x})$$

$$\text{sign}(\sigma) = \begin{cases} -1 & \sigma < 0 \\ 0 & \sigma = 0 \\ 1 & \sigma > 0 \end{cases}$$

Ejemplificando lo anteriormente mencionada como una ecuación diferencial en el sentido de Filippov, arrojándonos las gráficas del régimen de deslizamiento para la entrada de control y como el estado estará conmutando alrededor de la superficie de deslizamiento.

Siendo la ecuación diferencial:

$$(\dot{x} - \dot{\bar{x}}) - k(x - \bar{x})$$

Definiendo:

$$e = x - \bar{x}$$

Entonces:

$$\dot{e} + ke$$

1.2.2.10. Control por modos deslizantes de sistemas robóticos de cadena cinemática abierta

Esto aplicado a un sistema robótico de cadena cinemática abierta sería adaptándolo al modelo dinámico del sistema, proponiendo una entrada de control la cual, al desarrollarla, podamos encontrar la ecuación diferencial del error y que esta misma sea convergente a cero. Proponiendo lo siguiente:

Sea

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + g(q) = u$$

$$M(q) = D(q) + J$$

Se propone la siguiente entrada de control

$$u = M(q)\ddot{q}_r + C(q, \dot{q})\dot{q}_r + q(q) + ksign(r)$$

Con

$$r = \lambda e + \dot{e}$$

$$\lambda = \text{diag}\{\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \dots \quad \lambda_n\}$$

$$\lambda_i > 0$$

$$\dot{q}_r = \lambda e + \dot{q}^*$$

$$\text{sign}(r) = \begin{bmatrix} \text{sign}(r_1) \\ \text{sign}(r_2) \\ \vdots \\ \text{sign}(r_n) \end{bmatrix}$$

$$k = \text{diag}\{k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n\}$$

$$k_i > 0$$

1.3. Estado del Arte

Diseño de un Control Servo-Visual para Seguimiento de Trayectorias para un Robot Caminante [15]

El trabajo está enfocado en el desarrollo de un control para el seguimiento de trayectorias de un robot móvil, tales trayectorias son generadas a partir de algoritmos de visión artificial. El sistema de visión consta de una cámara fija y con condiciones de trabajo controladas, en la Figura 2.

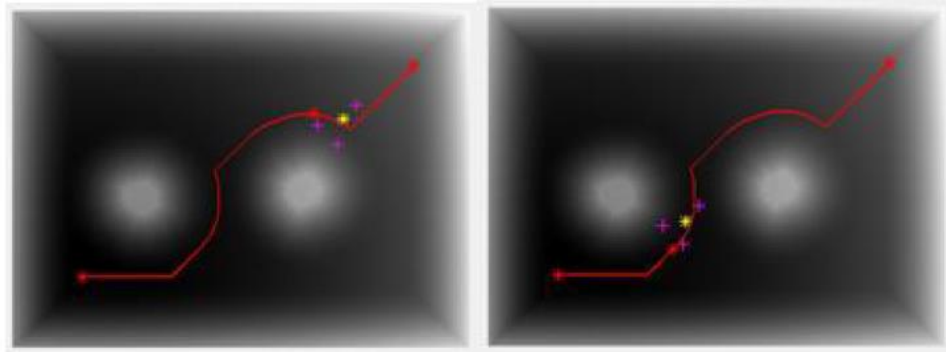


FIGURA 2.- RESULTADOS: ROBOT EN DOS PUNTOS DE LA TRAYECTORIA [15]

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Ciudad de México (2017).

Modulo Robótico para la Clasificación de Lulos (Solanum Quitoense) Implementando Visión Artificial [16]

El trabajo consiste en el diseño e implementación de un robot antropomórfico de 5 grados de libertad que integra sistemas de control, visión artificial y diseño robótico, con el fin de identificar y clasificar lulos colocados sobre una banda transportadora. En el proceso de clasificación y ubicación de lulos el sistema implementa diferentes técnicas de visión artificial, una vez identificadas las posiciones de los lulos se realiza el control necesario para llevar el efector final a la posición deseada, en la Figura 3 se pueden observar los resultados obtenidos del trabajo mencionado.

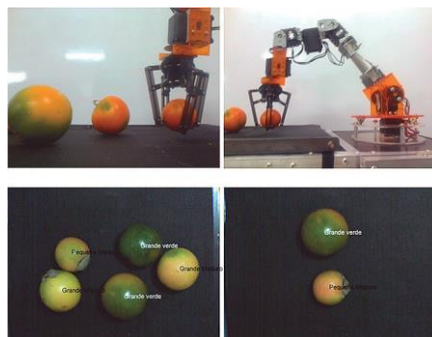


FIGURA 3.- RESULTADOS: MODULO CLASIFICADOR DE LULOS [16]

Universidad de Pamplona. Colombia (2014)

1.4. Planteamiento del Problema

La finalidad de este proyecto radica principalmente en desarrollar un sistema de control servo-visual, el cual permita detectar los puntos en los cuales sea necesario insertar tornillos de 1/2 pulgada de cabeza hexagonal, así como la dirección en la cual se deberá orientar el efector final para el correcto montaje. Siendo el objetivo la disminución de tiempo en la planeación de trayectorias a seguir por este y agregar independencia al sistema al poder calcular por sí mismo sus rutas sin necesidad de tener preprogramadas las trayectorias. Asimismo, se agregará robustez al sistema para que este se ejecute correctamente ante cualquier configuración de orientación que se aplique.

Es por lo previamente mencionado, que se necesita implementar un sistema de visión artificial que nos permita localizar los centros geométricos de los barrenos, así como, asignarles una posición dentro de un espacio tridimensional referenciado a un marco coordenado fijo. Además, se requiere implementar el control robusto en conjunto con el diseño y construcción de la estructura del brazo robótico, considerando los aspectos cinemáticos y dinámicos presentes en el sistema, de tal forma que lleve al efector final a la coordenada del centro geométrico de cada uno de los barrenos de la placa a atornillar. Siendo las principales áreas de trabajo, el sistema de visión artificial capaz de realizar todas las opciones de identificación, el sistema mecánico capaz de moverse sin ningún problema a través de todo el entorno y el sistema de control capaz de asegurarnos la exactitud en cada movimiento que realice el brazo robótico.

1.5. Propuesta de Solución

Con base en lo que se mencionó previamente en el planteamiento del problema, se propone diseñar un brazo robótico de 6 GDL que nos permita alcanzar cualquier coordenada de los centroides de los barrenos que este dentro de las dimensiones de la placa, además de contar con un sistema de visión artificial que permita localizar el centroide de los barrenos de manera automática, después el procesamiento de los mismos, deberá arrojar como resultado la mejor ruta a seguir de parte del efector final, por último deberá de aplicar el control de los motores para poder ejecutar la trayectoria obtenida.

1.6. Justificación

El desarrollo del presente proyecto está destinado a ser un prototipo para tareas de atornillado en placas metálicas, ya que se ha observado que para dichas tareas se requieren aun de recursos humanos dentro de las líneas de producción, es por esto por lo que se propone el diseño y desarrollo de un sistema el cual sea capaz de interactuar con escenarios similares a los de las líneas de producción dando como ejemplo el montaje del panel de una puerta de auto.

En la actualidad, los procesos productivos dentro del ámbito industrial se han ido automatizando con el apoyo de robots, dando como ejemplos el uso de robots dentro de áreas como son la soldadura, pintura, montaje, traslación de material, etc. Es por esta inclusión de los robots dentro de líneas de producción que se pudo notar un área de incursión, como es la colocación automática de tornillos dentro de los procesos de ensamblaje, ya que para la utilización de robots en estas áreas es necesario que se haga previamente la ubicación de los puntos donde se desea atornillar y la programación de la trayectoria a seguir por parte de

los efectores finales que les dé la orientación requerida para realizar el atornillado, si el robot utilizado no logra realizar estas tareas por sí mismo deja de ser una opción viable debido a que la programación de rutas conllevaría una gran inversión de tiempo, además de que quedaría limitado al no poder ser capaz de identificar su entorno. Al ser un sistema tan autónomo como para identificar e interactuar con el entorno podría fácilmente adaptarse a una línea de producción en donde aún no se encuentre automatizado el proceso o ayudar en tareas repetitivas pero que siempre involucran cambios dentro del entorno.

1.7. Objetivos

1.7.1. General

Diseñar y manufacturar un brazo robótico de 6 Grados de Libertad guiado a través de técnicas de visión artificial capaz de atornillar en placas metálicas de 50x50cm con barrenos tornillos de ½ pulgada con cabeza hexagonal.

1.7.2. Específicos

- Diseñar y construir los eslabones que conforman el sistema mecánico del brazo robótico para el movimiento del efector final a través del área de trabajo para el atornillado en las placas metálicas de 50x50cm.
- Diseñar e implementar el sistema de visión artificial para la identificación de puntos a atornillar y la generación automática de trayectorias a seguir por el brazo robótico para realizar el atornillado.
- Diseñar e implementar el sistema de control no lineal para para el seguimiento de la trayectoria generada.
- Diseñar e implementar la electrónica de potencia para el suministro de la energía al sistema electromecánico.
- Desarrollar la interfaz gráfica para monitorear el movimiento del brazo robótico y los sistemas de control de tal forma que el usuario pueda verificar el trazado de la ruta para el efector final.
- Diseñar e implementar el sistema de comunicación entre el brazo robótico y el sistema de control servo-visual para la comunicación entre el sistema mecánico y el sistema de visión artificial.
- Seleccionar el efector final adecuado para la realización para la realización de la tarea de atornillado.

1.8. Metodología

Dentro de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, se consideró el uso del diseño mecatrónico el cual comprende a la mecatrónica en sí, que se define como la integración sinérgica de la ingeniería mecánica, electrónica, software y control, aunado así con el diseño y fabricación de productos y procesos de la industria.

El propósito de llevar acabo el diseño mecatrónico es poder reducir los tiempos y costos del diseño, llevar un orden de actividades tomando en cuenta las diferentes áreas que integran al mismo y, sobre todo, lograr

una mayor integración de este, dejando productos de mayor calidad y eficiencia, cumpliendo con las siguientes características:

- **Confiable:** Un manejo fácil del producto que procure prolongar la vida de este.
- **Modular:** Debe ser capaz de ser integrado en sistemas de mayor magnitud o que contengan varios sistemas menores.
- **Alto rendimiento:** Capaz de realizar operaciones de manera repetitiva sin comprometer mucho su tiempo de vida.
- **Bajo costo:** Debe ser capaz de realizar las actividades para la cual fue diseñada sin aumentar el costo en la producción del producto para la cual será empleada la máquina.

La metodología mecatrónica por lo anteriormente mencionado será utilizada constando de 5 fases establecidas, la Figura 4 muestra un diagrama que ejemplifica la metodología a seguir para el diseño del brazo robótico.

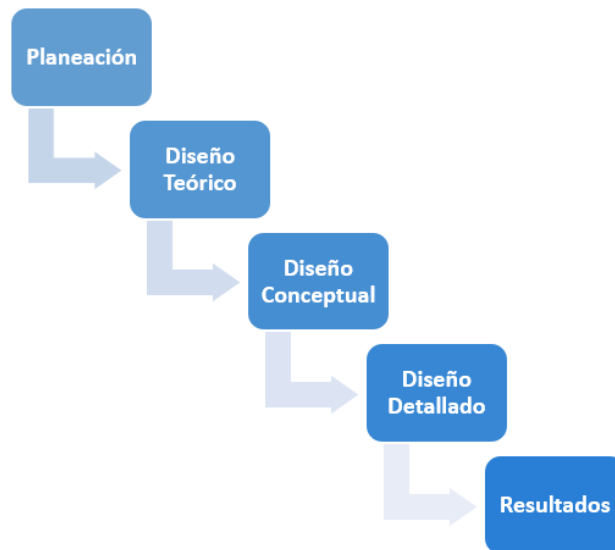


FIGURA 4.- ESTRUCTURA DEL DISEÑO MECATRÓNICO

- **Planeación:** Esta etapa tiene como finalidad esclarecer los objetivos y alcances del producto, así como llevar a cabo estimaciones del tiempo y presupuesto.
- **Desarrollo del concepto:** Esta fase busca reunir información que contribuya a la concepción de una imagen, o varias, de lo que puede resultar en el producto final, sin ahondar en detalles del diseño específico.
- **Diseño a nivel sistema:** En este punto se definen a grandes rasgos los sistemas que tendrá el producto final, definiendo en sí características que permitan llevar a la integración de estos, por ejemplo, definiendo cajas negras.
- **Diseño a detalle:** En esta etapa se definen características internas que integran un subsistema, como lo son componentes, medidas, tolerancias, etc., dejando de este modo a todos los subsistemas completamente definidos.

- Pruebas: En esta etapa se pretende hacer la integración de todos los sistemas que constituyen al producto, se determina si los resultados obtenidos fueron alcanzados y dan pie a la generación de la conclusión del proyecto.

Así mismo, fueron utilizadas varias técnicas para implementar de forma correcta el diseño mecatrónico, las cuales fueron:

Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt se utiliza para planificar y programar tareas a lo largo de un período establecido. Esto con la ayuda de su fácil y cómoda visualización de las acciones ya dichas a realizar, además de que permite darle el seguimiento correcto, así como el control de cada uno de los progresos en las diferentes áreas del proyecto.

Es muy utilizado ya que es de gran ayuda al simplificar la visualización de tareas y representar todas las etapas y actividades de un proyecto, administra proyectos, reduce problemas de tiempos y es fácil identificar puntos críticos dentro de él.

Ruta crítica

Se denomina ruta crítica al método que se usa para calcular los tiempos de planificación de un proyecto. Se trata de una idea que busca optimizar y hacer más eficiente el proyecto en el ámbito de los costos a partir de la programación de las acciones.

PDS

Por sus siglas en inglés Products Design Specification, es un documento que ayuda a decidir de forma correcta y a detalle qué es lo que se necesitará de un producto antes de ser creado. Muchas empresas no trabajan este tipo de especificaciones y por esto no están plenamente en control de lo que producen.

El PDS también apoya a la gente que realiza el diseño de los productos, lo cual tiene grandes beneficios tanto para ellos como para los consumidores, ya que es un tipo de análisis de lo que el mercado necesita y, por ende, su demanda aumenta.

Matriz Morfológica

La matriz morfológica es una de las muchas técnicas para generar gran cantidad de ideas en un tiempo estimado de tiempo. Consiste básicamente en descomponer un concepto con sus características o atributos, para lo cual nosotros construimos una matriz que nos permita multiplicar las relaciones entre las diferentes partes.

2. ANÁLISIS Y DISEÑO

2.1. División por Disciplinas

Para realizar el diseño detallado del robot se determinó su división en las siguientes disciplinas:

- Sistema Mecánico
- Sistema de Visión Artificial
- Sistema de Control
- Sistema de Electrónica de Potencia

La representación de los sistemas quedaría de la siguiente manera:

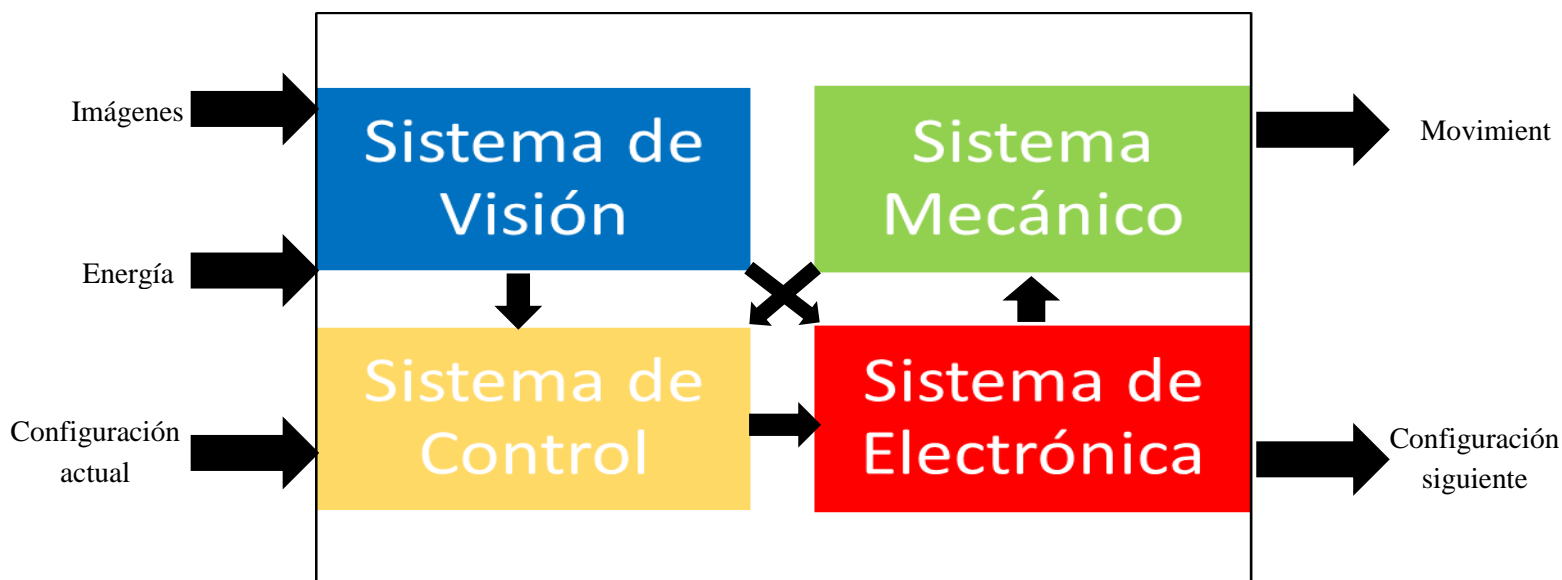


FIGURA 5.- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA DIVISIÓN POR DISCIPLINAS

Sistema de visión artificial

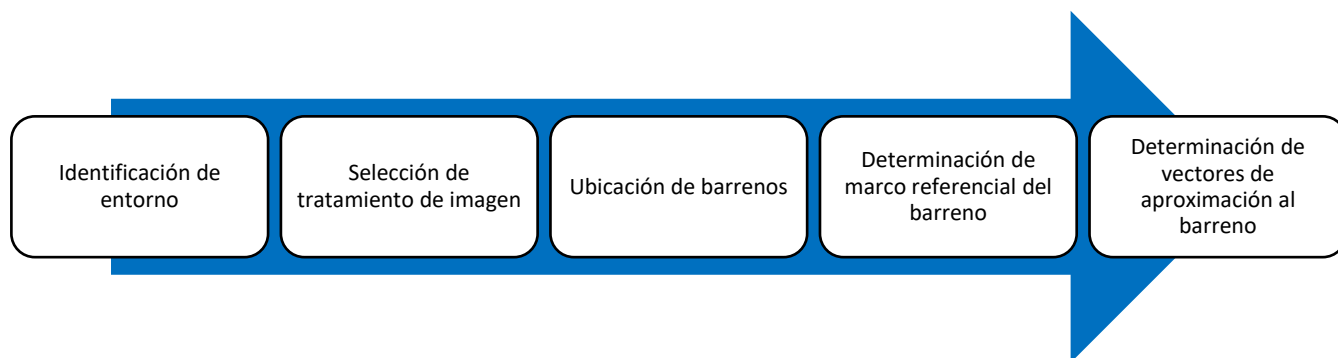


FIGURA 6.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE VISIÓN

En la identificación de entorno, se planea visualizar por medio de sensores independientes, tanto como por la cámara, la calidad de luz que se encuentra en el entorno de trabajo incluyendo también el tipo de placa que se planea atornillar, esto con la finalidad de identificar las variables de acción de trabajo.

Después de identificar las variables de acción de trabajo se procederá a realizar la selección del tratamiento de imagen, esto dependiendo de las condiciones de luz obtenidas a través de los sensores anexos a la cámara como de la calidad de imagen que exhiba una fotografía de prueba, dichos tratamientos tendrán que ser seleccionados mediante a la prueba de la cámara en diversas condiciones de luz para generar una tabla de criterios, la cual será anexada a la programación del sistema de visión, esto con la finalidad de poder aplicar técnicas de visión artificial y que entregue la menor cantidad de errores posibles respecto a la realidad. Además de esto, se implementará un sistema de amortiguamiento del efecto barril de las cámaras para la corrección del efecto de curvatura dentro de las fotografías tomadas.

Al tener las fotografías corregidas, se procederá a implementar un algoritmo de análisis de imágenes para identificar cuantos barrenos existen dentro del espacio de trabajo, así como el tamaño de estos y la exclusión de partes de la imagen que sean ruido o errores en la toma. Con la finalidad de saber qué puntos de la imagen deben de ser analizados y tratados como objetivos de interacción.

Una vez detectados los objetivos de interacción, se procederá a detectar el marco referencial del barreno, el cual incluirá la posición del barreno respecto del brazo robótico; del mismo modo que la orientación en la que tendrá que manipularse el efector final para la correcta introducción del tornillo dentro del barreno.

Desarrollando con esto, los puntos a seguir del efector final para la creación automática de la ruta de seguimiento de este mismo. Creando así los vectores de aproximación del efector final basándose en la posición inicial de este para la introducción del tornillo, y la posición final de este mismo para cuando el tornillo haya sido completamente ensamblado.

Sistema mecánico

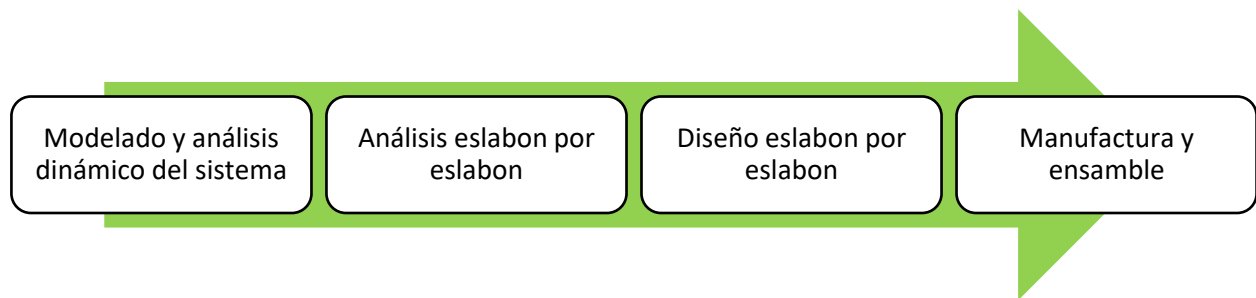


FIGURA 7.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA MECÁNICO

En modelado y análisis dinámico del sistema tendremos que modelar el sistema a partir de las ecuaciones de Newton-Euler como los elementos solidos que son, esto sin considerar aun las dimensiones exactas que estos tendrán, pero si considerando una geometría aproximada de los elementos que lo conforman. Esto con la finalidad de obtener las ecuaciones que rigen las fuerzas a las que estarán sometidas cada articulación, y por ende cada extremo de los eslabones.

Una vez obtenidas estas fuerzas, pasaremos al análisis de eslabón por eslabón. Conociendo como está constituida cada componente de fuerza aplicada en estos, podremos determinar cuáles son los principales

componentes que influyen en estas y como repercutirían en la misma deformación de los eslabones, considerando que la deformación de estos se verá principalmente por la misma composición del sistema y no por la fuerza que tenga que aplicar en el efector final.

Una vez empezado este proceso, culminaremos el proceso de diseño seleccionando de manera precisa las dimensiones correctas de cada eslabón, así como las formas que estos precisan debido a la posición de ejes, articulaciones, motores, etc. Evaluando cada eslabón bajo los criterios de diseño de resistencia, rigidez torsional y rigidez lateral, y optando por el que otorgue mejores características mecánicas a todo el sistema en conjunto. Como propuesta inicial para la disposición de las articulaciones y eslabones del brazo robótico, se tiene la siguiente configuración:

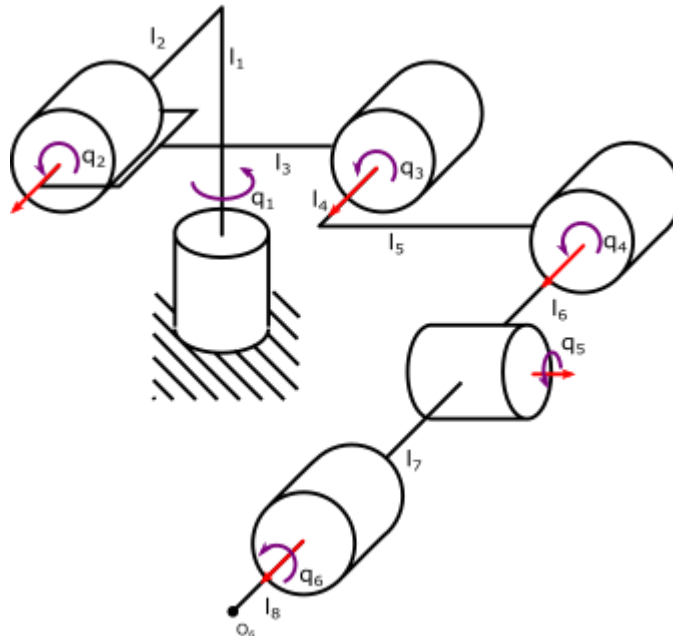


FIGURA 8.- REPRESENTACIÓN DE ROBOT DE 6GDL

Una vez culminado el proceso de diseño, procederemos a manufacturar las piezas respectivas que de este salgan, con las especificaciones que fueron marcadas durante el proceso. Teniendo todas las piezas en norma, se ensamblará todo el sistema mecánico para la posterior adición de los demás sistemas que competen al proyecto.

Sistema de control

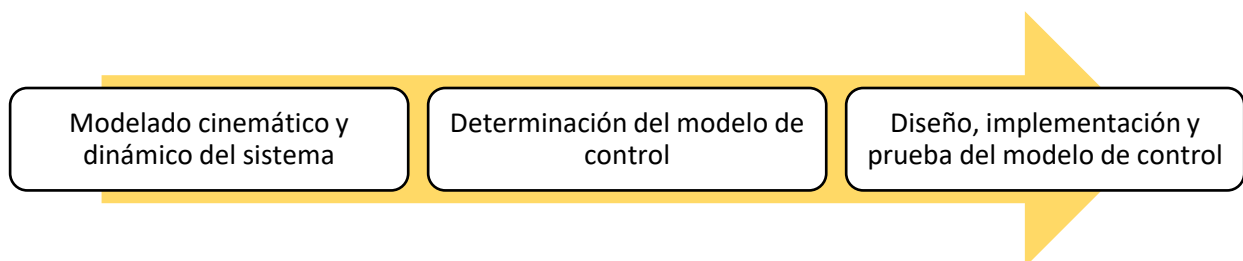


FIGURA 9.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE CONTROL

En la operación de modelado cinemático y dinámico del sistema, modelaremos el brazo robótico según los parámetros obtenidos en el diseño mecánico, esto con la finalidad de entender el sistema y poder obtener las ecuaciones cinemáticas inversa de nuestro sistema para poder aplicar un control cinemático para cada uno de los puntos de la ruta que se vayan a evaluar dentro de la posición de tornillos. Obteniendo también el modelo dinámico a partir de las ecuaciones de Euler-Lagrange.

Una vez obtenido el modelo dinámico del sistema, se procederá a determinar el mejor esquema de control que se pueda implementar el sistema para obtener la mayor exactitud posible, debido a que el sistema será no lineal se deberán de observar todas las posibilidades, evaluando si es mejor optar por un esquema de control convencional o uno no convencional.

Al seleccionar el esquema de control tendremos que ver como se adapta a nuestro sistema y en base a esta adaptación seleccionar los parámetros adecuados que lo conforman para la rápida y correcta manipulación del sistema, una vez seleccionados dichos parámetros, tendremos que buscar la mejor manera de implementarlo digitalmente dentro del sistema de electrónica. Al termino de dichas operaciones, acoplarlo al sistema mecánico y realizar las pruebas pertinentes de que efectivamente alcanza los objetivos previstos, de lo contrario se tendrá que pensar en un seleccionar un distinto modelo de control para repetir los pasos previamente mencionados.

Sistema de electrónica

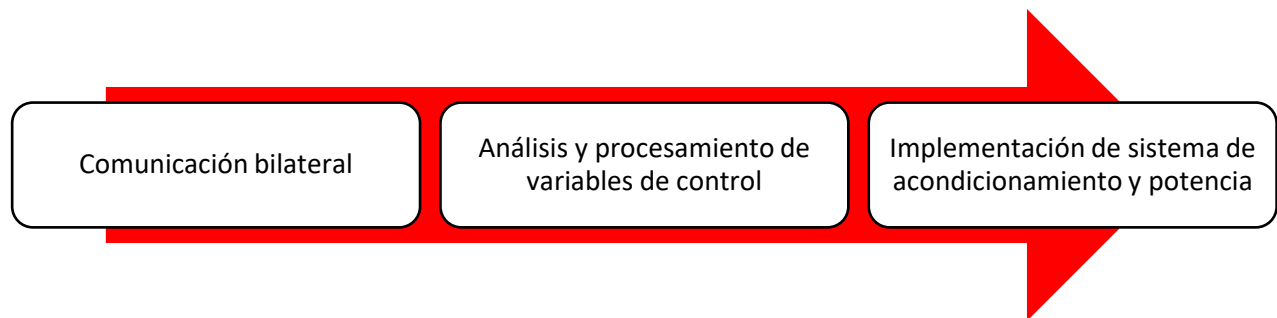


FIGURA 10.- DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE ELECTRÓNICA

En el proceso de comunicación bilateral se procederá a implementar buffers los cuales puedan alternar entre las señales de información que el sistema proveerá a la computadora donde estará almacenado el sistema de visión, además de estar recibiendo los valores de junta necesarios para las posiciones deseadas a llegar por parte del sistema de visión y almacenando dicha información en bancos de memoria para posteriormente enviarlas al siguiente módulo de electrónica, el cual consiste en la implementación del control.

Dentro del módulo encargado del análisis y procesamiento de variables de control, estarán a cargo diversos microcontroladores cuya tarea será del procesamiento de las ecuaciones de control, así como del monitoreo de los sensores que estarán captando continuamente las posiciones de los eslabones de nuestro brazo robótico. Acondicionando y adaptando todas estas señales a un esquema de control digital de rápida conmutación que pueda darnos los valores necesarios de voltaje para ingresar en la etapa de potencia.

Terminando con el módulo de implementación de acondicionamiento y potencia, el cual será encargado de suministrar la potencia necesaria a cada uno de los motores para el correcto funcionamiento de velocidad y posición de cada articulación.

2.2. Requerimientos de Diseño

Los requerimientos de diseño que se requieren para el brazo robótico son los siguientes





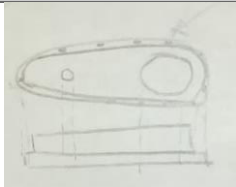

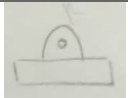
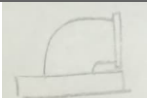
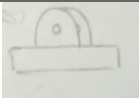
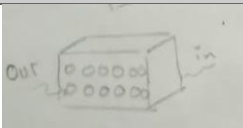
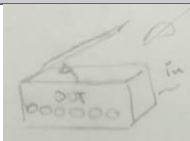
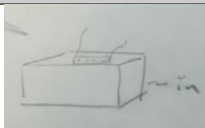
TABLA 1.- TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Demanda (D) / deseo (d)	Requerimientos
D	Grados de Libertad <ul style="list-style-type: none"> ○ 3 GDL para Posición ○ 3 GDL para Orientación
D	Dimensiones para Área de Trabajo <ul style="list-style-type: none"> ○ Altura: 75 cm. ○ Largo: 50 cm. ○ Ancho: 50 cm.
D	Masa: 5 kg
D	Sistema de Visión Artificial <ul style="list-style-type: none"> ○ Implementar la medición de luminosidad. ○ Aplicar un filtro a la imagen. ○ Localizar el centroide de los barrenos.
D	Sistema de Control <ul style="list-style-type: none"> ○ Control de posición para cada motor. ○ Control de Lazo Cerrado.
D	Alimentación <ul style="list-style-type: none"> ○ 12 [VCD]. ○ 5 [A].
D	Características del Eslabón <ul style="list-style-type: none"> ○ Estar unidos con tornillería. ○ Ocultar el cableado de los motores.
D	Interfaz de Usuario <ul style="list-style-type: none"> ○ Mostrar ángulo y error de cada GDL. ○ Mostrar centroides de los barrenos.
D	Mantenimiento <ul style="list-style-type: none"> ○ Diseño modular. ○ Facilidad para reposición de componentes.
D	Seguridad <ul style="list-style-type: none"> ○ Botón de paro en Interfaz. ○ Botón de paro Manual.

2.3. Diseño Conceptual

Para el desarrollo del diseño conceptual se determinó principalmente los aspectos de forma dentro de los manipuladores como lo son la forma de los eslabones, de la base, de la primera junta y del gabinete, tal como se presenta en la matriz morfológica a continuación, la cual consta de 3 opciones para cada aspecto.

TABLA 2.- MATRIZ MORFOLÓGICA

Opción 1	Opción 2	Opción 3
Eslabones		
		
Base		
		
Junta del primer grado de libertad		
		
Gabinete de control		
		

Tomando como referencia la matriz morfológica de la tabla anterior, se proponen los siguientes 3 diseños conceptuales, de los cuales se analizaron sus respectivas ventajas y desventajas como a continuación se presenta:

Opción 1

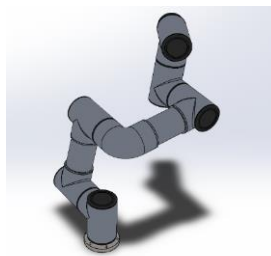


FIGURA 11.- PROPUESTA DE DISEÑO OPCIÓN 1

Opción 2

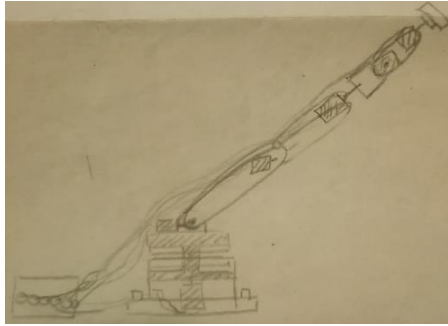


FIGURA 12.- PROPUESTA DE DISEÑO OPCIÓN 2

Opción 3

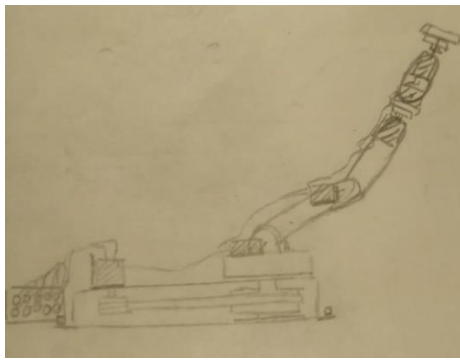


FIGURA 13.- PROPUESTA DE DISEÑO OPCIÓN 3

Opción 1

- **Ventajas**
 - Accesibilidad para la obtención de tubos para la constitución de los eslabones.
 - Base requiere pocos pasos para su proceso de fabricación, además presenta gran estabilidad para los pesos que deberá soportar el sistema.
 - Gabinete de control permite orden en los sistemas de cableado.
 - Permite ocultar los actuadores dentro del propio sistema.
 - Reducción de material y por lo tanto peso en el sistema.
 - Los eslabones huecos permiten mayores cargas de flexión y torsión en el sistema.
- **Desventajas**
 - Juntas requieren de una gran variedad de procesos para su manufactura.
 - Poca accesibilidad al sistema de cableado para identificación de fallas.

Opción 2

- **Ventajas**
 - Se requiere de una menor cantidad de procesos de manufactura para la construcción de los eslabones, base y juntas.
 - Menor masa en los eslabones.
 - El gabinete de control permite identificación de fallas en el sistema.

- **Desventajas**
 - El sistema podía presentar poca estabilidad y necesitar uniones intermedias entre los eslabones, lo que podría provocar que el sistema se vuelva más pesado.
 - Los actuadores podrían quedar expuestos al operador.
 - Gran cantidad de cables dentro del sistema.
 - la base puede presentar una gran concentración de esfuerzos debido a su forma.
 - La base no provee de estabilidad al sistema.

Opción 3

- **Ventajas**
 - El sistema es rígido.
 - La base al tener una mayor área de contacto con de suelo provee de mayor estabilidad el sistema.
 - Se requiere de una menor cantidad de procesos de manufactura para la construcción de los eslabones y juntas.
 - El gabinete permite una identificación de fallas en el sistema de cableado y orden.
- **Desventajas**
 - El sistema se vuelve más pesado al hacer uso de un material rígido para la constitución de los eslabones.
 - Actuadores quedan expuestos al operador.

Con base en el anterior análisis de ventajas y desventajas de cada uno de los diseños conceptuales propuestos, el diseño que es elegido es el correspondiente a la opción 1, debido a que es la opción que permite al sistema tener un menor peso, un mejor acomodo del cableado y mejor colocación de los actuadores dentro del sistema de manera tal que no estén expuestos al operador.

2.4. Diseño Detallado

2.4.1. Análisis cinemático del robot de seis grados de libertad

El análisis cinemático se obtuvo a través de la metodología de Denavit-Hartenverg, la cual ha sido explicada en el marco teórico descrito anteriormente, en la Figura 14 se presenta la disposición de los ejes dentro del sistema.

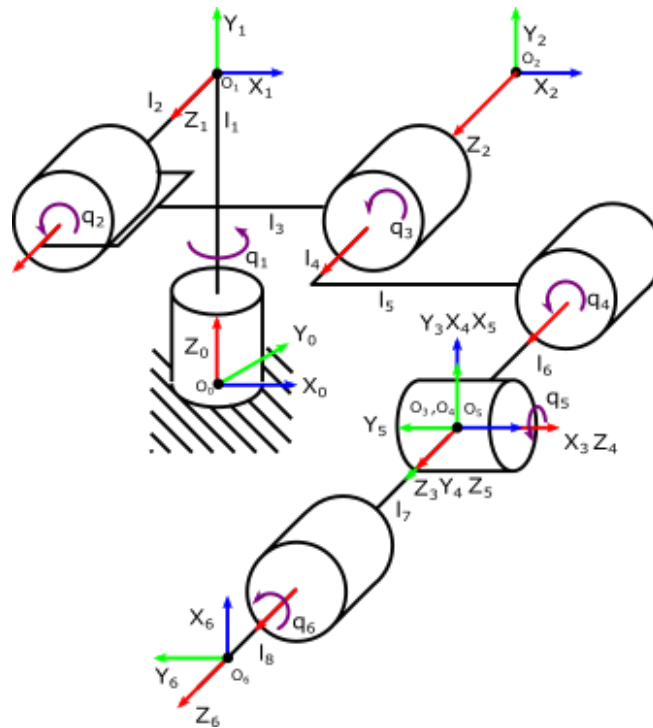


FIGURA 14.- DISPOSICIÓN DE MARCOS COORDENADOS SIGUIENDO METODOLOGÍA DENAVIT-HARTENVERG

Una vez con los marcos asignados en el sistema se obtuvieron los parámetros α_i , a_i , d_i y θ_i presentes en el sistema, estos son presentados en la Tabla 1.

TABLA 3.- PARÁMETROS α_i , a_i , d_i Y θ_i DEL ROBOT

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\pi/2$	0	l_1	q_1
2	0	l_3	0	q_2
3	0	l_5	$l_2 + l_4 + l_6$	q_3
4	$\pi/2$	0	0	$q_4 + \pi/2$
5	$-\pi/2$	0	0	q_5
6	0	0	$l_7 + l_8$	q_6

Con los parámetros obtenidos, se programó posteriormente dentro del ambiente de Wolfram Mathematica un algoritmo con el cual al ingresar los valores numéricos de los parámetros anteriormente mencionados de como resultado las matrices de transformación.

2.4.2. Análisis dinámico del robot de seis grados de libertad

Una vez obtenidos todos los parámetros de la cinemática del robot y las matrices de transformación correspondientes, se prosiguió a calcular las ecuaciones dinámicas del robot. Utilizando las fórmulas del Jacobiano de cada articulación y centro de masa de cada eslabón:

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1}^0 x(d_n^0 - d_{i-1}^0) \\ z_{i-1}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{vi} \\ J_{\omega i} \end{bmatrix}$$

Con los Jacobianos del sistema se calculó la matriz de inercia “ $D(q)$ ” con base a los momentos principales de inercia y masa de los eslabones. Utilizando la ecuación:

$$D(q) = \sum_{i=1}^n m_i J_{vi}^T J_{vi} + J_{\omega i}^T R_i^0 I_i (R_i^0)^T J_{\omega i}$$

Y una vez obtenida la matriz de inercia, se calculó la matriz de Coriolis “ $C(q, \dot{q})$ ” con los símbolos de Christoffel, esto se hizo utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Ch_{ijk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial D_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial D_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial D_{ij}}{\partial q_k} \right)$$

$$C(k, j) = \sum_{i=1}^n Ch_{ijk} \dot{q}_i$$

Finalmente, se concluyó al obtener el vector de gravedad “ $G(q)$ ”, siendo esto formado por:

$$P = \sum_{i=1}^n m_i g^T d_{cmi}$$

$$G(i) = \frac{\partial P}{\partial q_i}$$

Con las matrices obtenidas anteriormente y asignando valores numéricos se procedió al desarrollar el diseño mecánico del sistema.

2.4.3. Diseño mecánico

Después se realizó el diseño de la base del robot, la cual deberá poseer la integridad mecánica para sujetar todo el sistema, además deberá considerarse que esta pieza tendrá la característica de soportar todo el movimiento de la primera articulación del robot. El diseño obtenido se muestra en la Figura 15.

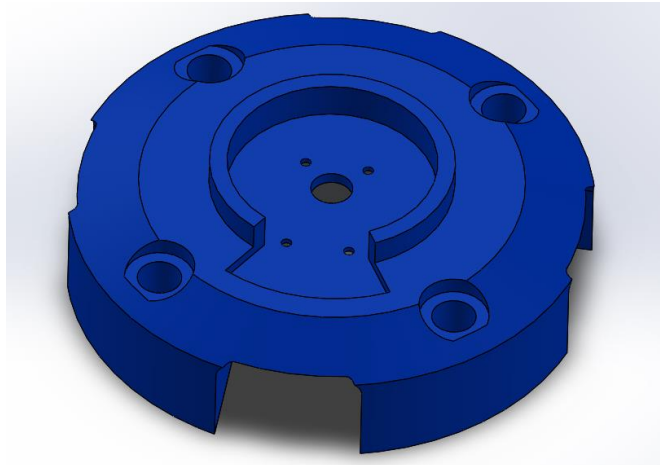


FIGURA 15.- DISEÑO DE BASE

Para el diseño del primer eslabón se consideró que se necesitaría tener la rigidez mecánica suficiente para no sucumbir ante la flexión ocasionada por el cuerpo del robot, siendo además la pieza receptora de la reacción del torque de la articulación número dos, además de incluir un sistema de acoplamiento para el motor que dará el movimiento a la primera articulación. El diseño propuesto se muestra en la Figura 16.

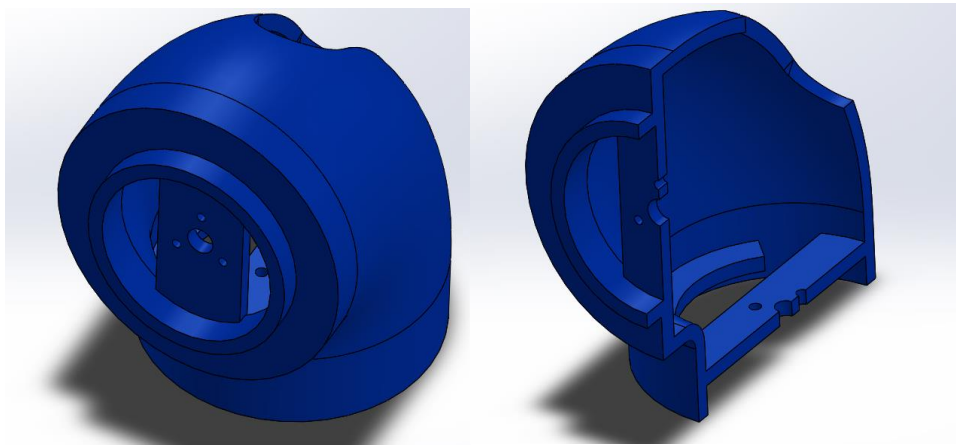


FIGURA 16.- DISEÑO DE ESLABÓN 1

Al tener las medidas aproximadas del robot se realizó el cálculo del torque necesario para cada una de las articulaciones, siendo las articulaciones con mayor torque las del segundo y tercer grado de libertad debido a las distancias que existen entre ellas y la distancia entre la tercera y cuarta. Por este motivo se necesitó tener en cuenta otro tipo de motores con mayor torque para el diseño de los eslabones de estas articulaciones, siendo mostrado el diseño final en la Figura 17.

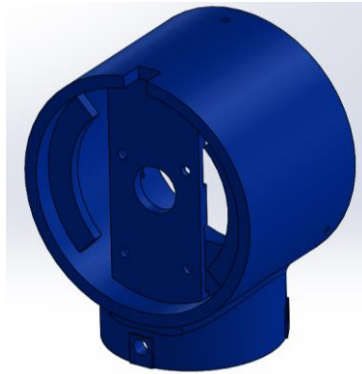


FIGURA 17.- DISEÑO CUERPO DE MOTOR 2 Y 3

Para realizar el diseño del codo se consideró que su única función es realizar la rotación de 90° del tercer eje de libertad hacia el cuarto. Este codo deberá contar con la menor cantidad de masa posible para así no afectar con el torque de la segunda articulación, además de contar con la capacidad de resistir todo el torque y ser estéticamente correcto, el diseño final es el mostrado en la Figura 18.

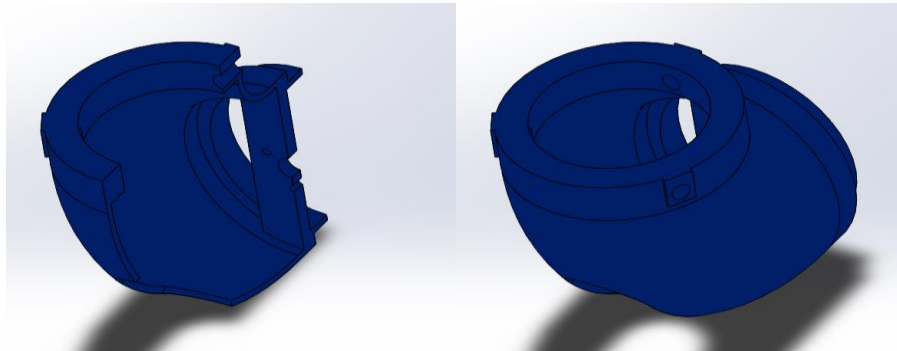


FIGURA 18.- DISEÑO CODO

La cuarta articulación deberá de acoplarse al antebrazo, además deberá tener con la capacidad de acoplar un motor, cuyo torque sea suficiente para mover a todos los eslabones restantes y resistir las reacciones de sus movimientos, además deberá crear un cambio de geometría para disminuir el volumen y por ende la masa de las últimas articulaciones. El diseño propuesto es el mostrado en la Figura 19.

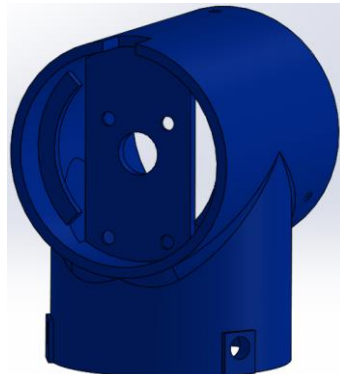


FIGURA 19.- DISEÑO CUERPO MOTOR 4

Para el diseño de las últimas dos articulaciones, se propuso un diseño con el cual pudiéramos cumplir los requerimientos necesarios para realizar el desacoplamiento cinemático. Por lo cual tuvimos que proponer un pequeño codo para acoplar el cuerpo del motor 4 con el diseño de un eslabón en “L” para los últimos dos motores, mostrando el codo en la Figura 20 y el eslabón en “L” en la Figura 21.

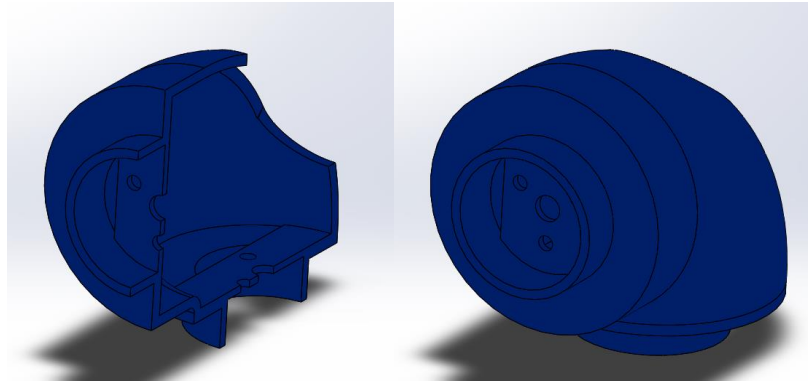


FIGURA 20.- DISEÑO DE CODO PARA ARTICULACIÓN 4

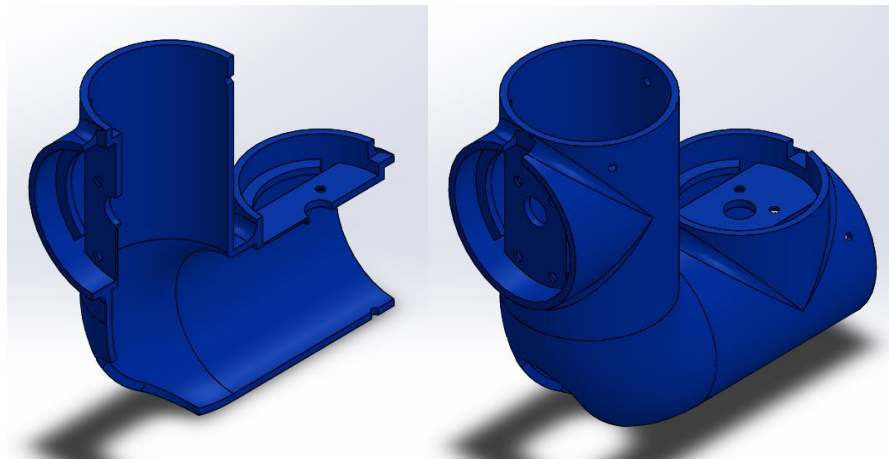


FIGURA 21.-DISEÑO DE CUERPO PARA MOTOR 5 Y 6

Para el diseño del cuerpo que contendría el efector final, se decidió optar por un diseño de dos piezas, un cuerpo que fuera ensamblado a la última articulación del robot y una tapa, la cual contendría el motor entrando a presión para fijarla al cuerpo. Dando como resultado las piezas mostradas en la Figura 22.

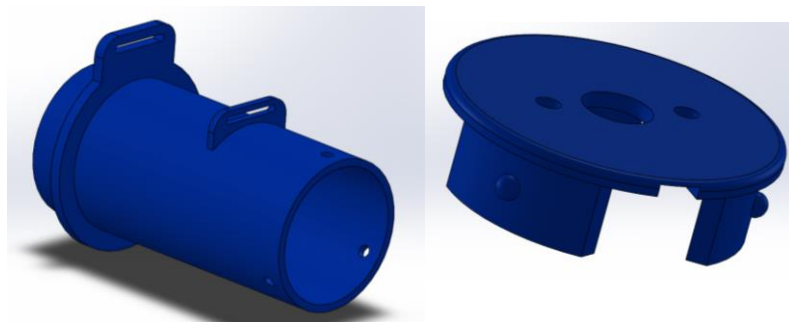


FIGURA 22.-DISEÑO DE CUERPO PARA EFECTOR FINAL

Dejando en el cuerpo del efector final pestañas capaces de retener la pieza que contendrá la cámara y además servirá como receptor del giroscopio para la calibración inicial, dando como resultado la pieza mostrada en la Figura 23.

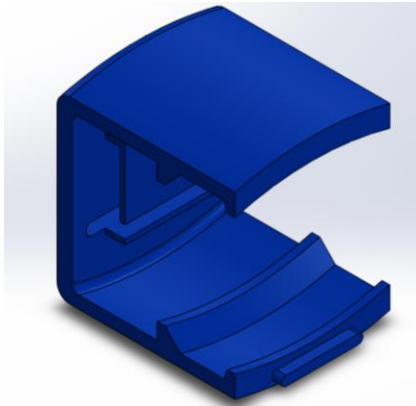


FIGURA 23.-DISEÑO DE SUJETADOR PARA CÁMARA WEB

Para complementar el diseño del robot y además poder incluir calibradores para cada articulación, se propusieron tapas de servicio en cada cuerpo contenedor de motores. Para ahorrar peso en tornillería y en complejidad de diseño, dichas tapas se propusieron para entrar bajo presión, dando como resultado el diseño mostrado en la Figura 24.

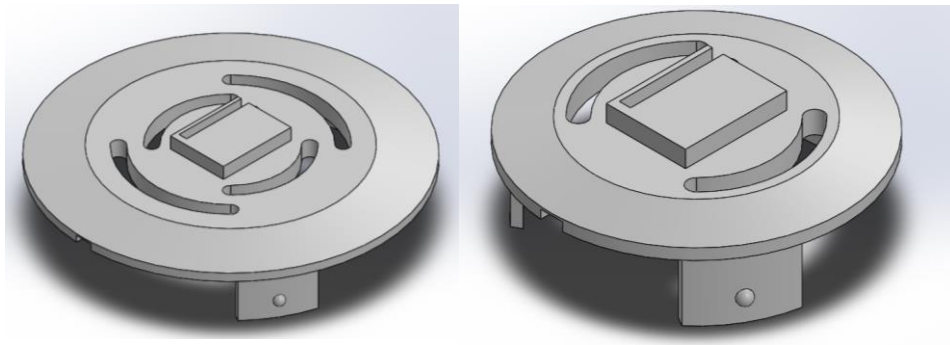


FIGURA 24.-DISEÑO DE TAPAS

Cabe mencionar que todas las geometrías fueron escogidas para que se cumplieran las metas del diseño conceptual, las cuales son que el brazo robótico no tenga limitantes en sus movimientos por su propia estructura, sino que este se viera únicamente limitado por cuestiones matemáticas, mostrando el ensamblaje final en la Figura 25.

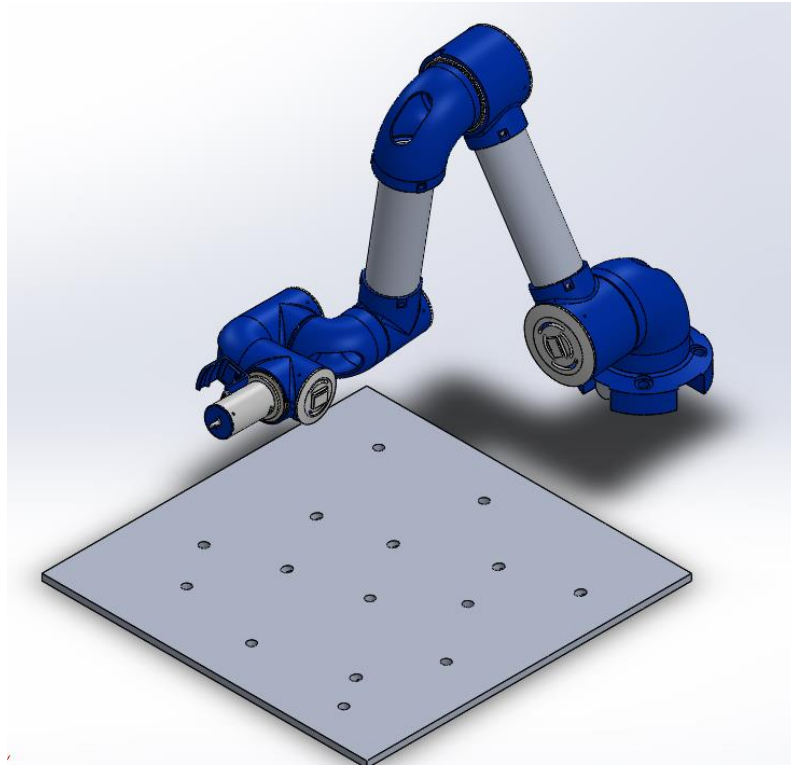


FIGURA 25.- ENSAMBLE FINAL DE BRAZO ROBÓTICO

2.4.4. Selección de materiales

Para la selección de materiales se consideró utilizar aluminio, debido a su resistencia a la flexión y por presentar una densidad muy baja, lo cual permitiría un menor torque por cada articulación. Pero debido a la complejidad de las piezas que fueron propuestas en el diseño mecánico y los costos implicados para la manufactura se consideró un material diferente.

Por este motivo se decidió analizar el PLA como material para los eslabones, debido a que la manufactura puede ser realizada por impresión en 3D. Si bien este tipo de proceso puede generar un material no isotrópico, se pueden compensar las características no lineales de la pieza con un buen diseño mecánico, el cual nos permitirá tener factores de seguridad altos para asegurar que la pieza no fallará por algún tipo de discontinuidad del material, aunado a esto, se consideró que el brazo robótico no será un sistema de carga, sino únicamente de ensamblaje, por lo tanto, no estará expuesto a esfuerzos mayores que los generados por el peso de los componentes del sistema. Para corroborar lo anterior, se realizó un análisis estático total del ensamblaje con todas las cargas que estará soportando el brazo robótico y en la posición de máxima flexión de este, los resultados se muestran en la Figura 26. Cabe mencionar que el esfuerzo mayor no se concentra en los eslabones, sino en el eje del motor del tercer grado de libertad, mostrado en la Figura 27.

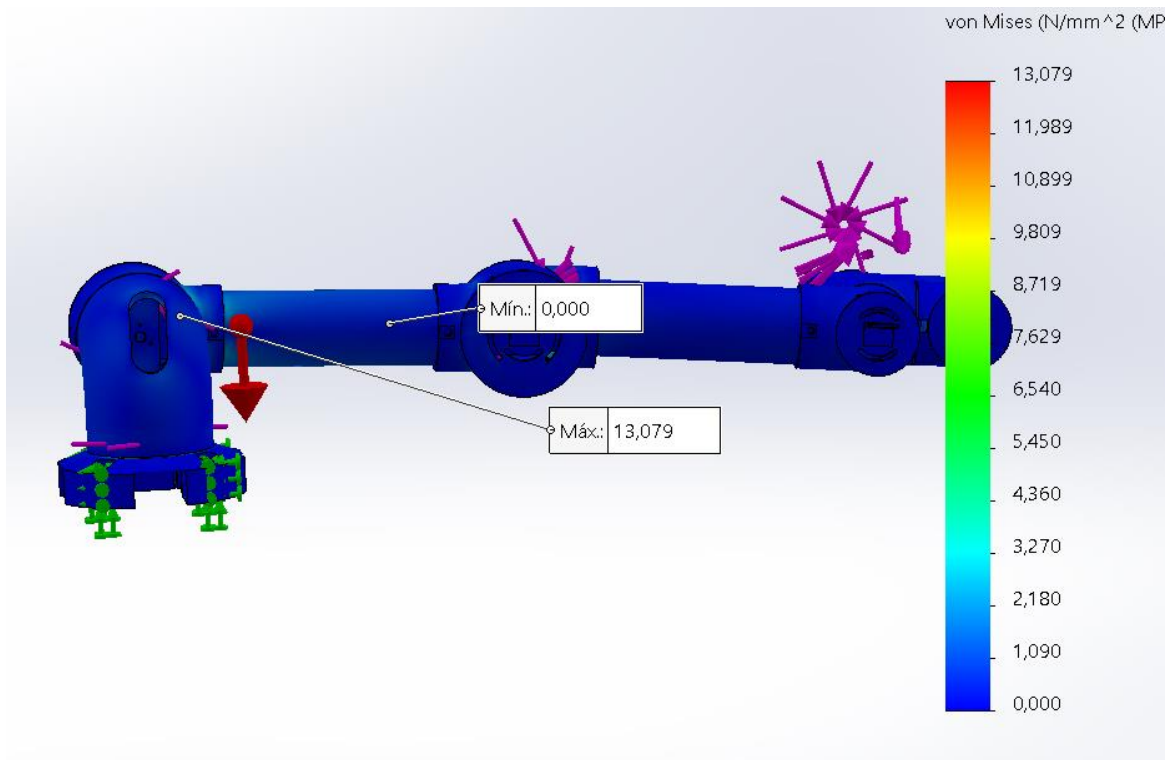


FIGURA 26.- ANÁLISIS ESTÁTICO DE SISTEMA MECÁNICO

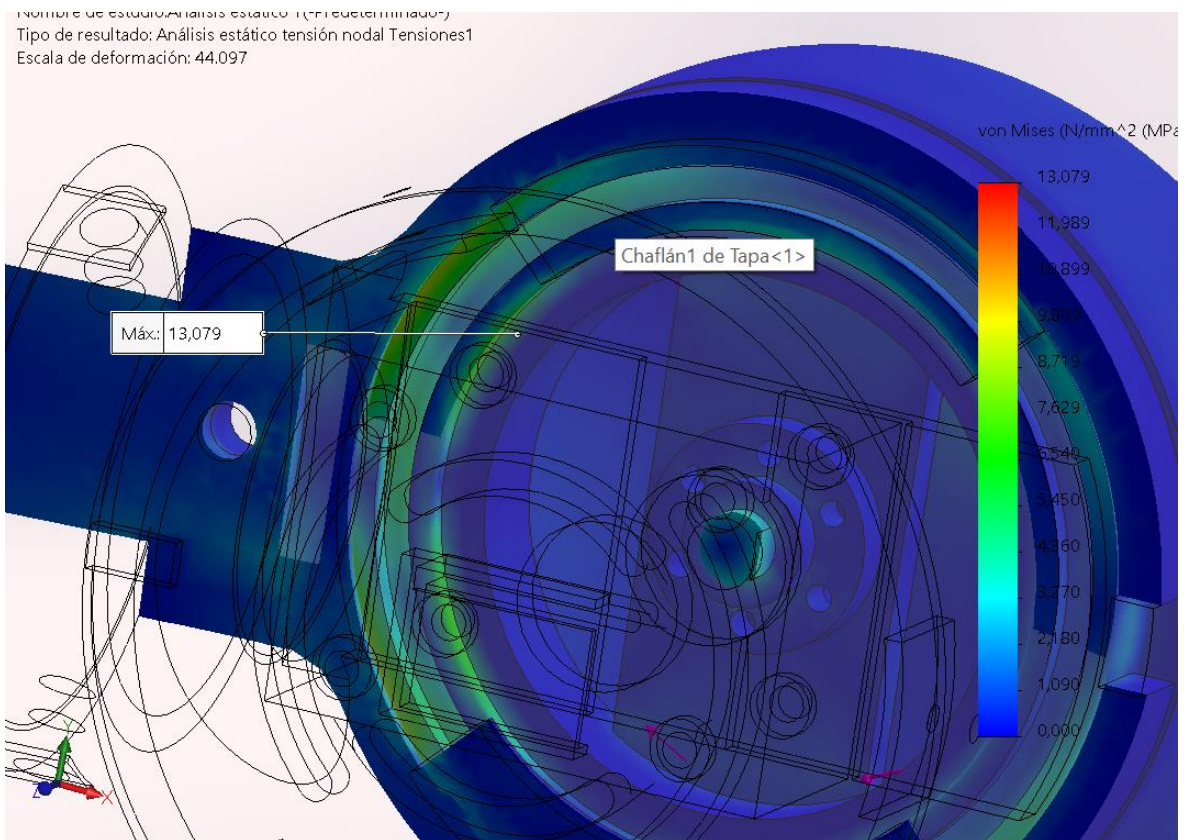


FIGURA 27.- ESFUERZO MÁXIMO PRESENTADO EN ANÁLISIS ESTÁTICO

Debido a que el factor de seguridad mínimo será de 4.22, se determinó que el sistema no tendrá una falla mecánica durante su operación, mostrando los resultados de los factores de seguridad en la Figura 28.

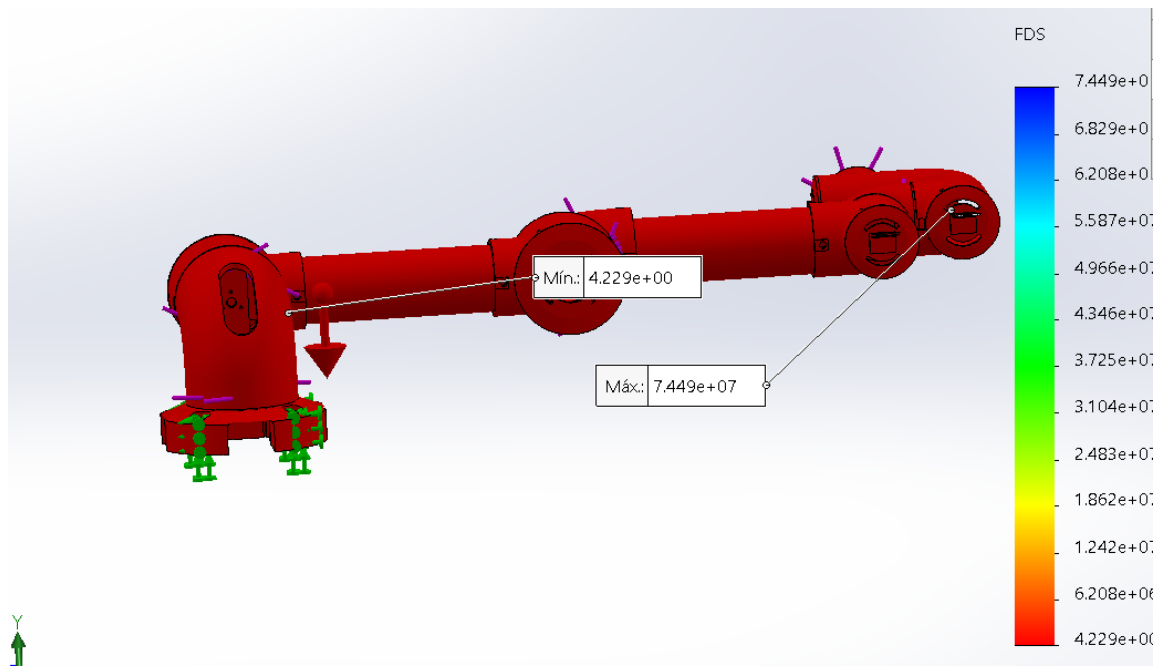


FIGURA 28.- FACTORES DE SEGURIDAD PRESENTADO EN ANÁLISIS ESTÁTICO

2.4.5. Obtención de longitudes del sistema

Con el fin de corroborar las longitudes correspondientes a cada uno de los desplazamientos presentes en el modelo del robot de 6 grados de libertad, se hizo uso de la herramienta de software presente en SolidWorks denominada como “Medir”, tales operaciones se presentan en las siguientes imágenes, en ellas se puede apreciar el método con el cual se obtuvieron las longitudes correspondientes a l_1 , l_2 , l_3 , l_4 , l_5 , l_6 , l_7 y l_8 .

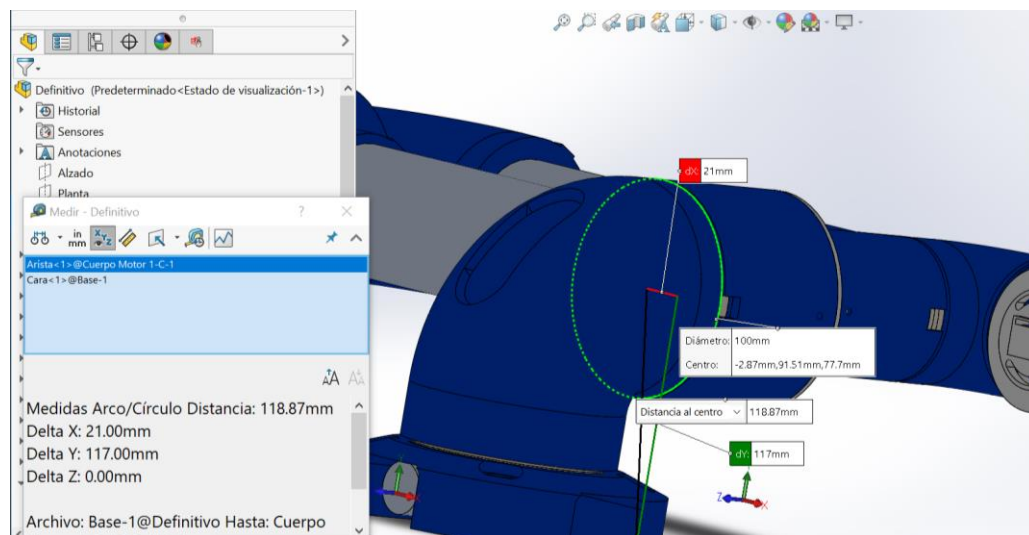


FIGURA 29.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 1

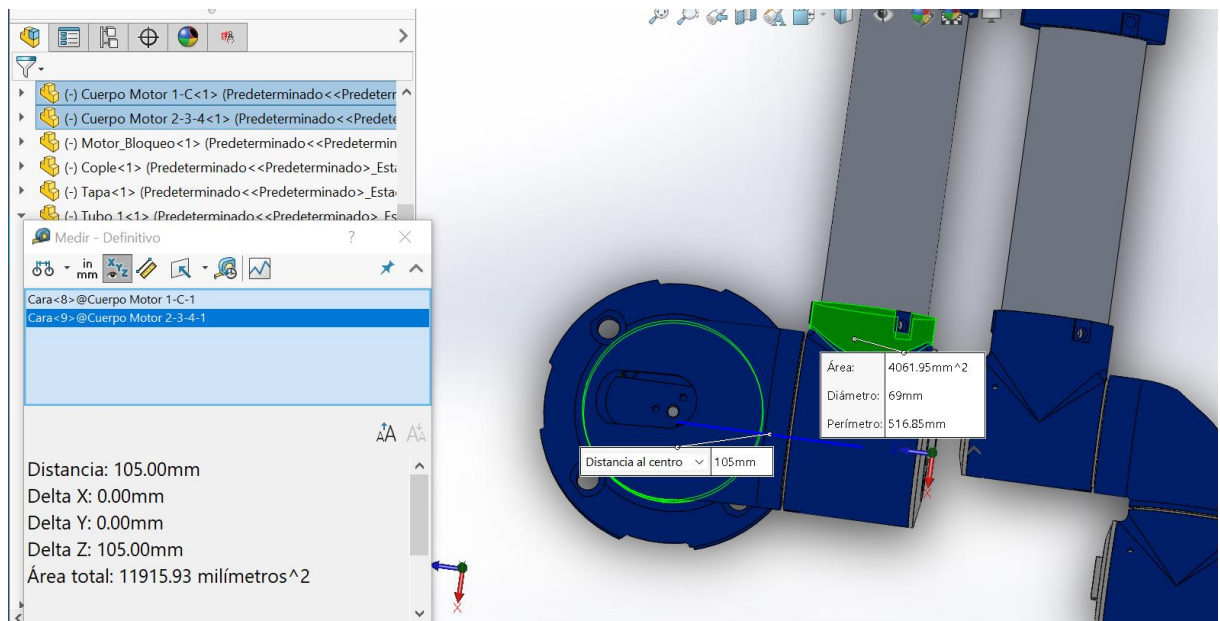


FIGURA 30.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 2

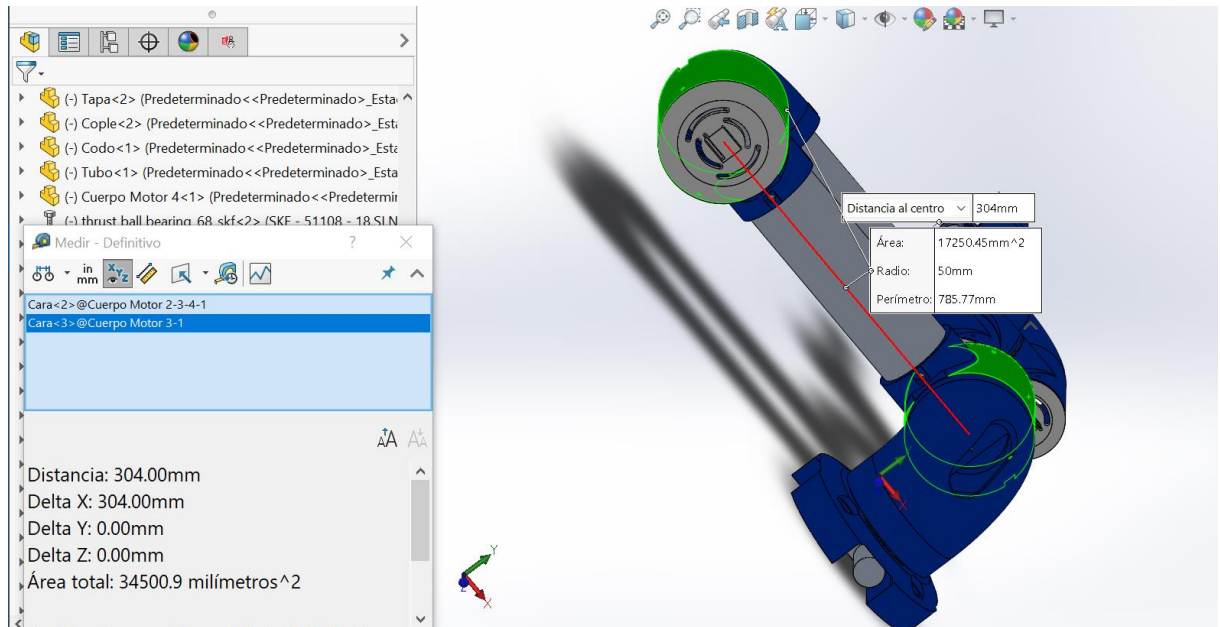


FIGURA 31.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 3

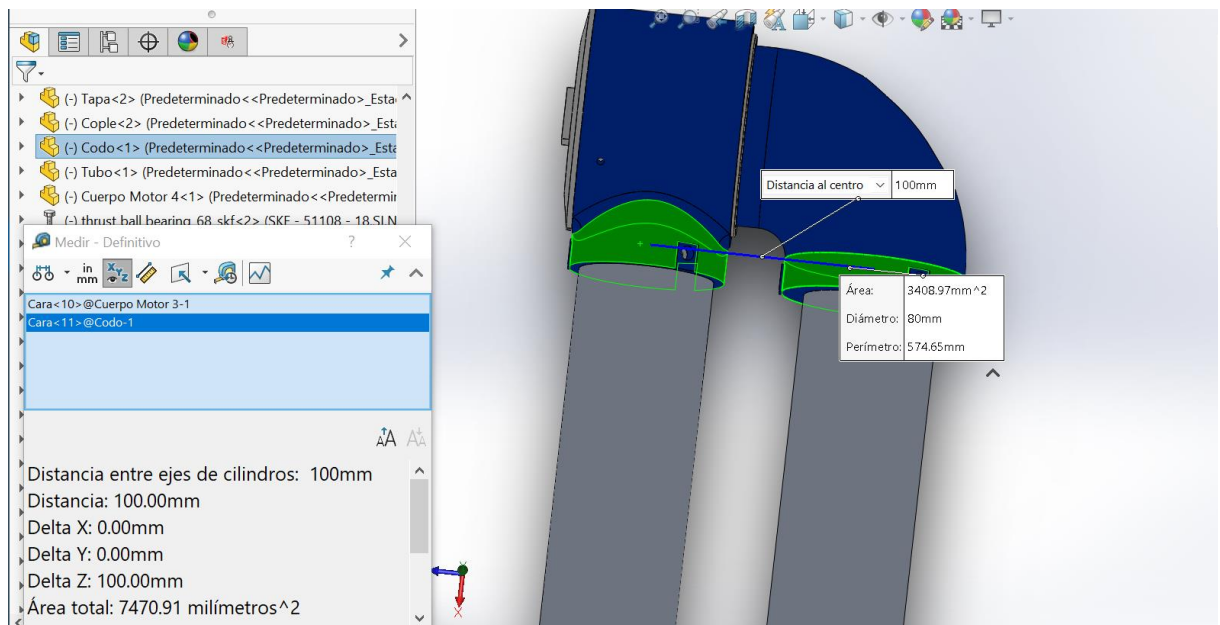


FIGURA 32.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 4

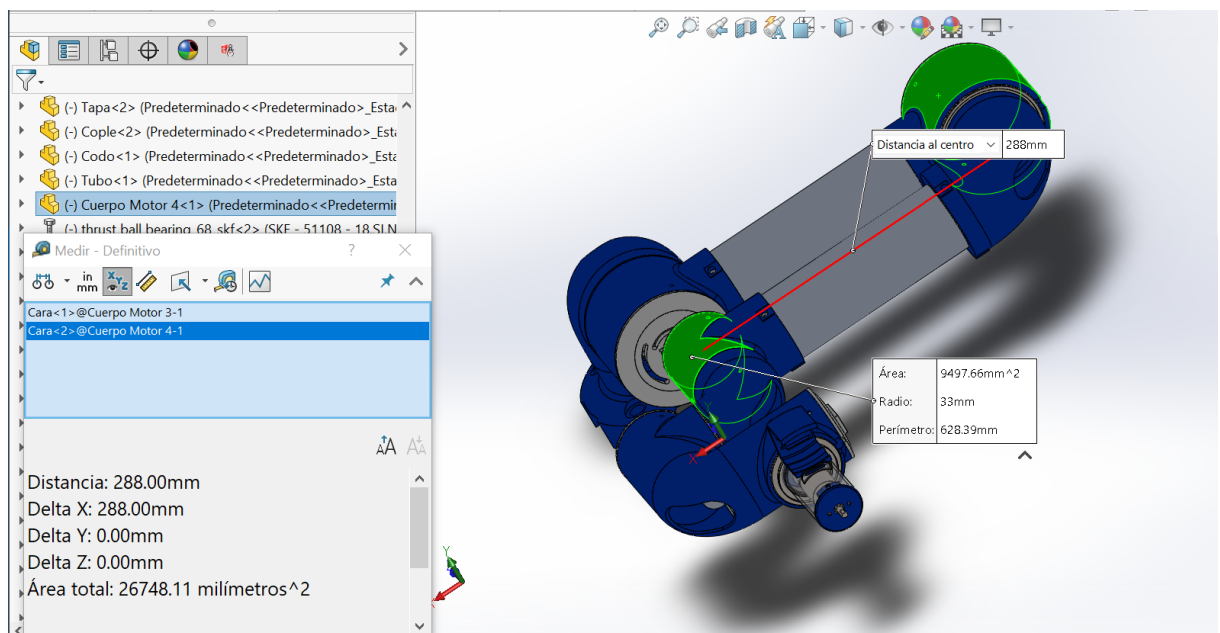


FIGURA 33.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 5

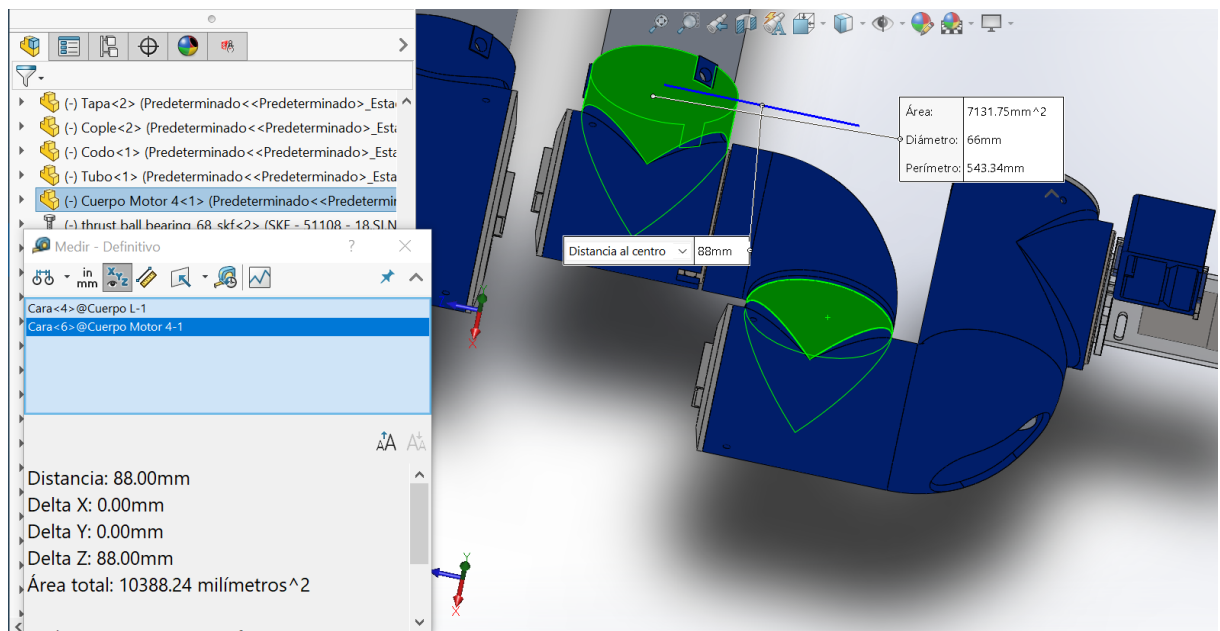


FIGURA 34.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 6

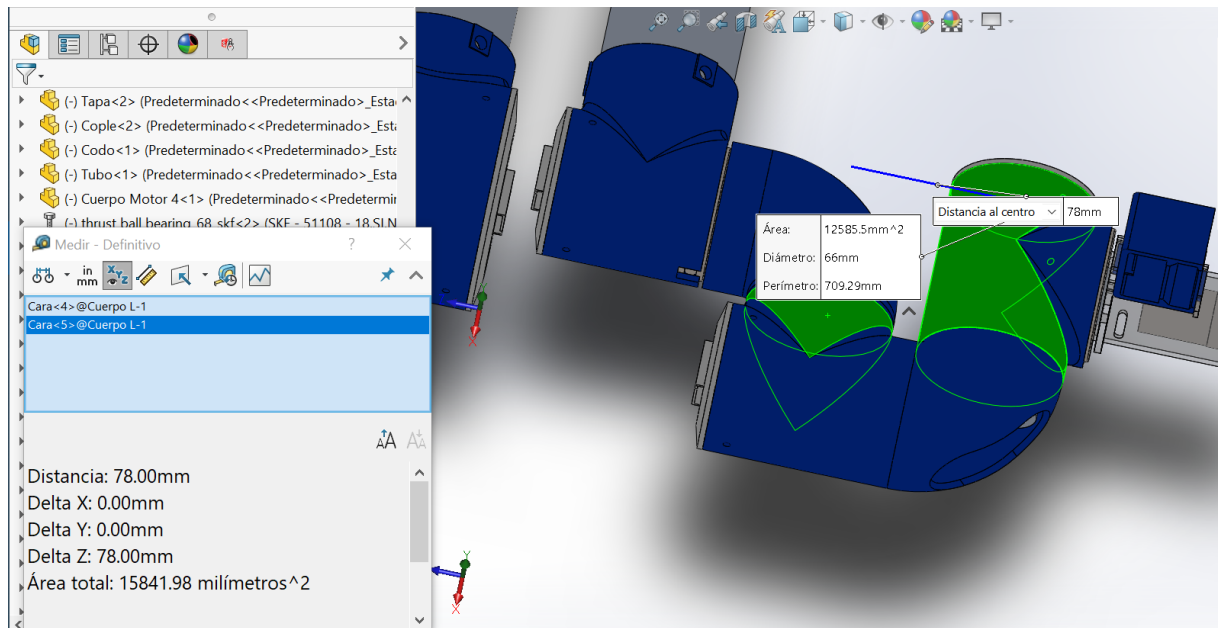


FIGURA 35.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 7

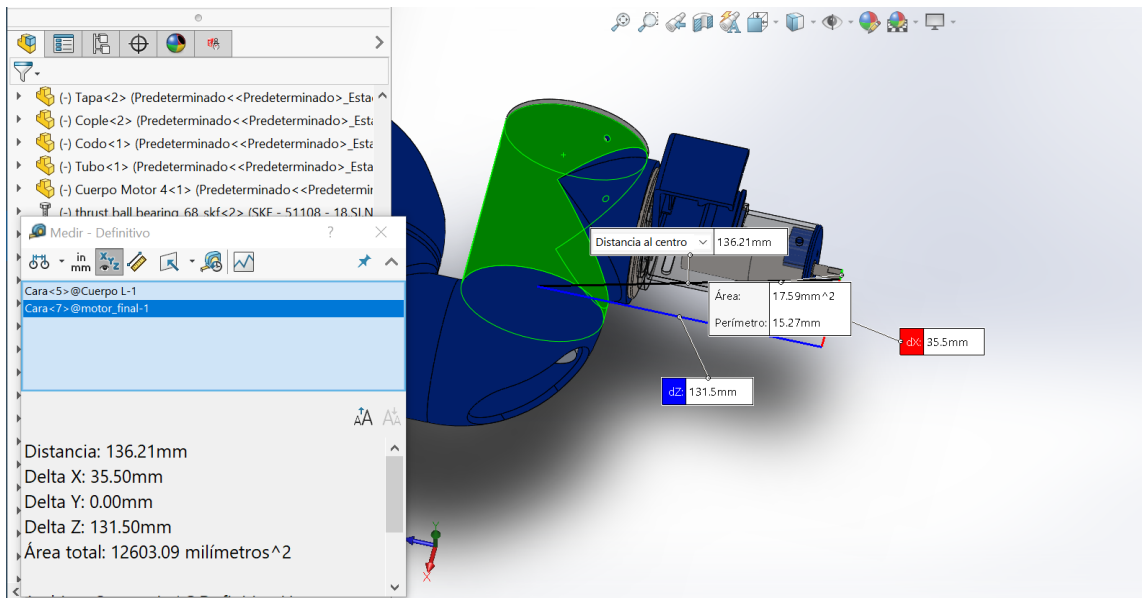


FIGURA 36.- OBTENCIÓN DE LONGITUD 8

2.4.6. Obtención de masas e inercias del sistema

Con base en la propuesta de diseño anteriormente explicada, se hizo uso de las herramientas que proporciona SolidWorks denominada como “Propiedades físicas”, y con ello obtener las masas e inercias correspondientes a cada uno de los estabones que constituyen el robot, tomando en cuenta la propia estructura del robot, así como sus elementos internos, tal como se muestra en las siguientes imágenes.

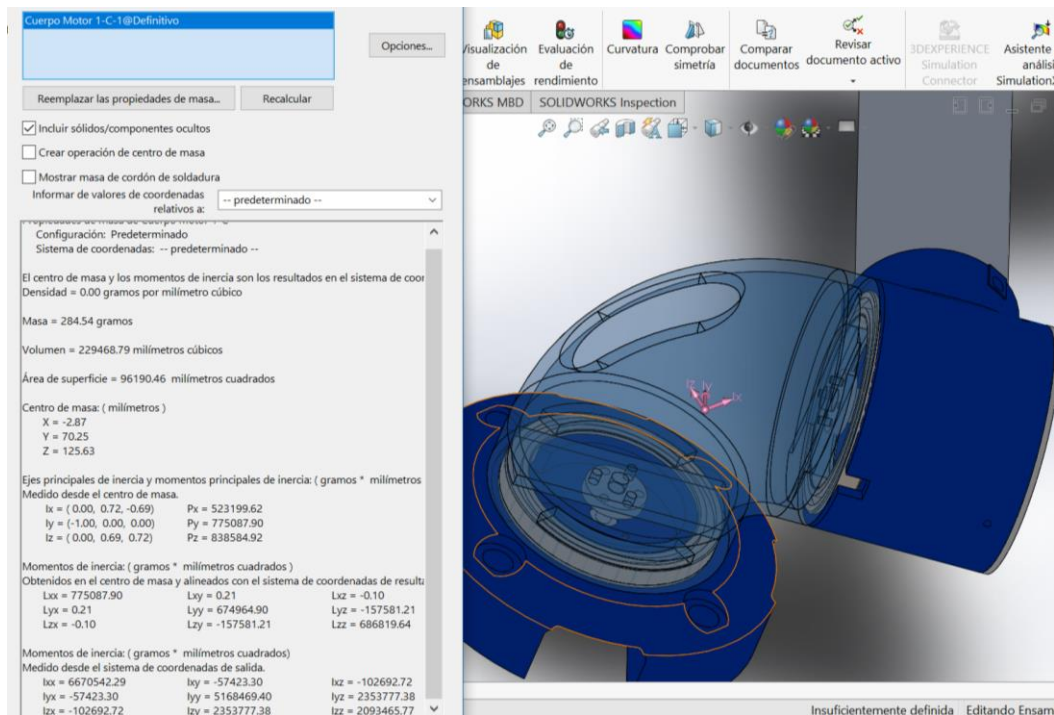


FIGURA 37.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL PRIMER ESLABÓN.

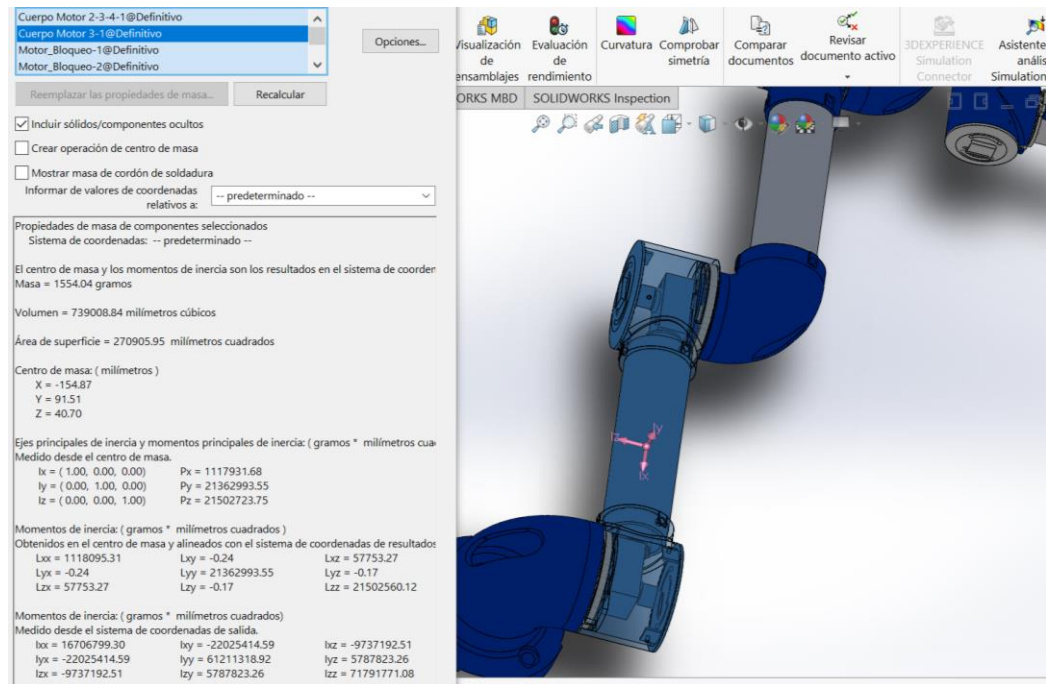


FIGURA 38.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL SEGUNDO ESLABÓN.

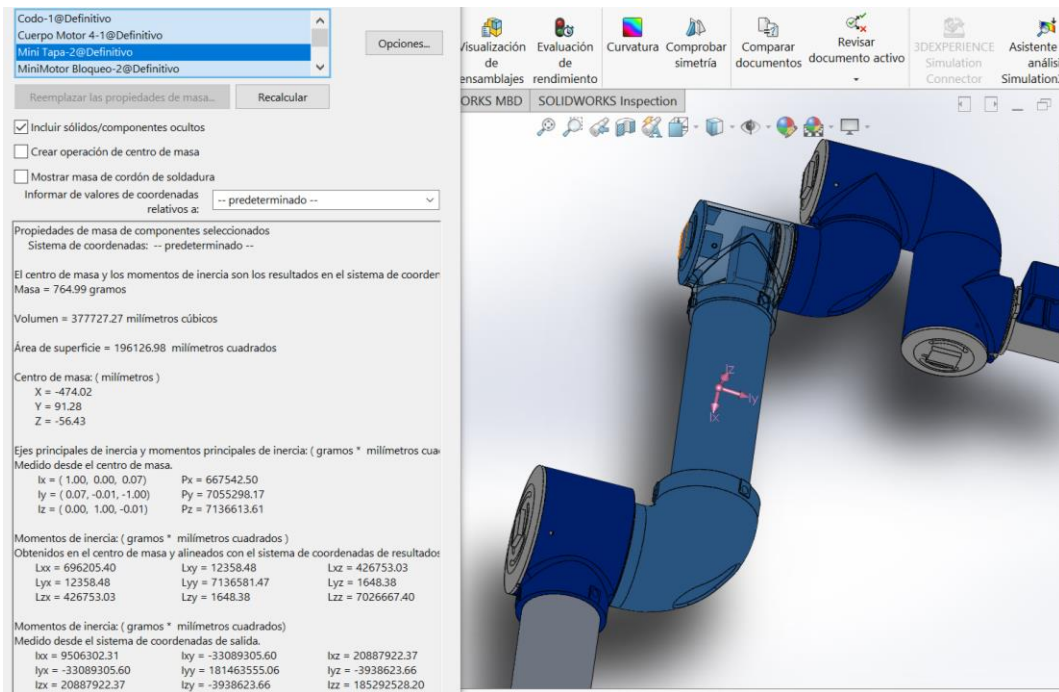


FIGURA 39.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL TERCER ESLABÓN.

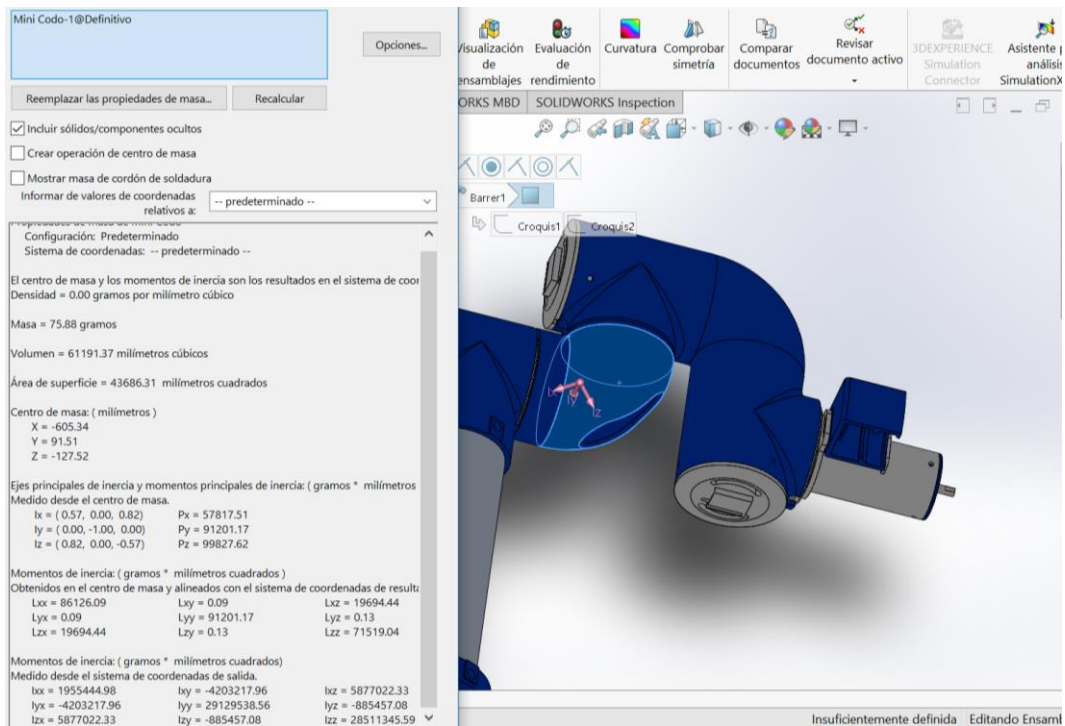


FIGURA 40.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL CUARTO ESLABÓN.

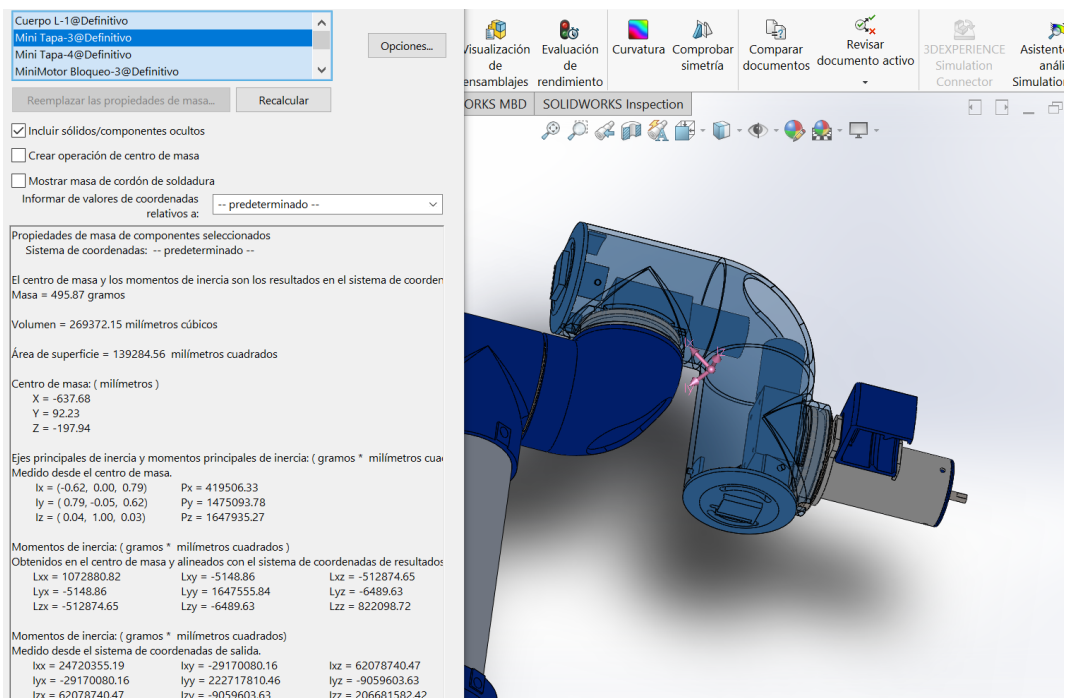


FIGURA 41.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL QUINTO ESLABÓN.

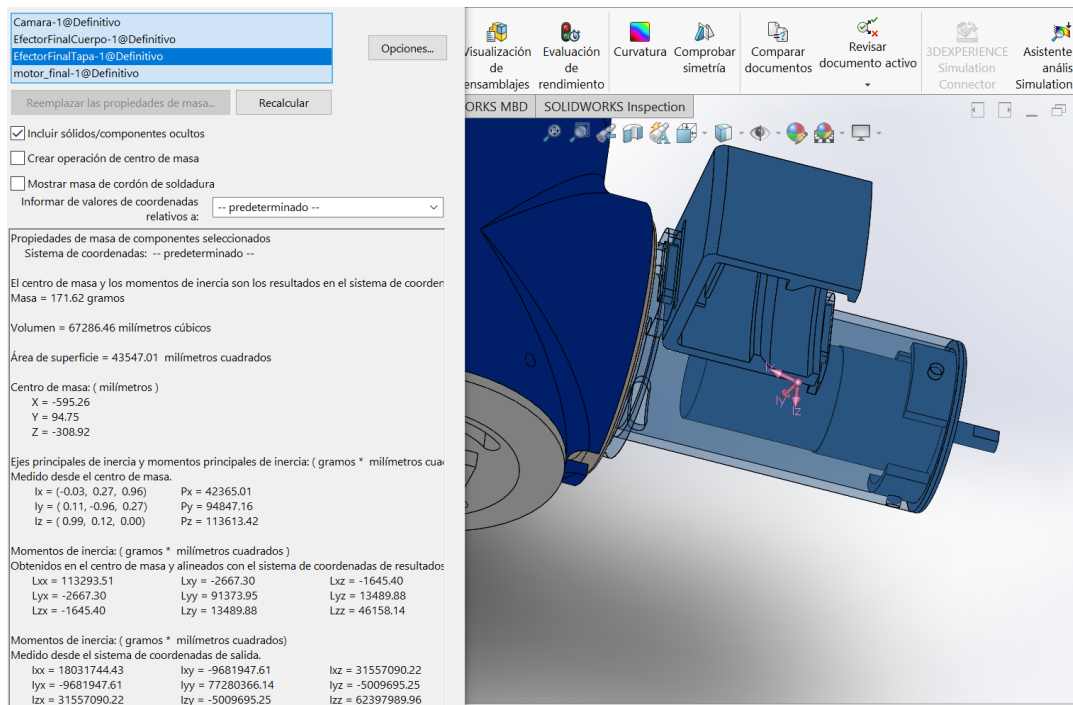


FIGURA 42.- OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS CORRESPONDIENTES AL SEXTO ESLABÓN.

2.4.7. Cálculo del área de trabajo

Con el fin de obtener el área de trabajo alcanzable por el robot se consideraron únicamente los tres primeros grados de libertad, además se tomaron en consideración las longitudes l_1 a l_6 , ya que son los elementos encargados de modificar la posición del robot en el espacio, para el cálculo se hizo uso del software Mathematica código que se puede observar en la Figura 43 en este se planteó la metodología Denavit-Hartenberg para obtener las matrices de transformación pertenecientes a cada eje de libertad, una vez realizado esto se multiplicaron las matrices para obtener la matriz de transformación desde 0 a 3, posteriormente se realizaron dos procesos diferentes, el primero consta únicamente de asignar los valores 0 y π en el eje 3, esto con el motivo de obtener las superficies máxima y mínima alcanzables por el robot, además se simuló una placa de 50x 50 cm para definir que efectivamente el robot podrá cubrir el área para realizar el atornillado, todo lo anterior se puede observar en la **Error! Reference source not found.**; el siguiente proceso desarrollado fue con el fin de obtener cada uno de los puntos alcanzables por el robot, para ello se hizo uso de un ciclo *for*, después se hicieron variar los otros 2 parámetros de la matriz de transformación y con ello obtener el espacio de trabajo total, todo lo anterior se puede apreciar en la Figura 44, Figura 45 y **Error! Reference source not found.**, con todo lo anteriormente realizado se logró concluir que el robot será capaz de alcanzar todos los puntos de una placa de 50x50 cm.

Robot de 6 Grados de Libertad "Área de trabajo"

Matriz de Transformación Denavit – Hartenberg

$$DH[\alpha_i, \alpha_i, d_i, \theta_i] := \begin{pmatrix} \cos[\theta_i] & -\cos[\alpha_i] \sin[\theta_i] & \sin[\alpha_i] \sin[\theta_i] & \alpha_i + \cos[\theta_i] \\ \sin[\theta_i] & \cos[\alpha_i] \cos[\theta_i] & -\sin[\alpha_i] \cos[\theta_i] & \alpha_i \sin[\theta_i] \\ 0 & \sin[\alpha_i] & \cos[\alpha_i] & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Generación de grafica de espacio de trabajo

```
(*Matrices de transformación*)
A1 = DH[π / 2, 0, l1, q1];
A2 = DH[0, l2, l2, q2];
A3 = DH[0, l3, -l4 - l3, q3];

A12 = Simplify[A1.A2];
A13 = Simplify[A12.A3];

(*Funciones de posición de 3 grados de libertad en x,y,z*)
P = Take[A13, {1, 3}, {4}];

Print["Elementos de la matriz de transformación A13 que proporciona la posición del robot", P // MatrixForm];

(*Longitudes del robot para los 3 primeros grados de libertad*)
l1 = .132;
l2 = .103;
l3 = .354;
l4 = .103;
l5 = .255;
l6 = .149;

(*Obtención de las superficies en los casos donde q3=0 y q3=π, y obtención de superficie para simular la presencia de una placa de 50 por 50 cm*)
A = {{Cos[q1] (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) + (l2 - l4 - l6) Sin[q1] /. q3 -> 0, (-l2 + l4 + l6) Cos[q1] + (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) Sin[q1] /. q3 -> 0, l1 + l3 Sin[q2] + l5 Sin[q2 + q3] /. q3 -> 0}};
k1 = ParametricPlot3D[A, {q2, 0, π}, {q1, -Pi, Pi}, PlotStyle -> Green];

A = {{Cos[q1] (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) + (l2 - l4 - l6) Sin[q1] /. q3 -> -Pi, (-l2 + l4 + l6) Cos[q1] + (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) Sin[q1] /. q3 -> -Pi, l1 + l3 Sin[q2] + l5 Sin[q2 + q3] /. q3 -> -Pi}};
k2 = ParametricPlot3D[A, {q2, 0, π}, {q1, -Pi, Pi}, PlotStyle -> Blue];
k3 = ParametricPlot3D[{x, y, 0.132}, {x, 0.16, 0.66}, {y, -0.25, 0.25}, PlotStyle -> Red];

Show[k1, k2, k3]

(*Código para obtener toda el area de trabajo considerando el movimiento de q1 de -pi a pi, q2 de 0 a pi y q3 de -pi a pi*)
A = {{Cos[q1] (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) + (l2 - l4 - l6) Sin[q1] /. q3 -> -Pi, (-l2 + l4 + l6) Cos[q1] + (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) Sin[q1] /. q3 -> -Pi, l1 + l3 Sin[q2] + l5 Sin[q2 + q3] /. q3 -> -Pi}};
For[i = -Pi + 0.1, i <= Pi, i = i + 0.1,
  para cada [numero pi] [numero pi]
  B = {{Cos[q1] (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) + (l2 - l4 - l6) Sin[q1] /. q3 -> i, (-l2 + l4 + l6) Cos[q1] + (l3 Cos[q2] + l5 Cos[q2 + q3]) Sin[q1] /. q3 -> i, l1 + l3 Sin[q2] + l5 Sin[q2 + q3] /. q3 -> i}};
  A = Join[A, B]
]
f1 = ParametricPlot3D[A, {q2, 0, π}, {q1, -Pi, Pi}, PlotRange -> Full];
Show[f1, k3]
```

FIGURA 43.- CÓDIGO UTILIZADO PARA GENERACIÓN DE ÁREA DE TRABAJO DEL ROBOT

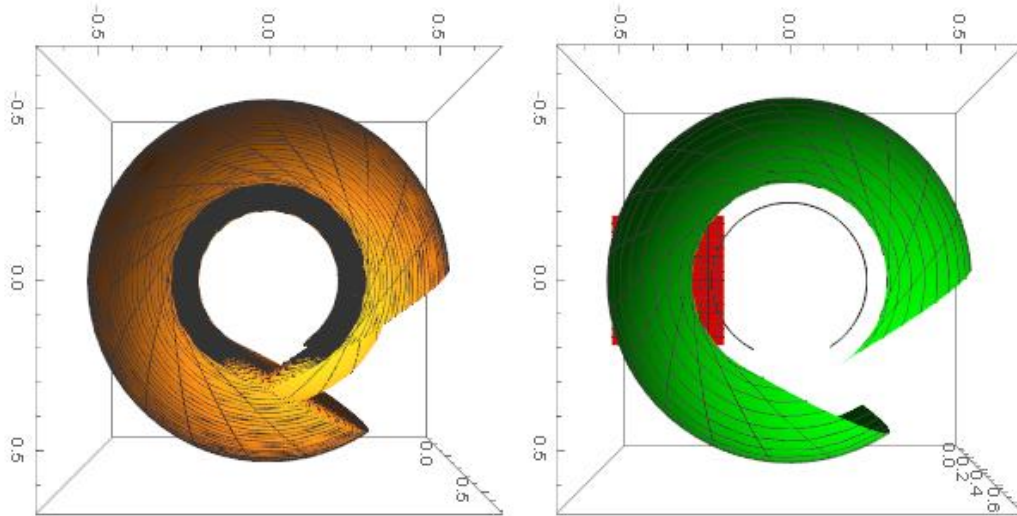


FIGURA 44.- GRÁFICA DE ESPACIO DE TRABAJO ALCANZABLE POR EL ROBOT (VISTA SUPERIOR)

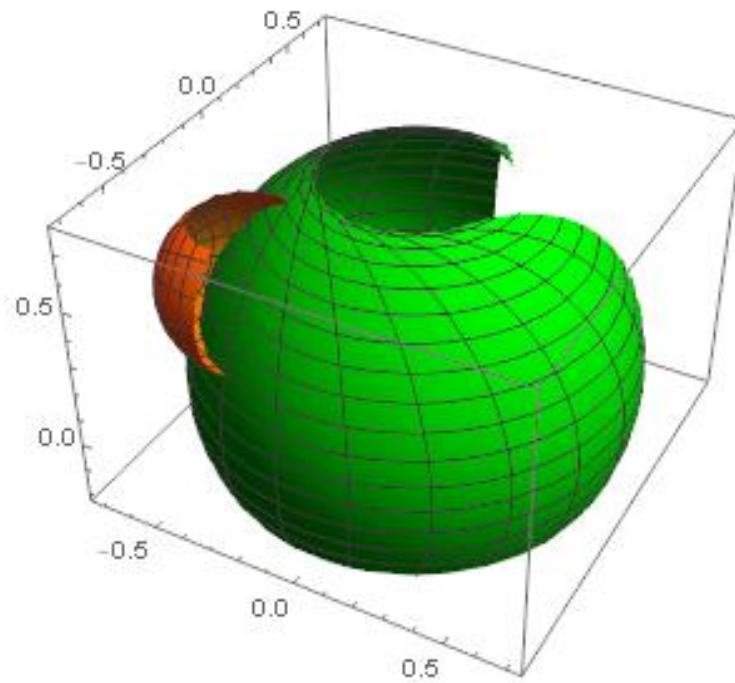


FIGURA 45.- GRÁFICA DE ESPACIO DE TRABAJO ALCANZABLE POR EL ROBOT (VISTA ISOMÉTRICA)

2.4.8. Disposición de Placa

Para la realización de las pruebas se utilizará una placa metálica colocada de forma horizontal, esta será sujeta a la mesa de apoyo del robot con ayuda de tornillos, con la finalidad de que esta permanezca totalmente fija para que no pueda ser cambiada su posición respecto a la posición de la cámara del robot. Con ayuda de SolidWorks se realizó el diseño de la mesa que sostendría tanto la placa como al robot, mostrando el resultado en la Figura 46.

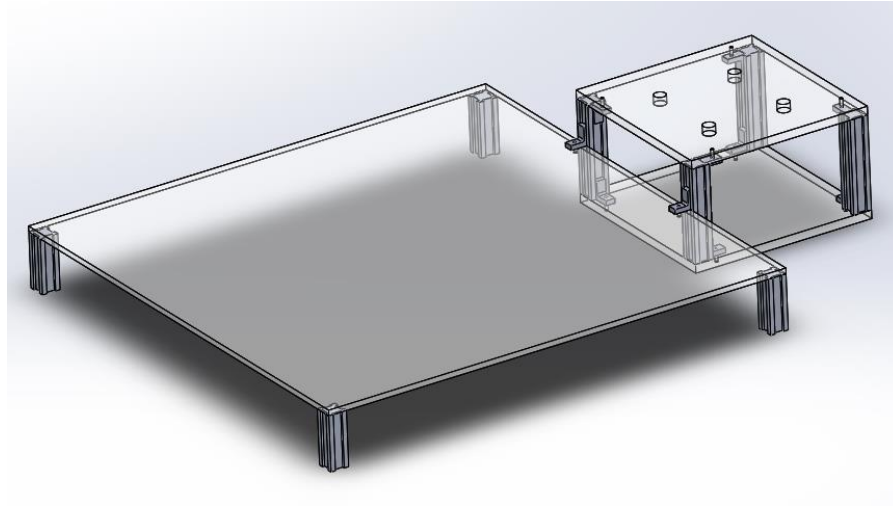


FIGURA 46.- DISEÑO DE MESA

Para corroborar que la forma en la que la placa se fijara a la mesa no interfiere con la colocación de los barrenos se realizó una simulación de la fijación de la placa previamente perforada, los resultados pueden observarse en la Figura 47.

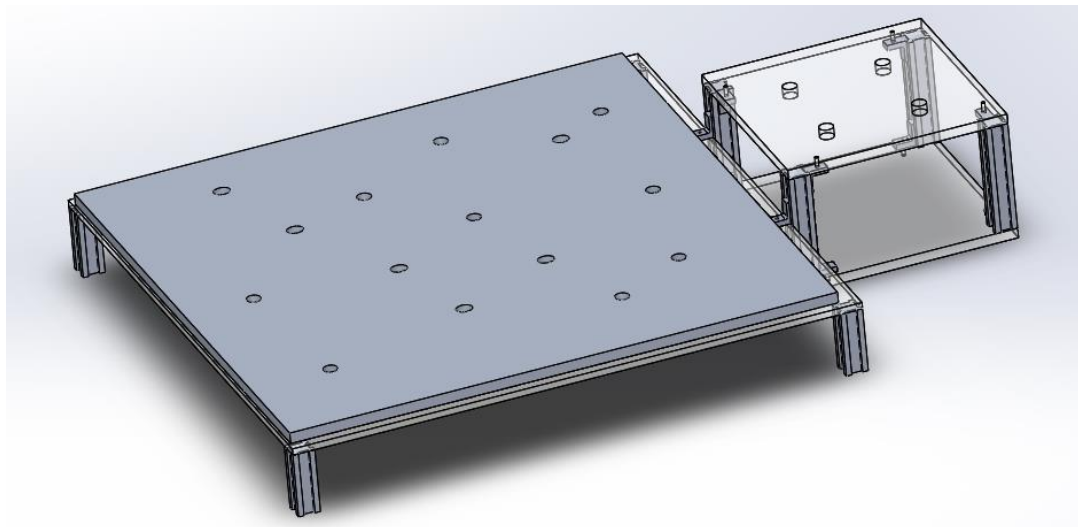


FIGURA 47.- SIMULACIÓN DE SUJECCIÓN DE PLACA CON BARRENOS

Debido al peso generado por el propio robot y que el centro de masa está desfasado respecto del centro de la mesa, esto genera un brazo de palanca que genera un movimiento rotacional según una de las aristas de la mesa, mostrando en Figura 48 la simulación del giro.

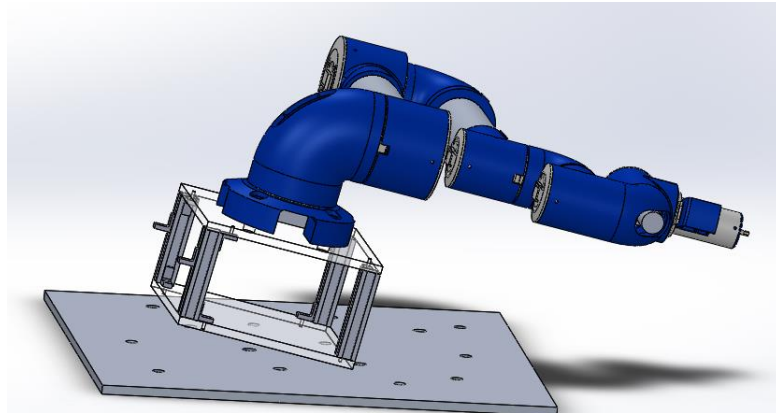


FIGURA 48.-SIMULACIÓN DE MOMENTO EN LA BASE DE LA MESA

Para compensar este giro, se propuso poner un peso extra en la base inferior de la mesa. Realizando el análisis en SolidWorks sin movimiento del brazo, la fuerza necesaria para mantener el equilibrio resultaba de 4 kg, pero para compensar el cambio de configuración de robot y la inercia generada por el movimiento de este, se decidió poner una carga de 10 kg para asegurarnos que ni la placa ni el robot sufrieran de desfases por el peso y movimiento de este. Mostrando el resultado final en la Figura 49

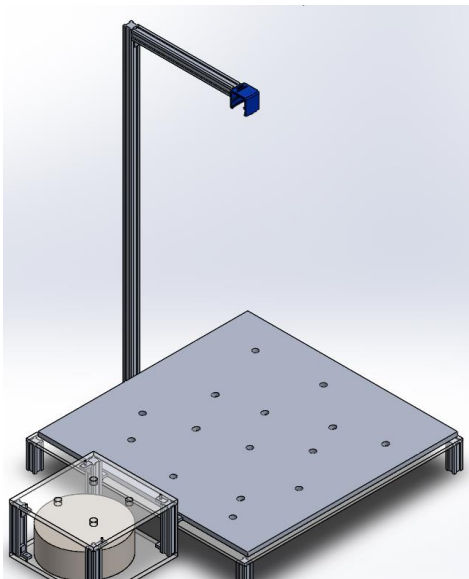


FIGURA 49.-DISEÑO FINAL DE LA MESA

Debido a esta combinación de pesos y brazos de palanca generados dentro de la mesa, se realizó un análisis estático para confirmar que ninguna parte de la mesa fallara, dando como resultado esfuerzos muy por debajo de los límites de los materiales propuestos, siendo acrílico para las bases y aluminio para los postes. Mostrando los resultados tanto de esfuerzos como de factor de seguridad en la Figura 50.

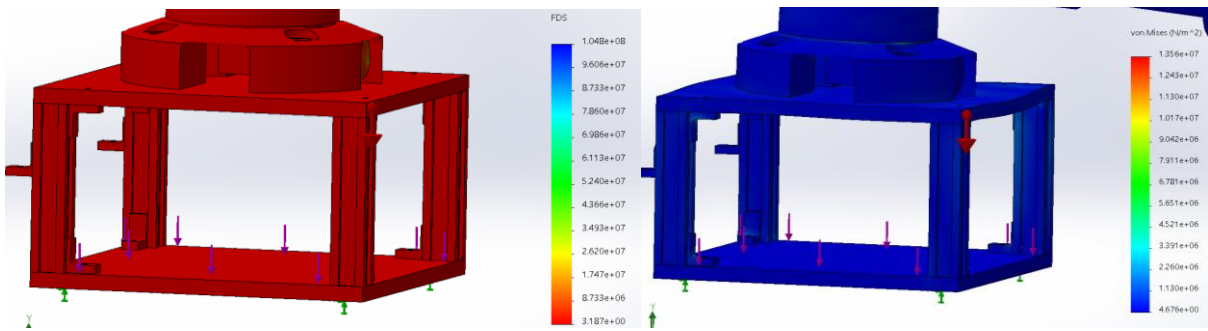


FIGURA 50.-PRUEBAS ESTÁTICAS DE ESFUERZO EN MESA

2.4.9. Sistema de Visión Artificial

Para el desarrollo del sistema de visión artificial se desarrollaron diferentes algoritmos que realizaran el procesamiento de las imágenes requeridos para la localización de los centroides de cada barreno, así como para poder determinar la distancia en mm a la que se encuentran, para esto se utilizaron los siguientes métodos.

2.4.10. Conversión mm-pixeles

Debido a que se requiere obtener el centroide de cada barreno, lo primero que se necesita determinar es la coordenada del mismo, para esto se necesita obtener la relación entre la distancia placa-cámara y la cantidad de pixeles que son representados en la toma obtenida por la cámara, esto es posible gracias a que la cantidad de pixeles de la toma no varía, debido a que la cámara tiene una resolución fija, por lo tanto si mantenemos una cámara fija, la relación entre la distancia placa-cámara y la cantidad de pixeles siempre será la misma, lo que nos permitirá calcular la compensación necesaria para obtener la localización en mm de cada barreno. Para poder calcular la compensación, se segmentó la placa en cuadrantes de 50x50 mm de la siguiente manera:

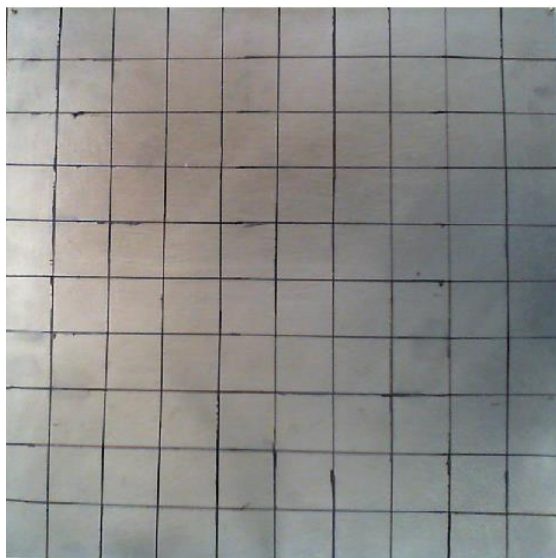


FIGURA 51.- SEGMENTACIÓN DE PLACA EN CUADRANTES DE 50X50MM

Después de eso se le aplico un filtro a la imagen para poder calcular la distancia en pixeles entre las marcas de la segmentación, el código en Matlab utilizado para el filtro es el siguiente:

```
close all
clear all
clc

foto = imread('foto2.bmp');
gray = rgb2gray(foto);
[fil,col] = size(gray);

for i = 1 : fil
    for j = 1 : col
        if gray(i,j) < 93
            bin(i,j) = 0;
        else
            bin(i,j) = 1;
        end
    end
end
```

FIGURA 52.- CÓDIGO PARA FILTRO DE PLACA SEGMENTADA

La imagen filtrada nos permite hacer la medición de la cantidad de pixeles por cada cuadrante esto se hizo calculando la diferencia entre las divisiones de cada cuadrante, como se observa en la Figura 53.

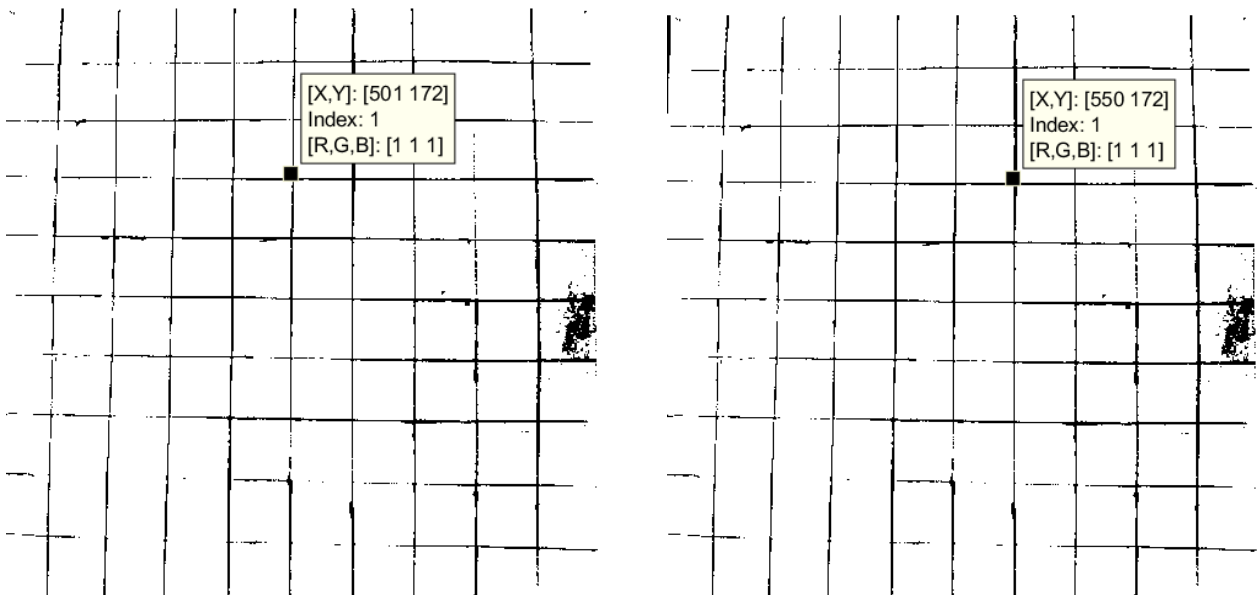


FIGURA 53.- MEDICIÓN DE LA SEPARACIÓN ENTRE DIVISIONES DE LOS CUADRANTES

Una vez obtenida la relación de cada segmento se decidió volver a segmentar la placa en cuadros de 100x100mm y generar una compensación para cada cuadrante, la compensación quedo de la siguiente manera:

$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 21$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 494$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 24$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 491$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 28$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 491$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 492$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 34$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 492$
$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 24$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 490$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 28$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 490$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 28$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 490$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 490$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 34$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 492$
$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 27$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 487$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 30$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 487$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 487$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 486$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 32$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 491$
$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 30$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 485$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 484$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 486$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 31$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 487$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 34$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 490$
$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 32$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 479$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 33$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 484$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 33$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 486$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 34$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 487$	$x = \frac{Cx_1 + \dots Cx_n}{n} + 34$ $y = \frac{Cy_1 + \dots Cy_n}{n} - 490$

FIGURA 54.- COMPENSACIÓN UTILIZADA PARA CADA SEGMENTO

El código utilizado para la representación de esta compensación es el siguiente:

```
function [px,py] = Conversion(cx,cy)
ax = cx+29;
ay = 489-cy;
for i=1:length(cx)
    if ax(i) < 100 && ay(i) < 100
        px(i) = ax(i)+3;
        py(i) = ay(i)-10;
    elseif ax(i) < 100 && ay(i) >= 100 && ay(i) < 200
        px(i) = ax(i)+1;
        py(i) = ay(i)-4;
    elseif ax(i) < 100 && ay(i) >= 200 && ay(i) < 300
        px(i) = ax(i)-2;
        py(i) = ay(i)-2;
    elseif ax(i) < 100 && ay(i) >= 300 && ay(i) < 400
        px(i) = ax(i)-5;
        py(i) = ay(i)+1;
    elseif ax(i) < 100 && ay(i) >= 400 && ay(i) < 500
        px(i) = ax(i)-8;
        py(i) = ay(i)+5;

    elseif ax(i) >= 100 && ax(i) < 200 && ay(i) < 100
        px(i) = ax(i)+4;
        py(i) = ay(i)-5;
    elseif ax(i) >= 100 && ax(i) < 200 && ay(i) >= 100 && ay(i) < 200
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)-5;
    elseif ax(i) >= 100 && ax(i) < 200 && ay(i) >= 200 && ay(i) < 300
        px(i) = ax(i)+1;
        py(i) = ay(i)-2;
    elseif ax(i) >= 100 && ax(i) < 200 && ay(i) >= 300 && ay(i) < 400
        px(i) = ax(i)-1;
        py(i) = ay(i)+1;
    elseif ax(i) >= 100 && ax(i) < 200 && ay(i) >= 400 && ay(i) < 500
        px(i) = ax(i)-5;
        py(i) = ay(i)+2;

    elseif ax(i) >= 200 && ax(i) < 300 && ay(i) < 100
        px(i) = ax(i)+4;
        py(i) = ay(i)-3;
    elseif ax(i) >= 200 && ax(i) < 300 && ay(i) >= 100 && ay(i) < 200
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)-3;
    elseif ax(i) >= 200 && ax(i) < 300 && ay(i) >= 200 && ay(i) < 300
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)-2;
    elseif ax(i) >= 200 && ax(i) < 300 && ay(i) >= 300 && ay(i) < 400
        px(i) = ax(i)-1;
        py(i) = ay(i)+1;
    elseif ax(i) >= 200 && ax(i) < 300 && ay(i) >= 400 && ay(i) < 500
        px(i) = ax(i)-1;
        py(i) = ay(i)+2;

    elseif ax(i) >= 300 && ax(i) < 400 && ay(i) < 100
        px(i) = ax(i)+5;
        py(i) = ay(i)-2;
    elseif ax(i) >= 300 && ax(i) < 400 && ay(i) >= 100 && ay(i) < 200
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)-2;
    elseif ax(i) >= 300 && ax(i) < 400 && ay(i) >= 200 && ay(i) < 300
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)-3;
    elseif ax(i) >= 300 && ax(i) < 400 && ay(i) >= 300 && ay(i) < 400
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)+1;
    elseif ax(i) >= 300 && ax(i) < 400 && ay(i) >= 400 && ay(i) < 500
        px(i) = ax(i)+2;
        py(i) = ay(i)+3;

    elseif ax(i) >= 400 && ax(i) < 500 && ay(i) < 100
        px(i) = ax(i)+5;
        py(i) = ay(i)+1;
    elseif ax(i) >= 400 && ax(i) < 500 && ay(i) >= 100 && ay(i) < 200
        px(i) = ax(i)+5;
        py(i) = ay(i)+1;
    elseif ax(i) >= 400 && ax(i) < 500 && ay(i) >= 200 && ay(i) < 300
        px(i) = ax(i)+3;
        py(i) = ay(i)+2;
    elseif ax(i) >= 400 && ax(i) < 500 && ay(i) >= 300 && ay(i) < 400
        px(i) = ax(i)+5;
        py(i) = ay(i)+3;
    elseif ax(i) >= 400 && ax(i) < 500 && ay(i) >= 400 && ay(i) < 500
        px(i) = ax(i)+5;
        py(i) = ay(i)+3;
    end
end
end
```

FIGURA 55.- CÓDIGO PARA LA COMPENSACIÓN

2.4.11. Localización de Centroides

Después de obtener la relación mm-píxeles, se continuo con la localización de los centroides, primero se aplicó un filtro tomando como base una foto de la placa sin perforar, después se tomó una foto a la placa ya perforada y se realizó el cálculo de la magnitud de cada píxel de ambas fotos, para después realizar una comparación píxel por píxel, si la diferencia entre la magnitud del píxel de la placa sin perforar y la magnitud del píxel de la foto de la placa perforada era menor a 100, ese píxel pasaba a ser color negro de lo contrario se volvía blanco. El código en Matlab utilizado para el filtro fue el siguiente:

```
for i=1:fil
    for j = 1:col
        p1 = double(forg(i,j,:));
        p2 = double(foto(i,j,:));
        d = sqrt((p1(:, :, 1)-p2(:, :, 1))^2+(p1(:, :, 2)-p2(:, :, 2))^2+(p1(:, :, 3)-p2(:, :, 3))^2);
        if d < 100
            ima(i,j)=0;
        else
            ima(i,j)=1;
        end
    end
end
end
```

FIGURA 56.- FILTRADO PARA PLACA

Después del filtrado se etiquetaron los objetos detectados en la foto, estos fueron todas aquellas formas donde la diferencia entre la magnitud de los píxeles de la foto de la placa sin barrenar y la foto de la placa barrenada fue mayor a 100, además del etiquetado se eliminaron todos los objetos que tuvieran un radio mayor a 65 píxeles y menor a 150 píxeles, para esto se desarrolló el siguiente código.

```
b = imfill(bin, 'holes');
[d, obj] = bwlabel(b);
for i = 1:obj
    [fil, col] = find(d == i);
    % Eliminacion de Objetos pequeños
    if length(fil) > 65 && length(fil) < 150
        minf = min(fil);
        maxf = max(fil);
        minc = min(col);
        maxc = max(col);
    else
        b(fil,col)=0;
    end
end
h = [1 1 1;1 1 1;1 1 1];
c = imdilate(b,h);
map = c - b;
```

FIGURA 57.- FILTRADO Y ETIQUETADO DE OBJETOS

Después de filtrar y etiquetar los barrenos se prosiguió a calcular el centroide, para esto se obtuvieron los valores mínimos y máximos para todas las filas y columnas de cada barreno, estos valores representan las coordenadas en pixeles de los extremos de cada barreno. Para el cálculo del centroide se utilizó el siguiente código:

```

if round(((maxc-minc)/2)+minc) > 0 || round(((maxf-minf)/2)+minf) > 0
    cx(1) = round(((maxc-minc)/2)+minc);
    cy(1) = round(((maxf-minf)/2)+minf);
    l = l+1;
end

```

FIGURA 58.- CALCULO DE CENTROIDES

Después se tomó una foto referenciada al centro de cada barreno a una distancia de 50 mm, esto con el objetivo de obtener una toma más clara de la forma del barreno para poder calcular el ángulo de inclinación, al igual que para el cálculo de centroides se realizó un filtrado y una eliminación de ruido, para esto se utilizó el siguiente código:

```

for l=1:length(cx)
    auxcx = cx(l)-25;
    auxcy = cy(l)-25;
    [bar, r3] = imcrop(map,[auxcx auxcy 50 50]);
    [fil,col] = size(bar);
    for m=1:fil
        for n=1:col
            if bar(m,n,:) == 1
                dist = sqrt((m-26)^2+(n-26)^2);
                if dist < 27.5
                    pd(o,l) = dist;
                    esqx(o,l) = cx(l)+m-26;
                    esqy(o,l) = cy(l)+n-26;
                    o = o+1;
                end
            end
        end
    end
end

[fil,col] = size(pd);
for i=1:fil
    for j=1:col
        if pd(i,j) == 0
            pdMin(i,j) = 100000;
        else
            pdMin(i,j) = pd(i,j);
        end
    end
end

[M,I] = max(pd);
[m,in] = min(pdMin);
for i=1:length(I)
    cxMax(i) = esqx(I(i),i);
    cyMax(i) = esqy(I(i),i);
    cxMin(i) = esqx(in(i),i);
    cyMin(i) = esqy(in(i),i);
    pdmax(i) = M(i);
    pdmin(i) = m(i);
end

```

FIGURA 59.-RECORTE DE IMAGEN PARA CALCULO DE ANGULO DE INCLINACIÓN

Por último, se realizó el cálculo del factor de excentricidad del barreno para determinar su ángulo de inclinación, el código desarrollado es el siguiente:

```

if a(1)>b(1)
    % Horizontal
    ch(n) = sqrt(a(1)^2-b(1)^2);
    ah(n) = a(1);
    bh(n) = b(1);
    eh(n) =ch(n)/ah(n);
    anh(n) = (asin(eh(1)))*(180/pi))/2;
    l=l+1;
end

if a(1)<b(1)
    % Vertical
    cv(m) = sqrt(b(1)^2-a(1)^2);
    av(m) = a(1);
    bv(m) = b(1);
    ev(m) =cv(m)/bv(m);
    anv(m) = (asin(ev(m)))*(180/pi))/2;
    m = m+1;
end

if fr(1) >.9 && fr(1)<1.1
    ar(k) = a(1);
    br(k) = b(1);
    cr(k) = sqrt(a(1)^2+b(1)^2);
    er(k) =br(k)/ar(k);
    anr(k) = (asin(er(k)))*(180/pi))/2;
    k = k+1;
end

```

FIGURA 60.-CÓDIGO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÁNGULO DE INCLINACIÓN

2.4.12. Implementación del control

Debido a que el movimiento del robot será secuencial, es decir, no todas las articulaciones estarán en movimiento al mismo tiempo y cada articulación se moverá después de la anterior; se optó por implementar un control por juntas independientes, integrando en cada articulación un control por modo deslizante.

Para diseñar el control se partirá del modelo dinámico del motor, usando el modelo simplificado de este y una entrada de control basada en modos deslizantes, siendo la ecuación del motor:

$$J_m R \ddot{\theta}_m + (R B_m + k_b k_i) \dot{\theta}_m = k_i V(t) - \frac{R}{r} T(t)$$

Siendo:

- J_m la inercia del motor
- R la resistencia del motor
- B_m el coeficiente de amortiguación viscosa del motor
- K_b y K_i constantes eléctricas y mecánicas del motor
- θ_m la variable de posición del robot
- $V(t)$ entrada de voltaje
- r el factor de reducción de la caja reductora
- $T(t)$ la carga acoplada al tren de engranes

Con base al modelo dinámico del motor, se propondrá la entrada de control adecuada, la cual deberá de compensar los cambios debidos a la inercia misma del motor y los aspectos eléctricos que este mismo causa. Cabe mencionar que si el factor de reducción de la caja de engranes es mayor que la resistencia del motor se puede asumir que la carga acoplada a la caja de engranes es una perturbación mínima, la cual no es necesaria de ser compensada en la entrada de control, sino que será corregida por los demás efectos de esta. Eligiendo como señal de entrada el voltaje del motor, dando como resultado:

$$V(t) = u(t) = J_m R \ddot{\theta}_r + (R B_m + k_b k_i) \dot{\theta}_r + k \text{sing}(r)$$

Donde:

$$r = \lambda e + \dot{e}$$

$$\dot{\theta}_r = \lambda e + \dot{\theta}_d$$

Siendo λ el factor de deslizamiento, θ_d la posición del motor deseada y definiendo el error como:

$$e = \theta_d - \theta_m$$

Cabe mencionar que el control propuesto no será un control de seguimiento sino únicamente un control de posicionamiento, siendo la posición deseada siempre una constante, por lo tanto, al desarrollar la derivada del error, esta únicamente sería:

$$\dot{\theta}_d = cte.$$

$$\dot{e} = -\dot{\theta}_m$$

Y convirtiendo a las ecuaciones de referencia como:

$$\dot{\theta}_r = \lambda e$$

$$\ddot{\theta}_r = \lambda \dot{e}$$

Complementando el control con la correcta elección de componentes, en este caso, los motores elegidos fueron motores con una caja de reducción basada en el sistema de tornillo sin fin con corona, creando un motor con sistema de bloqueo mecánico.

Una vez obtenidas estas ecuaciones y definida la entrada de control se puede apreciar que para desarrollar toda la implementación del control se necesitará llevar a cabo la parametrización del motor, además de obtener la medición de la posición y la velocidad del motor en todo momento. Por último, utilizando un microcontrolador se obtendrán de forma constante las lecturas de velocidad y posición, esto lograra un procesamiento rápido de la señal de salida, para que cuando el error sea cero, por el uso de la función signo el motor se apague y sea la caja reductora con sistema de bloqueo la encargada de mantener la articulación en su posición.

Después se implementaron las ecuaciones de control en código C en la tarjeta Núcleo-64 STM32F446RE, la primer parte del código presenta la actualización del error en cada articulación, posteriormente se estableció un intervalo de error en donde el control estará actuando, después se realiza el cálculo del voltaje en función de las ecuaciones de control, el voltaje modifica el ciclo de trabajo del PWM y el sentido que

deberá de tener la señal de salida, en la siguiente figura se observa el código que se desarrolló para el control de cada uno de los eslabones presentes.

```

for(int Index_e=0;Index_e<=5;Index_e++)
{
    error[Index_e]=q_deseada[Index_e]-(((float)encoder[Index_e])-32768)*0.000248;
}

if(error[0]>0.1||error[0]<-0.1)
{
    r=delta*(error[0])-error_p[0];
    qrp=delta*error[0];
    qrpp=delta*error_p[0];

    if(r>0) V=(R*Bm+kb*ki)*qrp+K+Jm*R*qrpp;
    else if(r<0) V=(R*Bm+kb*ki)*qrp-K+Jm*R*qrpp;
    else V=0;

    if(V<-23.5) V=-23.5;
    else if(V>23.5) V=23.5;
}

else V=0;

PWM=abs(round((V*125)/24));

if(V>0)
{
    i=0;
    PWM_CH1[0]=PWM;
    PWM_CH2[0]=0;
}
else if (V<0)
{
    i=1;
    PWM_CH2[0]=PWM;
    PWM_CH1[0]=0;
}
else
{
    PWM_CH1[0]=0;
    PWM_CH2[0]=0;
}
}

```

FIGURA 61.-CÓDIGO PARA CONTROL

2.4.13. Sistema de Instrumentación

Debido a que las hojas de especificaciones de los motores utilizados en el proyecto no contenían el número de pulsos por vuelta que entrega de cada encoder de cuadratura incremental, fue necesaria una etapa de instrumentación, la cual consistió en establecer como referencia un encoder cuyo número de pulsos es conocido, siendo este de 2048 pulsos por vuelta, el cual se acopló a la salida de la caja de reducción de cada motor, ambos encoder fueron leídos a través de la tarjeta Núcleo-64 STM32F446RE, a partir de un código desarrollado en C, tal código se puede observar en la Figura 62.

```

MX_GPIO_Init();
MX_TIM1_Init();
MX_TIM2_Init();
MX_USART2_UART_Init();
/* USER CODE BEGIN 2 */
HAL_TIM_Encoder_Start(&htim1,TIM_CHANNEL_ALL);
HAL_TIM_Encoder_Start(&htim2,TIM_CHANNEL_ALL);

uint8_t leng;
char mensaje[255];

int i1,i2,valor=0;
/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1)
{
    /* USER CODE END WHILE */

    /* USER CODE BEGIN 3 */
    i1 = TIM1->CNT;
    i2 = TIM2->CNT;
    if(i1==2048)
    {
        valor=i2;
        leng=sprintf(mensaje,"Encoder: %d,%d,%d\n",i1,i2,valor);
        HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *)mensaje,leng,1000);
        HAL_Delay(10000);
    }
    leng=sprintf(mensaje,"Encoder: %d,%d,%d\n",i1,i2,valor);
    HAL_UART_Transmit(&huart2,(uint8_t *)mensaje,leng,1000);
}
}

```

FIGURA 62.-CÓDIGO DE CONTEO DE PULSOS

Debido a errores en medición y la presencia de juego mecánico las cajas de reducción, los valores de salida variaron, es por lo que se decidió realizar una media de todos los valores obtenidos, siendo los resultados los siguientes:

- Motor JGY371: 25350 pulsos por vuelta.
- Motor GW4058-555 (caja 1:522): 23176 pulsos por vuelta.
- Motor GW4058-555 (caja 1:54): 2376 pulsos por vuelta.

En la Figura 63 se pueden observar las pruebas realizadas en cada modelo de motor.

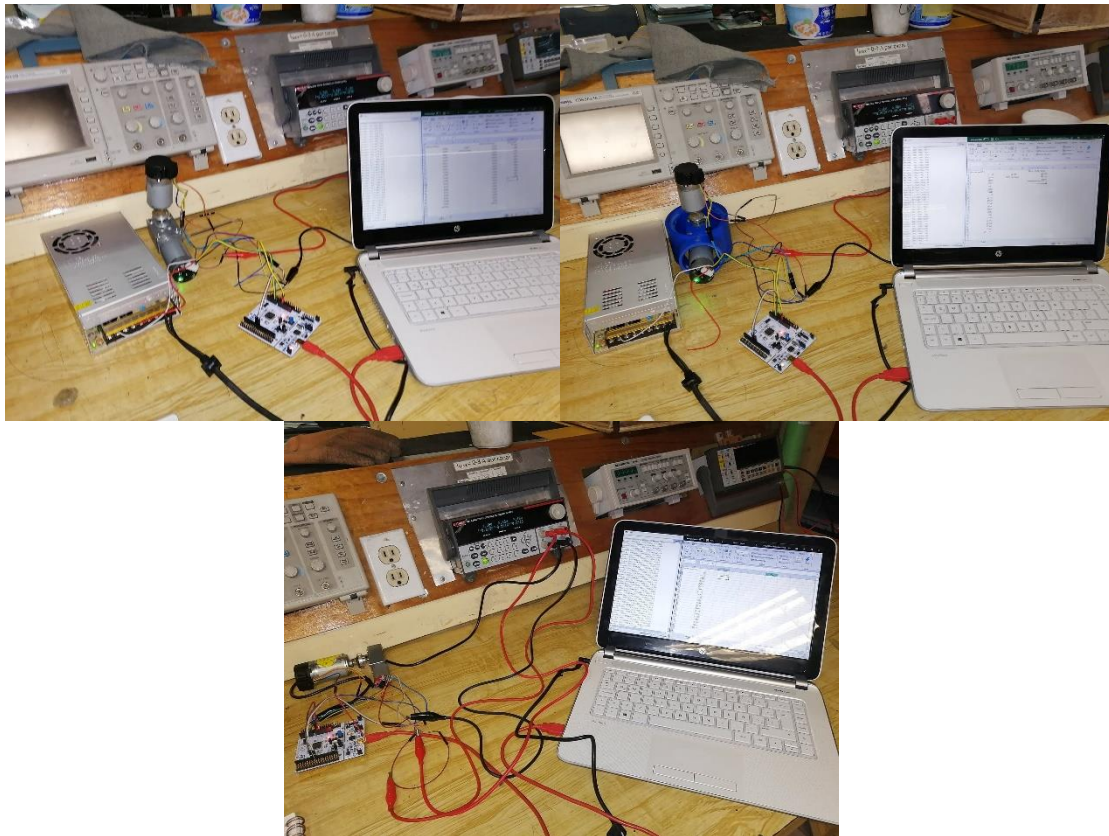


FIGURA 63.-MEDICIÓN DE PULSOS POR MOTOR

Una vez obtenido el cálculo de pulsos por revolución de cada motor y adaptado el programa de lectura del encoder en la tarjeta, se pudo desarrollar un programa de medición en el cual conocemos el ángulo exacto del eje de salida de la caja de reducción en base a los pulsos medidos del eje del motor, dando como resultado un sistema de instrumentación capaz de monitorear las posiciones de cada motor utilizado.

2.4.14. Sistema de potencia

El sistema de potencia desarrollado para la alimentación y control del robot constará de puentes-H, estos han sido diseñados utilizando transistores MOSFET complementarios y no circuitos integrados, como el módulo L298D, debido a que el sistema deberá ser capaz de proveer la energía necesaria a los respectivos motores, este tipo de circuitos integrados están limitados en cuanto a la corriente que pueden soportar en

sus salida siendo de 2A a 3A máximo, en caso de que soporten una corriente mayor los circuitos integrados aumentan su valor, es por ello que se ha optado por el desarrollo y construcción de puentes H propios.

Los puentes-H como se mencionó anteriormente utilizarán transistores MOSFET complementarios, proponiendo los elementos IRF5305 y IRF100B202, cuyas hojas de especificaciones se podrán encontrar en el apartado de Anexos, esto fue con el objetivo de mejorar la eficiencia del puente, debido a que a diferencia de los transistores bipolares, los MOSFET son activados a partir de una diferencia de tensión en su compuerta y poseen una resistencia entre Drenaje y Fuente muy pequeña cuando son activados, esto provoca que la caída de tensión sea mínima en el elemento, mientras que en los transistores bipolares existe el voltaje de saturación en la unión entre el colector y el emisor que ronda un valor aproximando de 1V, por lo mencionado anteriormente es que se han seleccionado los MOSFET como elementos de potencia y no transistores bipolares.

El control de activación del puente-H se hizo con uso de optoacopladores con salida transistor concretamente el elemento ILD5, a fin de aislar de manera óptica el sistema de potencia y el sistema de control, esto evitará que en caso de presentarse una falla en el sistema de potencia llegue al sistema de control. Además con objetivo de eliminar las fallas provocadas por los picos de tensión negativos provocados por los motores se han agregado los diodos externos, dependiendo del modelo de motor que estarán alimentando cada puente H se seleccionaron los diodos 1N5400 para los motores JGY371 debido a que estos llegan a consumir de corriente hasta 1.5 amperes, mientras que para los motores presentes en el segundo y tercer grado de libertad se eligieron los diodos GI750, esto debido a que este tipo de motores llegan a consumir 6 amperes en su funcionamiento, asimismo se han colocado las resistencias R3, R4, R5 y R7 debido a que los MOSFET son muy sensibles a las corrientes estáticas, con las resistencias se evita que los elementos se autodestruyan por las corrientes estáticas y aseguran un comportamiento estable de funcionamiento; se puede observar todo lo anteriormente mencionados en la Figura 64 se presenta el diseño esquemático del circuito desarrollado.

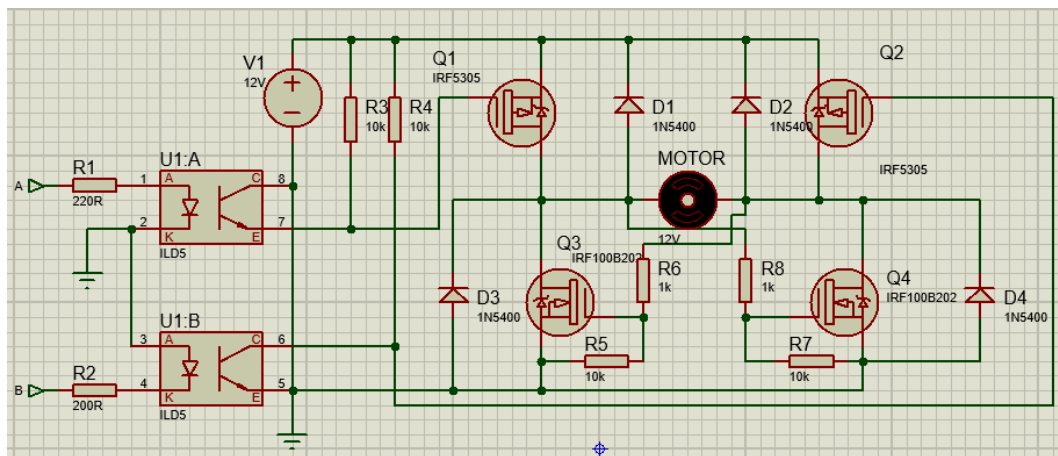


FIGURA 64.- DISEÑO ESQUEMÁTICO DE CIRCUITO DE POTENCIA

2.4.15. Modos de funcionamiento de Puente-H

Los modos de funcionamiento del puente-H serán explicación a continuación:

Modo Detenido

Cuando las entradas de $A=0$ y $B=0$, el motor se detendrá. Los MOSFET Q1 y Q2 actúan como interruptores abiertos al existir un voltaje positivo en su compuerta, a su vez Q3 y Q4 quedan desactivados al existir un voltaje 0 en su compuerta.

Modo Giro Inverso

Cuando las entradas de $A=0$ y $B=1$ (5 [V]), el motor opera en modo giro inverso. Q1 actúa como interruptor abierto, mientras que Q2 como interruptor cerrado al tener un voltaje 0 en su compuerta, esto permite un flujo de corriente a través de R6 y R5 que activa Q3 lo que permite el flujo de corriente a través del motor, Q4 se comporta como interruptor abierto al existir un voltaje 0 en su compuerta.

Modo Giro Normal

Cuando las entradas de $A=1$ (5 [V]) y $B=0$, el motor opera en modo giro Normal. Q1 actúa como interruptor cerrado al tener un voltaje 0 en su compuerta, mientras que Q2 como interruptor abierto al tener un voltaje positivo en su compuerta, esto permite un flujo de corriente a través de R8 y R7 activa Q4 lo que permite el flujo de corriente a través del motor, Q3 se comporta como interruptor abierto al existir un voltaje 0 en su compuerta.

Modo No Permitido

Cuando las entradas de $A=1$ (5 [V]) y $B=1$ (5 [V]), todos los MOSFET serán activados lo cual provocará un corto circuito dentro del sistema destruyendo así los elementos.

2.4.16. Circuito impreso de sistema de potencia

Con el diseño del esquemático del puente-H, se desarrolló el circuito impreso, el cual es presentado en la Figura 65.

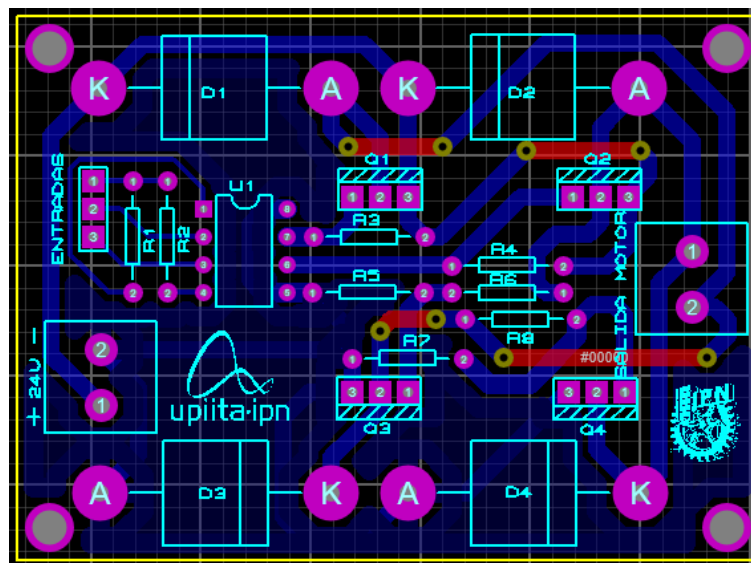


FIGURA 65.- CIRCUITO IMPRESO DE POTENCIA

2.4.17. Vista tridimensional circuito de potencia

Asimismo, con ayuda de las herramientas que ofrece el software Proteus 8 Professional se ha obtenido la vista tridimensional del circuito a fin de apreciar de una manera más visual la disposición final de los elementos dentro del circuito, esta vista es presentada en la Figura 66.

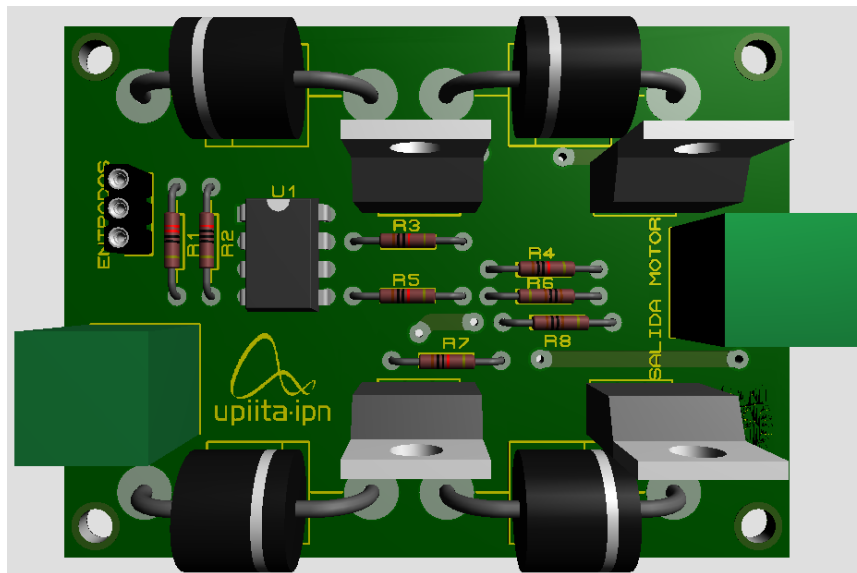


FIGURA 66.- VISTA TRIDIMENSIONAL DE CIRCUITO DE POTENCIA

2.4.18. Circuito de multiplexado

A causa de que el robot realizará un movimiento de manera secuencial, es decir, no se moverán todos los actuadores de manera simultánea, y como una manera de reducir costos de material para el sistema de potencia, se eligió realizar un circuito de multiplexado de las salidas de control, se decidió hacer uso de relevadores debido a que estos trabajan a bajas frecuencias, además estos elementos son capaces de soportar las corrientes presentes en el sistema generadas por el movimiento de los motores.

El control de activación de los relevadores se realizó usando optoacopladores, a fin de aislar las señales de control y de potencia de los circuitos, el circuito de optoacoplador utilizado fue el ILQ1, el cual trae integrados 4 optoacopladores en un solo chip, y cuyas características eléctricas (ver Anexo B) son suficientes para controlar el encendido y apagado de los relevadores.

En la Figura 67 se puede observar el diseño esquemático del circuito desarrollado, el cual está compuesto por los relevadores y optoacopladores para realizar el multiplexado de las señales de activación de los motores.

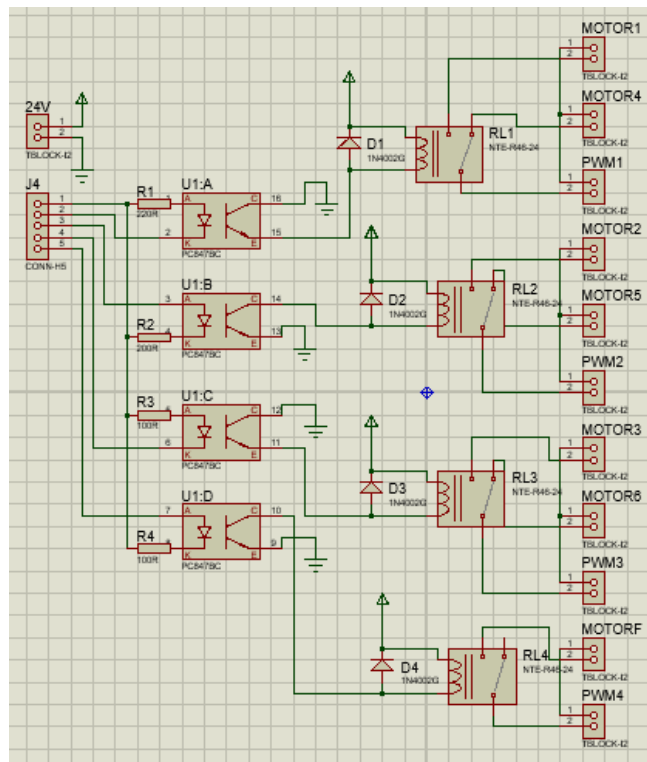


FIGURA 67.-DISEÑO ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE MULTIPLEXADO

2.4.19. Circuito impreso de multiplexado

Ya con el diseño esquemático del circuito de multiplexado, se desarrolló el circuito impreso de tal manera que soportará las corrientes y voltajes que estarán presentes en el funcionamiento del sistema, tal se puede observar en la Figura 68.

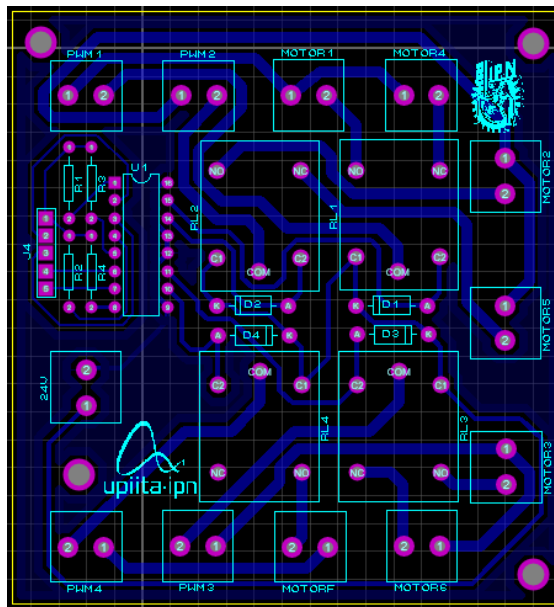


FIGURA 68.-CIRCUITO IMPRESO DE MULTIPLEXADO

2.4.20. Vista tridimensional circuito de multiplexado

Asimismo, con ayuda de las herramientas que ofrece el software Proteus 8 Professional se ha obtenido la vista tridimensional del circuito para facilitar la disposición final de los componentes al hacer la placa, esta vista es presentada en la Figura 69.

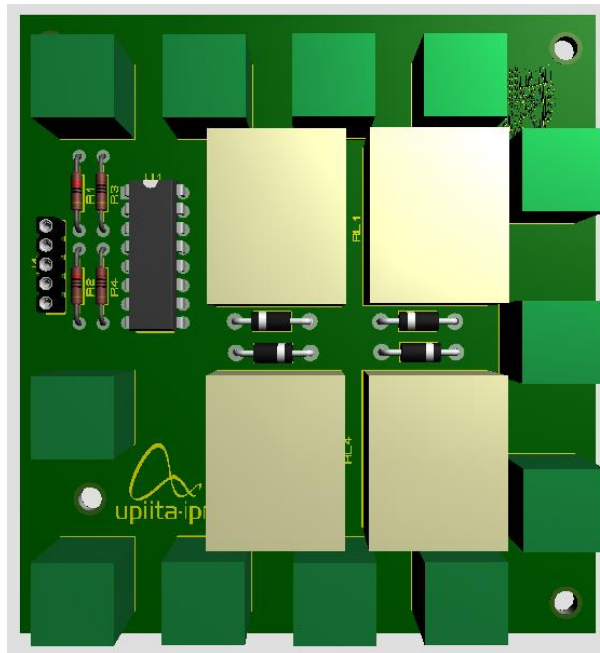


FIGURA 69.-VISTA TRIDIMENSIONAL DEL CIRCUITO DE MULTIPLEXADO

2.4.21. Diseño de gabinete

Para el diseño del gabinete que contendrá las placas de potencia y las de control se tomaron en cuenta distintos factores, siendo el principal, la capacidad del gabinete de poder disipar el calor generado por los circuitos de potencia. Al ser un uso continuo de los motores, cada placa estará consumiendo alrededor de 5 [A], lo cual causará un aumento drástico a la temperatura interna, y más asumiendo que serán tres placas de potencia. Cabe destacar que como los motores no estarán encendidos todos al mismo tiempo, el calor generado no será el equivalente a todas las placas, pero, aunque está no esté conduciendo, el calor residual generado por la corriente debe de ser disipado.

Aunado a lo anteriormente mencionado, se añadirán dos ventiladores para extraer la mayor cantidad de aire caliente del sistema, además de incluir ranuras a los costados para la libre respiración del sistema, por lo que se necesitará un material el cual sea de fácil maquinado y que resista la temperatura interna a la cual estará trabajando. Cabe destacar, que el gabinete no estará fijamente unido a ninguno de los componentes que estarán disipando la potencia, por lo que el gabinete únicamente estará sometido a convección por el aire que circulara dentro de él y al usar los ventiladores, estos disiparan el aire antes de que dicha potencia se pueda transmitir a las caras internas del gabinete.

Debido a esto el material que se utilizara para la construcción del gabinete será acrílico, principalmente por su facilidad al maquinado y costo, aunado de características mecánicas importantes como su conductividad térmica, la cual está muy por debajo de materiales como los metales, dando como resultado que el gabinete pueda ser tocado sin riesgo durante la operación del brazo robot. Además, de que por ser un polímero no conduce electricidad, dejando sin riesgo al operario que trabaje cerca de él.

Concluyendo con el espacio de trabajo, el cual debe de ser capaz de albergar a todas las placas y dejar espacio suficiente entre ellas para que circule el aire y no ocurra ningún inconveniente por algún cruce o corto circuito. Dando como resultado el diseño mostrado en la Figura 70.

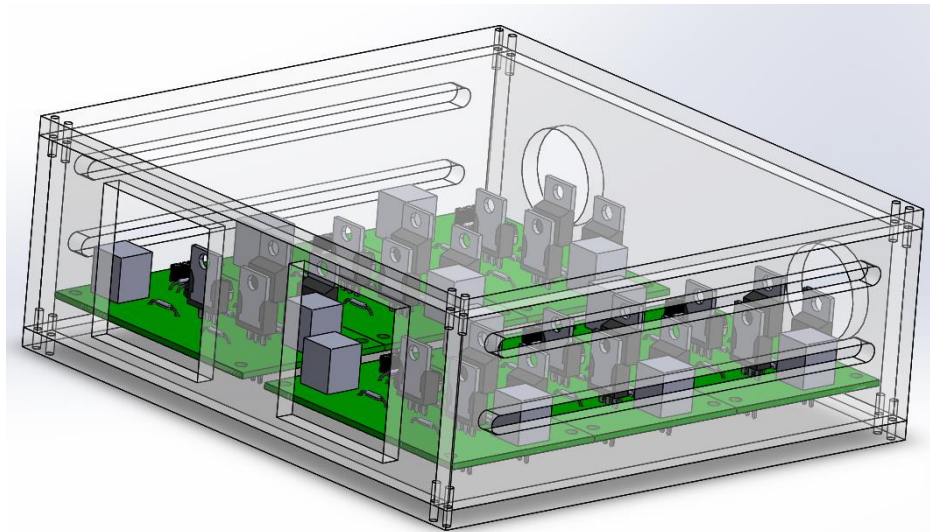


FIGURA 70.- VISTA TRIDIMENSIONAL DE GABINETE

2.4.22. Interfaz Gráfica

Para poder integrar todos los sistemas, realizar el procesamiento de los datos obtenidos a través de visión artificial y permitirle al usuario tener interacción con el robot, se desarrolló una interfaz en una GUI de Matlab, en esta GUI se expusieron los métodos que el usuario necesita para poder interactuar con el robot.

Se determinó que la GUI debía contener:

- **Encendido/Apagado:** Controla el encendido y apagado del brazo robótico.
- **Conexión/Desconexión:** Controla la conexión entre la interfaz y la tarjeta núcleo que controla al brazo robótico.
- **Toma de Foto:** Toma la foto a procesar para el cálculo de ruta y para comprobar que la disposición de nuestra cámara es la correcta además de poder verificar que nuestra área de trabajo está despejada.
- **Ejecutar Ruta:** Ejecuta una simulación de los movimientos secuenciales del brazo robótico, en esta se puede comprobar si el robot alcanzara los puntos que se propusieron, así como los movimientos que realizara, una vez finalizada la simulación se proseguirá a la ejecución de la secuencia en el brazo robótico.

La disposición final de los botones para la exposición de los métodos se observa en la Figura 71.

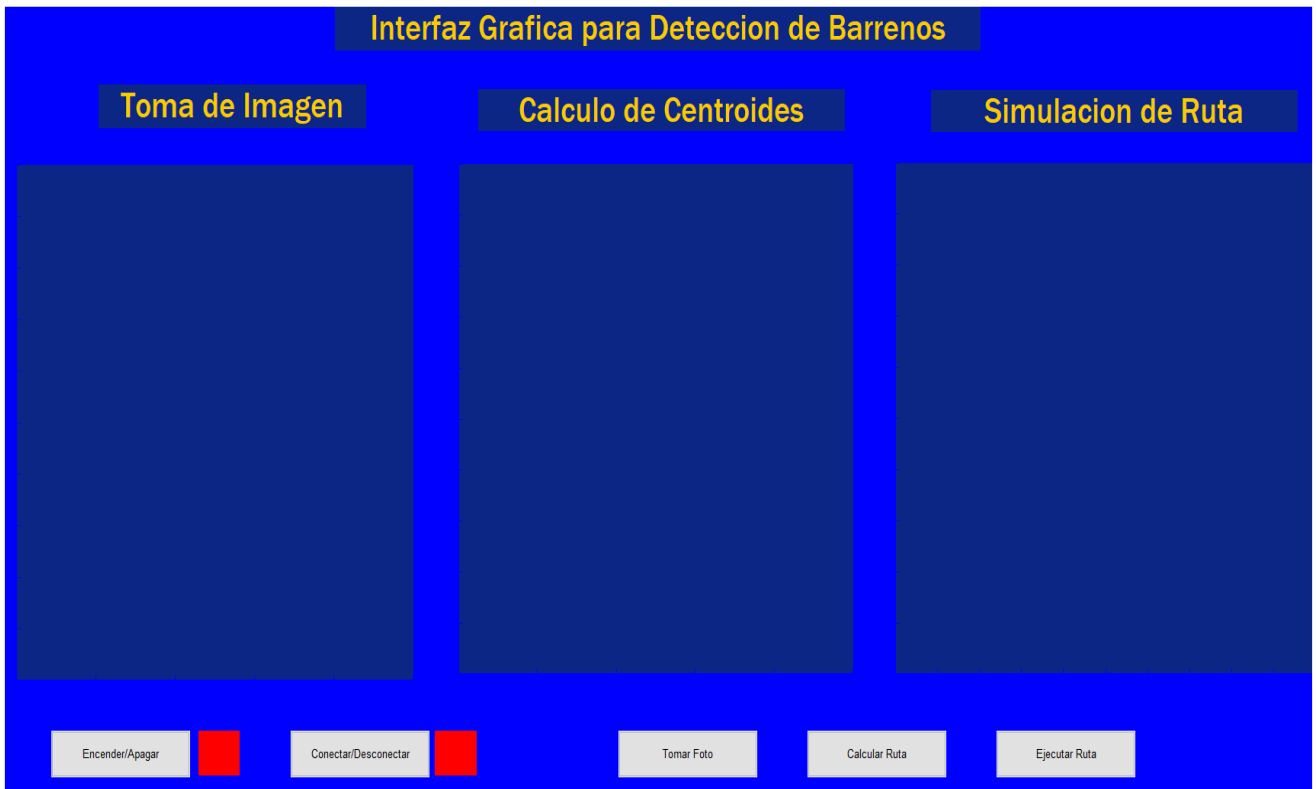


FIGURA 71.- DISPOSICIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA

El código utilizado para la inicialización de la interfaz se muestra en la Figura 72.

```
% --- Executes just before GUI is made visible.  
function GUI_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)  
    global status  
    global op  
    global cam  
    global cam2  
    status = 0;  
    op = 0;  
    cam = webcam(2);  
    cam2 = webcam(3);  
    set(handles.indicador, 'BackgroundColor', 'red');  
    set(handles.conectarIndicador, 'BackgroundColor', 'red');  
    handles.output = hObject;  
    guidata(hObject, handles);
```

FIGURA 72.-CÓDIGO DE INICIO DE INTERFAZ

El código desarrollado para el método en encendido/apagado se observa en la Figura 73.

```
% --- Executes on button press in controlEncendido.
function controlEncendido_Callback(hObject, eventdata, handles)
    global cam2
    global cam
    global status
    global foto
    global op
    status = get(handles.controlEncendido, 'Value');
    if status == 1
        op = 1;
        set(handles.indicador, 'BackgroundColor', 'green');
        axes(handles.figureToma);
        while op == 1
            foto = snapshot(cam2);
            image(foto);
        end
    else
        op = 0;
        set(handles.indicador, 'BackgroundColor', 'red');
        set(handles.conectarIndicador, 'BackgroundColor', 'red');
        axes(handles.figureToma)
        fotobg = imread('fondoColor.jpg');
        image(fotobg);
        axis off
    end
end
```

FIGURA 73.-ENCENDIDO Y APAGADO DE CÁMARA

Para la implementación del método de Conectar/Desconectar se utilizó el siguiente código:

```
function conectar_Callback(hObject, eventdata, handles)
    global status
    global SerPIC

    if status == 1
        statusConexion = get(handles.conectar, 'Value');
        if statusConexion == 1

            delete(instrfind({'Port'}, {'COM8'}));
            SerPIC = serial('COM8');
            set(SerPIC, 'BaudRate', 115200);
            warning('off', 'MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
            fopen(SerPIC);
            fwrite(SerPIC, '1');
            aux = fgetl(SerPIC);

            if aux == '1'
                set(handles.conectarIndicador, 'BackgroundColor', 'green');
            end
        end
    else
        set(handles.conectarIndicador, 'BackgroundColor', 'red');
        warning('off', 'MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
        fclose(SerPIC);
        delete(instrfind({'Port'}, {'COM8'}));
    end
end
```

FIGURA 74.-CONECTAR/DESCONECTAR CÁMARA

Para el método de Toma Foto se utilizó el código expuesto en la Figura 75.

```

% --- Executes on button press in tomaFoto.
function tomaFoto_Callback(hObject, eventdata, handles)
global foto
global status
global cam
global cam2
global op
global selcam
global ima

if status == 1
    op = 0;

    if selcam == 1
        foto = snapshot(cam);
        [ima, r] = imcrop(foto,[175 1 460 470]);
    else
        foto = snapshot(cam2);
        [ima, r] = imcrop(foto,[175 1 460 470]);
    end
    axes(handles.figureToma);
    image(ima);
    axis off
end

```

FIGURA 75.-CÓDIGO PARA TOMA DE FOTO

Para la implementación del método de Calcular Ruta se desarrolló el siguiente código:

```

% --- Executes on button press in calculaRuta.
function calculaRuta_Callback(hObject, eventdata, handles)
global status
global ima
global dato

if status == 1
    l = 1;
    o = 1;
    fotoBase = imread('placaInicial.bmp');
    [base, r2] = imcrop(fotoBase,[265 35 460 470]);
    bin = Filtrado(base, ima);
    b = imfill(bin,'holes');
    [d, obj] = bwlabel(b);
    for i = 1:obj
        [fil, col] = find(d == i);
        % Eliminacion de Objetos pequeños
        if length(fil) > 65 && length(col) < 150
            minf = min(fil);
            maxf = max(fil);
            minc = min(col);
            maxc = max(col);

            if round(((maxc-minc)/2)+minc) > 0 || round(((maxf-minf)/2)+minf) > 0
                cx(l) = round(((maxc-minc)/2)+minc);
                cy(l) = round(((maxf-minf)/2)+minf);
                l = l+1;
            end
        else
            b(fil,col)=0;
        end
    end

    h = [1 1 1; 1 1 1; 1 1 1];
    c = imdilate(b,h);
    map = c - b;

    axes(handles.figureCentroide)
    imshow(map)
    hold on
    plot (cx,cy,'bx-');
    hold off
    [Xc,Yc] = Conversion(cx,cy)
    axis off
    $phi = [15 20 90 90 90 30 25];
    phi = [90 90 90 90 90 90 90];
    theta = [0 0 0 0 0 0 0];
    dato = [cx'./10 cy'./10 theta' deg2rad(phi)']
end

```

FIGURA 76.-CÓDIGO PARA CÁLCULO DE RUTA EN BASE A CENTROIDES

Para el método de Ejecutar Ruta se utilizó el siguiente código:

```
% --- Executes on button press in ejecutarRuta.
function ejecutarRuta_Callback(hObject, eventdata, handles)
global dato
global status
if status == 1
    py=25;
    px=0;
    rb=0;
    T=5;

    % Medidas de Eslabones
    l1 = 11.7;
    l2 = 30.4;
    l3 = 29.8;
    l4 = 9.1;
    l5 = 11.8;
    l6 = 15.2;
    ld1 = 5;
    ld2 = 5;
    V = dato;
    for s=1:size(V,1)

        yv=V(s,1);
        xv=V(s,2);
        theta=V(s,3);
        phi=V(s,4);

        dx=yv-25;
        dy=60-xv;
        dz=-5.5;

        r13=-sin(theta)*cos(phi);
        r23=-cos(theta)*cos(phi);
        r33=-sin(phi);
        r22=-cos(theta)*sin(phi);
        r21=-sin(theta);
        r12=-sin(theta)*sin(phi);
        r11=cos(theta);

        X=dx-(15+l6+T)*r13;
        Y=dy-(15+l6+T)*r23;
        Z=dz-(15+l6+T)*r33;

        q1=atan2(Y,X)+atan2((l4+ld2+ld1),sqrt(X^2+Y^2-(l4+ld2+ld1)^2));
        D=(X^2+Y^2-(l4+ld2+ld1)^2+(Z-l1)^2-l2^2-l3^2)/(2*l2*l3);
        q3=atan2(-sqrt(1-D^2),D);

        q2=atan2(Z-l1,sqrt(X^2+Y^2-(l4+ld2+ld1)^2))-atan2(l3*sin(q3),l2+l3*cos(q3));

        E=-r23*cos(q1)+r13*sin(q1);
        q5=atan2(sqrt(1-E^2),E);

        F=-r22*cos(q1)+r12*sin(q1);
        G=-r21*cos(q1)+r11*sin(q1);

        q6=atan2(-F,G);

        H=r13*cos(q1)*cos(q2+q3)+r23*cos(q2+q3)*sin(q1)+r33*sin(q2+q3);
        I=r33*cos(q2+q3)-r13*cos(q1)*sin(q2+q3)-r23*sin(q1)*sin(q2+q3);

        q4=atan2(H,-I);
        % Medidas de Eje
        xm = -50;
        xma = 100;
        ym = -75;
        yma = 125;
        zm = -25;
        zma = 75;
```

```

% Convencion D-H
% theta d a alpha convention(0-D.H.) TipoJ(0-R,1-P) offset
L(1)=Link([0 11 0 pi/2 0]);
L(2)=Link([0 ld1 12 0 0]);
L(3)=Link([0 14+ld2 13 0 0]);
L(4)=Link([0 0 0 pi/2 0 pi/2]);
L(5)=Link([0 0 0 -pi/2 0]);
L(6)=Link([0 15+16 0 0 0]);
% Limites de Articulaciones
qli = [-pi pi;-pi pi;-pi pi;-pi pi;-pi pi];
% Construcción del Objeto Polar
MC = SerialLink(L,'name','B.A.B.A.S','qlim',qli);
qli=0;
q2i=0;
q3i=pi;
q4i=0;
q5i=0;
q6i=0;
Mq = [qli q2i q3i q4i q5i q6i];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
t=0:0.1:2;
q1v=qli+(q1-qli)*t'/2; %Movimiento q1-q2
q2v=q2i+(q2-q2i)*t'/2;
q3v=q3i*ones(size(t'));
q4v=q4i*ones(size(t'));
q5v=q5i*ones(size(t'));
q6v=q6i*ones(size(t'));
q1v=vertcat(q1v,q1*ones(size(t'))); %Movimiento q4 antes de q3
q2v=vertcat(q2v,q2*ones(size(t')));
q3v=vertcat(q3v,q3v);
q4v=vertcat(q4v,q4i+(pi-q4i)*t'/2);
q5v=vertcat(q5v,q5v);
q6v=vertcat(q6v,q6v);

q1v=vertcat(q1v,q1*ones(size(t'))); %Movimiento q3
q2v=vertcat(q2v,q2*ones(size(t')));
q3v=vertcat(q3v,q3i+(q3-q3i)*t'/2);
q4v=vertcat(q4v,pi*ones(size(t')));
q5v=vertcat(q5v,q5i*ones(size(t')));
q6v=vertcat(q6v,q6i*ones(size(t')));

q1v=vertcat(q1v,q1*ones(size(t'))); %Movimiento muñeca
q2v=vertcat(q2v,q2*ones(size(t')));
q3v=vertcat(q3v,q3*ones(size(t')));
q4v=vertcat(q4v,pi+(q4-pi)*t'/2);
q5v=vertcat(q5v,q5i+(q5-q5i)*t'/2);
q6v=vertcat(q6v,q6i+(q6-q6i)*t'/2);

q=[q1v q2v q3v q4v q5v q6v];
axes(handles.figureSimulacion);
MC.plotopt = {'workspace',[xm xma ym yma zm zma]};
plot3(dx,dy,dz,'ko','MarkerSize',10,'MarkerFaceColor','c','LineWidth',2),
axis([xm xma ym yma zm zma]);
hold on
for i=1:length(q1v)
    MC.plot(q(i,:));
end
pause(1);
for i=1:length(q1v)
    MC.plot(q(length(q1v)-i+1,:));
end
end
axis off

```

FIGURA 77.-CÓDIGO PARA SIMULACIÓN DE RUTA

Por último, se programó el mensaje de alerta para cuando la ruta finaliza además del envío de los datos calculados para la ejecución de la ruta, esto se observa en la Figura 78.

```
answer = questdlg('Simulación finalizada exitosamente. Desea ejecutar ruta?',...  
    'Simulación Completa',...  
    'Aceptar', 'Cancelar', 'Cancelar');  
switch answer  
case 'Aceptar'  
    fprintf(SerPIC, '%s', int2str(q1)+int2str(q2)+int2str(q3)+int2str(q4)+int2str(q5)+int2str(q6)+';');  
case 'Cancelar'  
end
```

FIGURA 78.- CÓDIGO PARA CONFIRMACIÓN Y ENVÍO DE RUTA

2.4.23. Efector Final

Debido a que el fin del sistema robótico es atornillar placas, se necesita seleccionar un efector final que nos permita cumplir con esta tarea. Partiendo de que el efector final estará directamente acoplado al brazo robótico y que el efector no se moverá al momento de atornillar, se decidió utilizar un motorreductor con un dado para matraca de ½ pulgada acoplado.

Debido a que el diseño del robot es modular y a la necesidad de tener una cámara montada sobre el efector para corroborar la posición del barreno, se propuso utilizar el motorreductor WIK25GAD012, el cual trabaja a 12 [VCD] y es capaz de otorgar un torque de 7 [kg*cm], suficiente para atornillar los elementos.

Es por esto que se diseñó una pieza capaz de mantener fijo el motor, además de soportar el torque ejercido al atornillar en conjunto con la reacción del brazo debido al torque. El diseño de las piezas se muestra en la Figura 79.

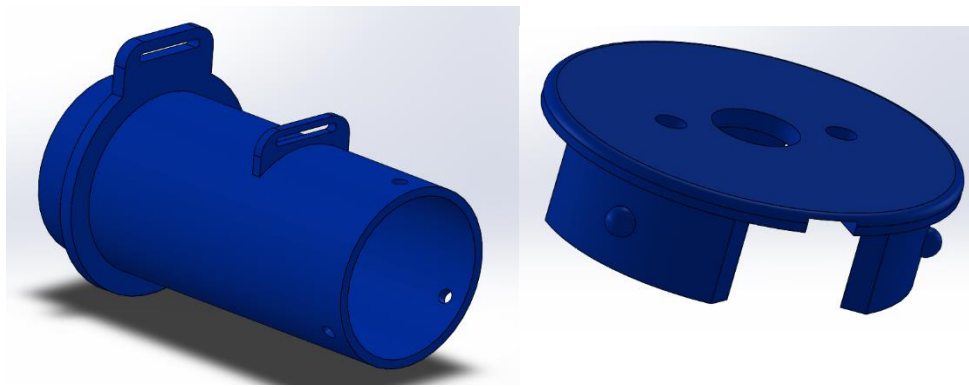


FIGURA 79.-CUERPO DE RETENCIÓN DE MOTOR PARA EFECTOR FINAL

Estas piezas entraran a presión y quedaran fijadas cuando las semiesferas que están colocadas en las paredes laterales de la pieza de contención se alineen con los orificios en las paredes laterales de la pieza que conformara el cuerpo del efector final.

Por último, se corroboró el correcto funcionamiento de ambas piezas realizando en un análisis estático para comprobar que la pieza no cederá ante el esfuerzo ejercido sobre ella, mostrando los resultados en la Figura 80.

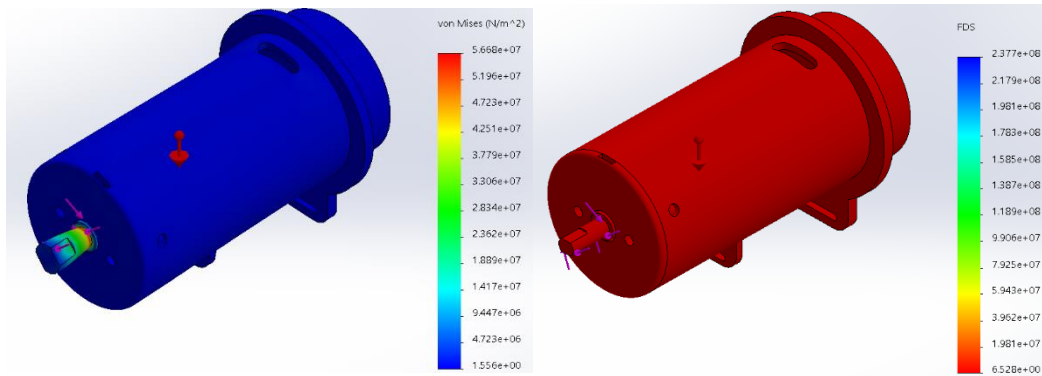


FIGURA 80.-RESULTADOS DE ANÁLISIS ESTÁTICO A EFECTOR FINAL

2.4.24. Selección de motores

Para la selección de cada motor se hizo un desarrollo simultaneo junto con el diseño mecánico, debido a que el diseño mecánico tenía que cumplir con todos los requerimientos físicos necesarios para el sistema, pero este no sería capaz de moverse sin los motores adecuado, y por la disposición de articulaciones propuesta, la mayor cantidad de torque necesario recaería en las articulaciones dos y tres. Para disminuir el torque que sería necesario de obtener de cada motor y además para realizar un control por juntas independientes, se propuso que el brazo robot tuviera un movimiento secuencial, siendo la secuencia propuesta:

1. Mover la primera articulación y la dos al mismo tiempo, mientras que la tercera articulación estuviera retraída para que el brazo de palanca causado por los últimos tres motores se viera reducido debido a la poca distancia que existiría entre el eje de giro y los motores. Mostrando dicho movimiento en la Figura 81.

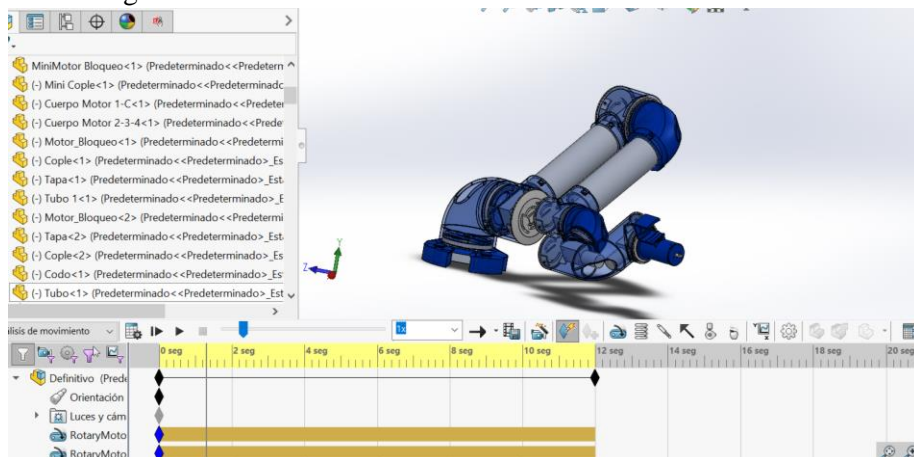


FIGURA 81.-PRIMER FASE DE MOVIMIENTO SECUENCIAL

2. Después de alcanzar las posiciones deseadas de la articulación uno y dos, la articulación cuatro se tendrá que rotar 90°, esto con la misma finalidad del movimiento anterior, que es que el brazo de palanca generado por los últimos dos motores se vea disminuido al acercarlos al eje de giro del motor tres. Mostrando dicho movimiento en la Figura 82.

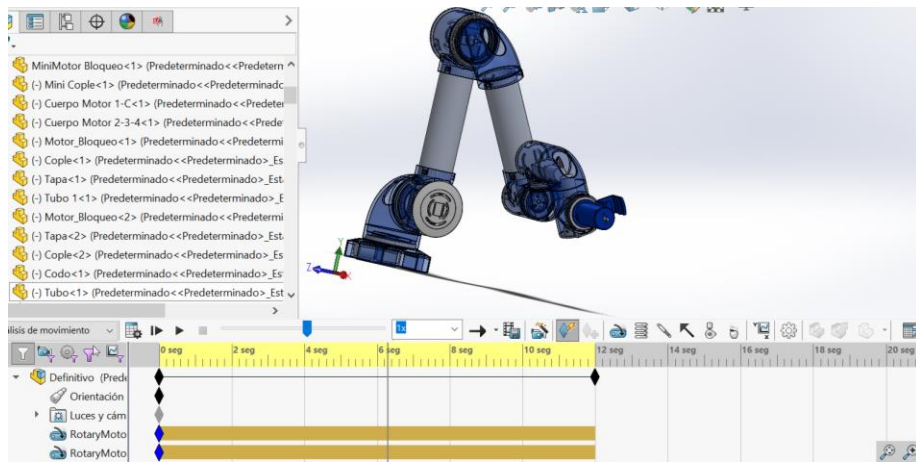


FIGURA 82.-SEGUNDA FASE DE MOVIMIENTO SECUENCIAL

- Después de alcanzar la posición deseada de la articulación tres, las últimas tres articulaciones pueden moverse en conjunto sin ningún inconveniente, por lo que su movimiento será simultáneo. Mostrando dicho movimiento en la Figura 83.

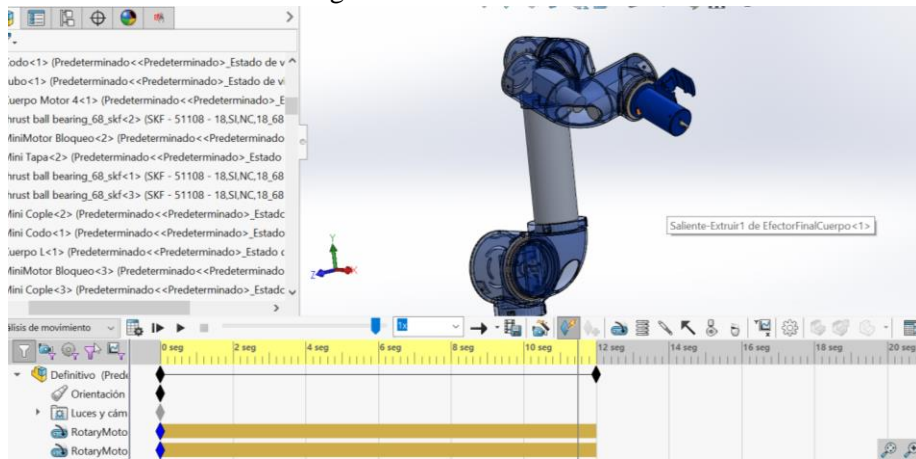


FIGURA 83.-TERCER FASE DE MOVIMIENTO SECUENCIAL

Al generar una trayectoria de prueba en la cual el brazo estuviera sometido a todos sus esfuerzos máximos debido a la gravedad, se obtuvieron los siguientes diagramas de momentos, cabe mencionar que estos diagramas indican los momentos en toda la trayectoria, pero la parte resaltada en estos, es la parte en la que el motor está en operación, compensando los demás intervalos con una caja de reducción con sistema de bloqueo mecánico. Mostrando el diagrama de momento del motor uno en la Figura 84, el del motor dos en la Figura 85, el del motor tres en la Figura 86, el del motor cuatro en la Figura 87, el del motor cinco en la Figura 88 y el del motor seis en la Figura 89.

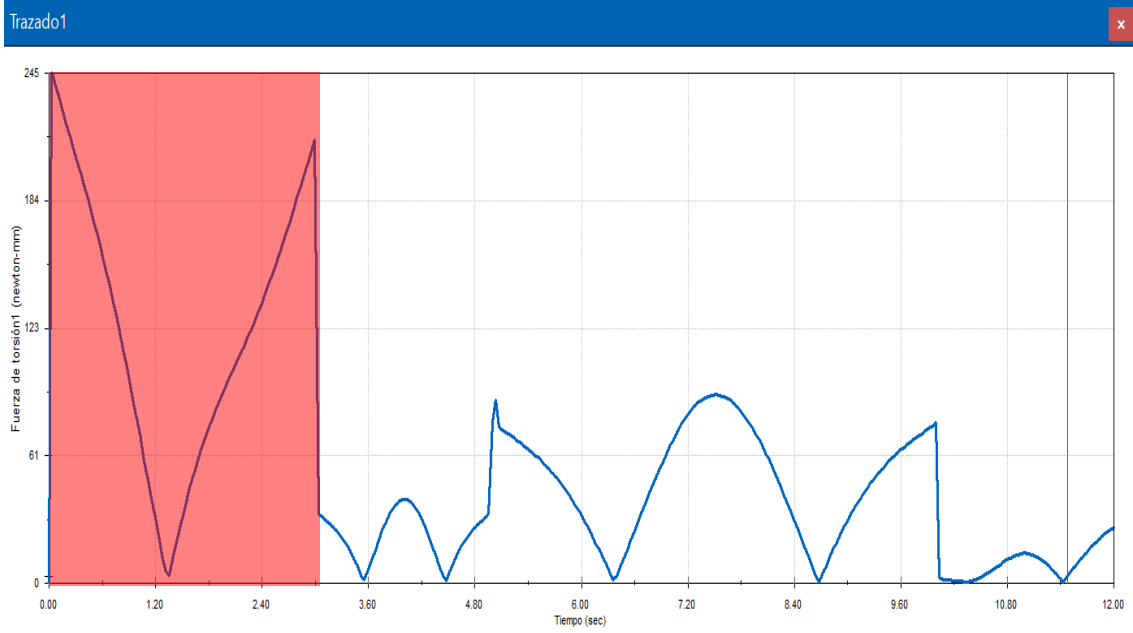


FIGURA 84.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 1

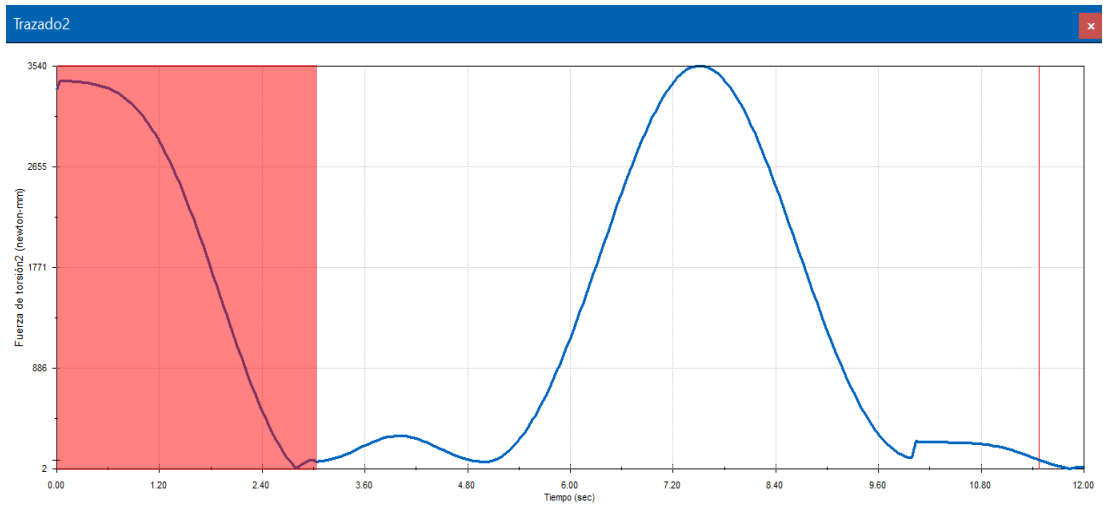


FIGURA 85.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 2

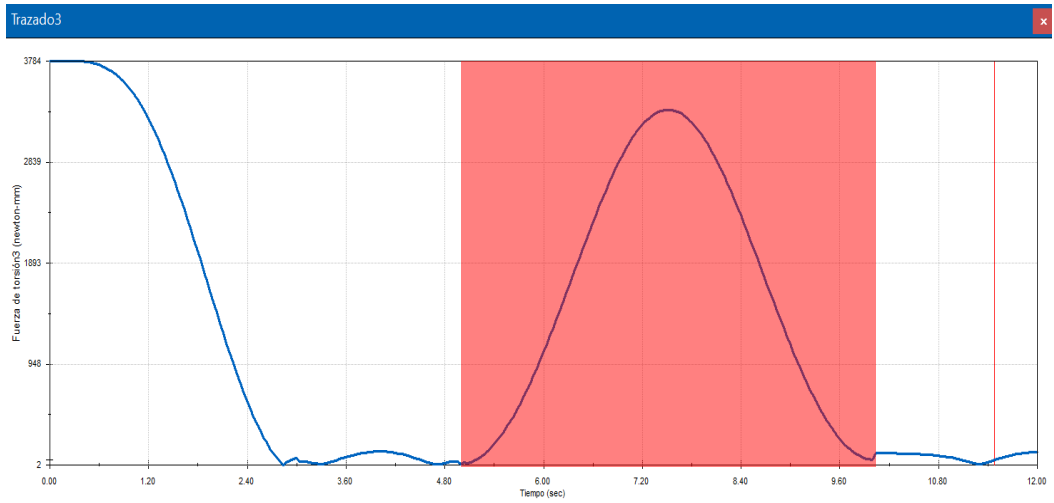


FIGURA 86.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 3

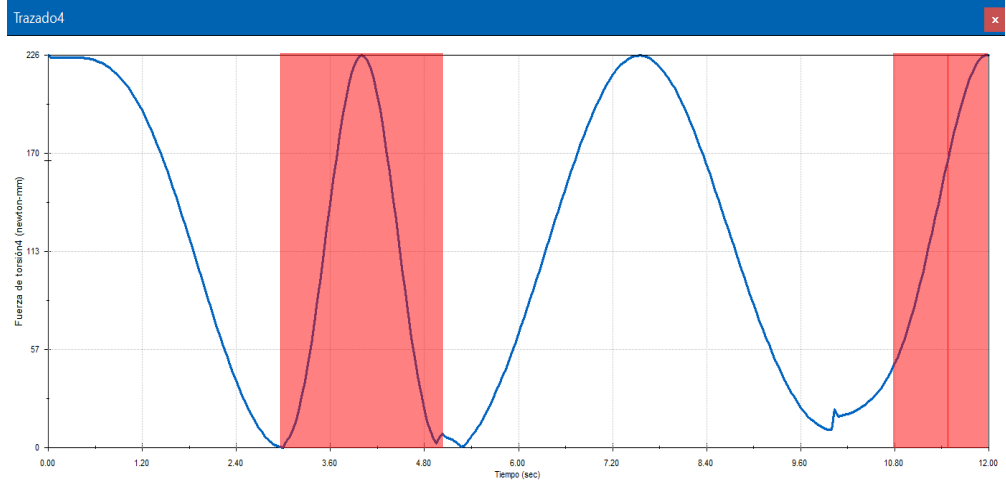


FIGURA 87.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 4

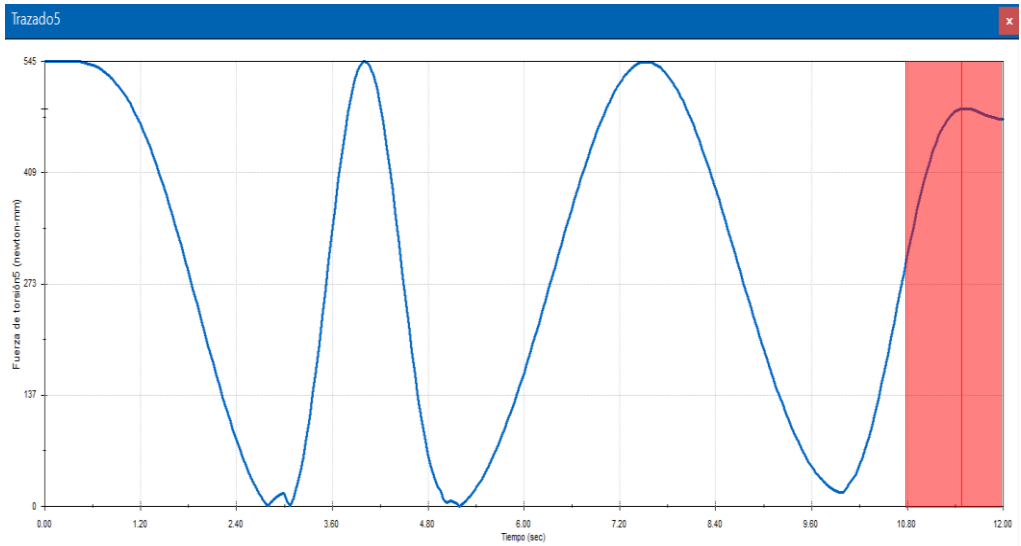


FIGURA 88.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 5

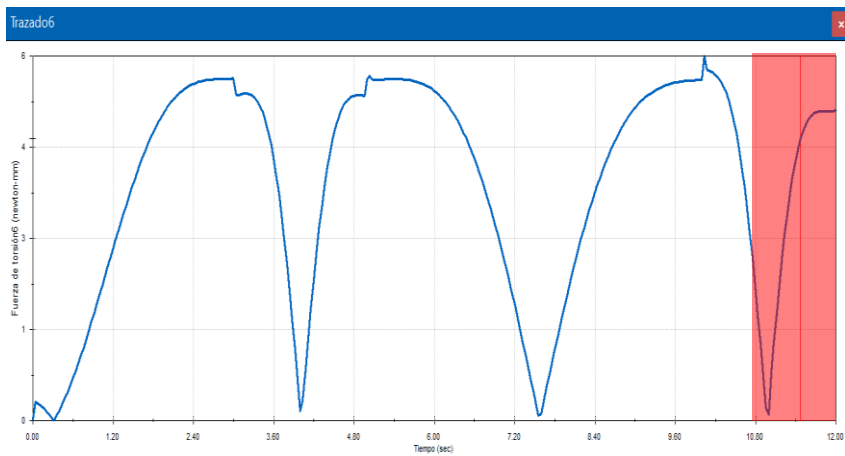


FIGURA 89.-DIAGRAMA DE MOMENTO DE MOTOR 6

Se puede observar que los motores que estarán sometidos a mayor cantidad de esfuerzo son los de las articulaciones uno y dos, ambos alcanzando torques de aproximadamente 35kg*cm, por lo que en estas articulaciones se decidió utilizar el motor GW4058-555 con la caja de reducción de 1:522, capaz de suministrar 70kg*cm, mostrando en la Figura 90 la tabla de características de este motor. Mientras que para las demás articulaciones que estarán sometidos a menor esfuerzo, se propuso utilizar el motor JGY-371 capaz de suministrar hasta 29kg*cm, mostrando en la Figura 91 la tabla de características de este motor.

Specifications									
GW4058-555									
DC 12.0V 7800rpm					23.6W				
gear ratio	1:17	1:36	1:54	1:72	1:108	1:212	1:280	1:522	1:776
no-load current (mA)	≤500	≤500	≤500	≤500	≤500	≤500	≤500	≤500	≤500
unloaded speed (rpm)	450	215	140	105	72	36	28	15	10
nominal torque (kg.cm)	10	20	30	40	60	70	70	70	70
rated speed (rpm)	230	105	70	54	36	18	19	13	9
rated current (A)	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0	≤4.5	≤3.9	≤3.0	≤2.0
locked rotor torque (kg.cm)	≥20.0	≥40.0	≥60.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0
locked rotor current (A)	≤13	≤13	≤13	≤13	≤13	≤13	≤13	≤13	≤13
DC 24.0V 15600rpm					(24V 95W)				
gear ratio	1:17	1:36	1:54	1:72	1:108	1:212	1:280	1:522	1:776
no-load current (mA)	≤650	≤650	≤650	≤650	≤650	≤650	≤650	≤650	≤650
unloaded speed (rpm)	900	430	280	210	145	72	56	30	20
nominal torque (kg.cm)	20	40	60	70	70	70	70	70	70
rated speed (rpm)	460	210	140	125	85	45	41	27	18
rated current (A)	≤10.0	≤10.0	≤10.0	≤9.0	≤8.0	≤6.5	≤5.0	≤4.0	≤3.5
locked rotor torque (kg.cm)	≥40.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0	≥70.0
locked rotor current (A)	≤26	≤26	≤26	≤26	≤26	≤26	≤26	≤26	≤26

FIGURA 90.-TABLA DE CARACTERÍSTICAS MOTOR GW4058-55

型號:JGY-371		參數表									
電壓		空載			最大效率點				堵轉		減速器
Voltage		No-load			At Max. Efficiency				Stall		Speedr. reducer
使用範圍	額定值	轉速	電流	轉速	電流	扭矩	功率	扭矩	電流	減速比	
Using Range	The Rated	Speed r/min	Current ma	Speed r/min	Current ma	Torque kg.cm	Power W	Torque kg.cm	Current A	Ratio	
12-18V	12V	115	30	95	110	0.22	1.5	1.1	600	37.3	
12-18V	12V	28	30	24	110	0.9	1.5	4.5	600	150	
12-18V	12V	20	30	17	110	1.2	1.5	6	600	200	
12-18V	12V	17	30	14	110	1.5	1.5	7.5	600	250	
12-18V	12V	13	30	10	110	1.9	1.5	9	600	324	
12-18V	12V	7	30	6	110	3.5	1.5	18	600	600	
12-18V	12V	4	30	3	110	5.7	1.5	29	600	972	

FIGURA 91.-TABLA DE CARACTERÍSTICAS MOTOR JGY-371

2.5. Integración de Disciplinas

Debido a que el brazo robótico se compone de diferentes sistemas que intercambian datos entre sí, se requerirá de un sistema que nos permita realizar este intercambio, para esto se decidió utilizar una tarjeta “Nucleo-F446RE” que nos permita verificar el estado de cada uno de los sistemas, de tal manera que al inicializarse el sistema de visión artificial y el sistema de muestreo corroboren que no existe ninguna falla.

Después de verificar que los sistemas están funcionando, el microcontrolador deberá enviar un pulso que indique que el sistema mecánico deberá de trasladarse a la posición de home, después de eso le indicara al sistema de visión artificial que comience con la toma de fotografías, una vez que el sistema de visión artificial realice el análisis correspondiente este deberá regresar al microcontrolador las posiciones de cada grado de libertad necesario para poder realizar la trayectoria de atornillado, a su vez el microcontrolador se encargara de realizar la distribución a cada microcontrolador esclavo que realizara el control de cada motor, esto se realizara de forma cíclica hasta que el sistema de visión artificial confirme que todos los tornillos han sido colocados de forma correcta.

En la Figura 92 se muestra una simulación de la integración de todos los sistemas que conforman el proyecto.

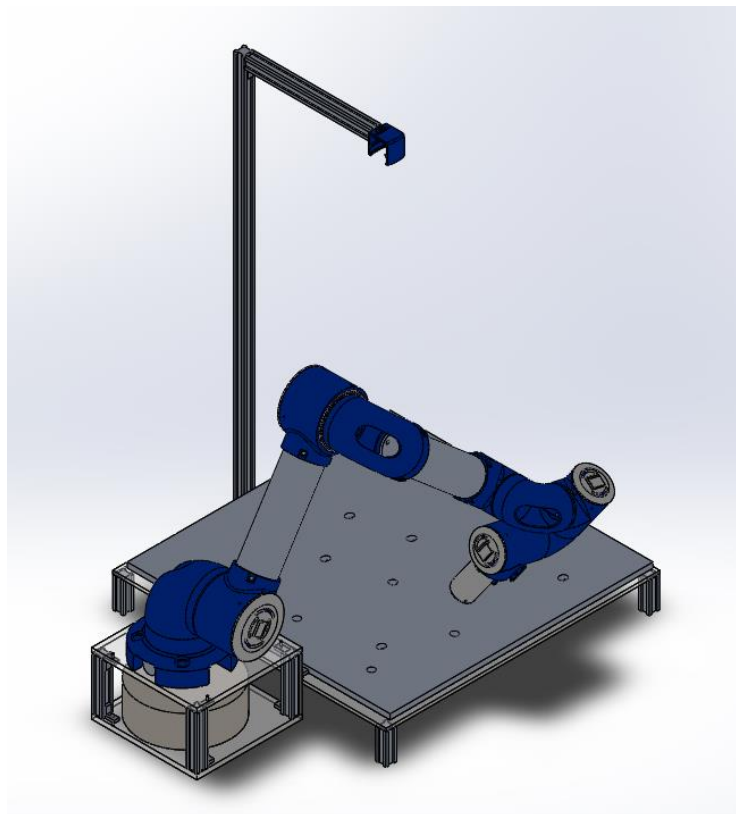


FIGURA 92.- SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS DE LA INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

En la Figura 93 se presenta el diagrama de flujo que describe el funcionamiento general del brazo robótico.

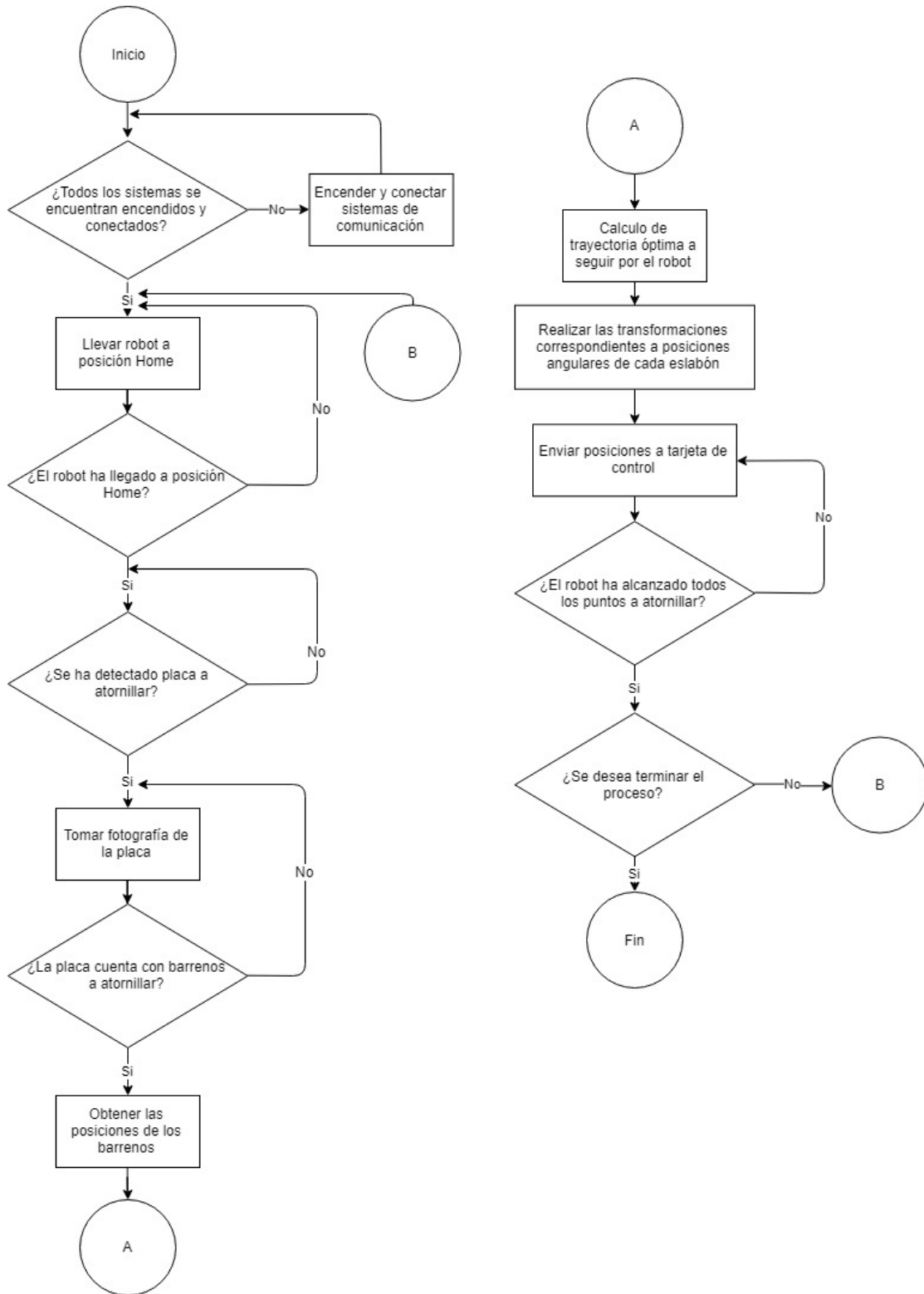


FIGURA 93.- DIAGRAMA DE FLUJO FINAL

3. MANUFACTURA E IMPLEMENTACION

3.1. Manufactura de Eslabones

El diseño de las piezas mecánicas que conformarían el brazo se basó en la idea de que este fuera modular, por lo que se propusieron geometrías las cuales se debían manufacturar por fundición, como esto generaría costos muy elevados se optó por una forma de manufactura más económica y sencilla, la cual fue la impresión en 3D.

Considerando los costos de la impresión en 3D la cual depende de la tolerancia, el relleno y el material, se propuso que fuera de PLA, el cual cumple con las características mecánicas requeridas para el prototipado en impresión y que además tiene un costo que nos permitió aumentar la calidad y definición de la impresión.

Por último, se propuso utilizar un relleno intermedio (50%), compensando este nivel de relleno con el factor de seguridad de las piezas, de tal manera que al utilizar un factor de seguridad elevado se aseguró que las piezas no fallaran por una condición de corte o tensión, el factor de seguridad mínimo del sistema propuesto fue de 3.59 en la posición de máximo esfuerzo.

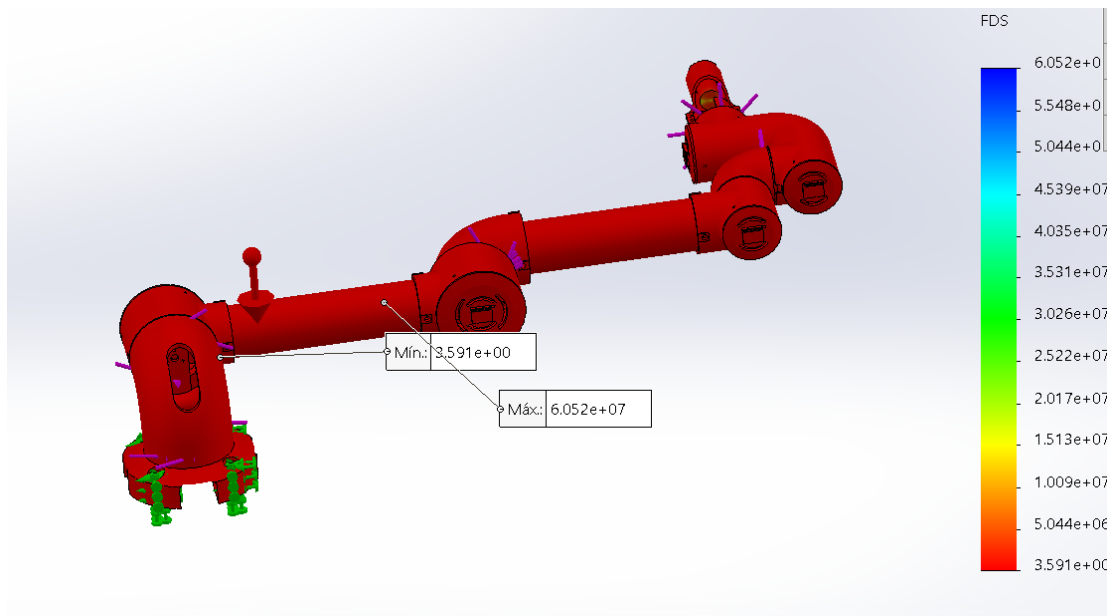


FIGURA 94.-FACTORES DE SEGURIDAD FINALES DEL ENSAMBLE

Para el maquinado de los eslabones de aluminio se realizó el corte de los tubos a la medida deseada utilizando una segueta mecánica como se observa en la Figura 95.



FIGURA 95.-CORTE DE ESLABONES POR SEGUETA MECÁNICA

Después con ayuda de un torno rectificar el diámetro del tubo al requerido para el ensamblaje como se muestra en la Figura 96.



FIGURA 96.-CAREADO Y REDONDEO DE TUBOS PARA ESLABONES

Por último, se realizó la perforación de los eslabones para colocar los tornillos que lo sujetaran a los cuerpos de las juntas. A continuación, se muestra el procedimiento en la Figura 97.



FIGURA 97.-PERFORACIÓN Y GENERACIÓN DE CUERDA DE TUBOS

3.2. Mesa

Para la manufactura de la mesa se cortó el perfil de aluminio en las piezas necesarias para conformar la base de la mesa y la base de sujeción del brazo, se determinó que las bases midieran 20cmx20cm considerando el radio del primer eslabón. Para la altura de las barras se consideró la necesidad de compensar la altura a la que estaría la cámara para poder ver completamente la placa, la cual es de 10cm. Dichas barras fueron recortadas con una segueta mecánica y rectificadas con la fresadora.

Debido a que la mesa no se sometería a esfuerzos mayores al peso del brazo robótico, se propuso usar escuadras de sujeción por ensamble de pilar y base, dando como resultado lo mostrado en la Figura 98.

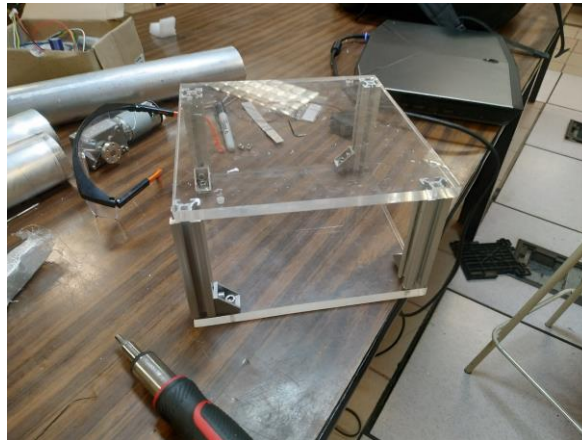


FIGURA 98.-ELABORACIÓN DE BASE DE ROBOT

Por último, para poder mantener la placa fija se propuso utilizar una placa de acrílico de 6mm de espesor con un área de 520x520mm. Esta placa se sujetó por medio de escuadras a la mesa principal siendo sostenida en la parte inferior por barras de aluminio estructural de 5cm de alto. Además de acoplarse una barra de aluminio estructural de 70cm de alto para la fijación de la cámara principal del sistema de visión artificial. Dando como resultado, la mesa donde será montado todo el sistema mostrado en la Figura 99.



FIGURA 99 .-INTEGRACIÓN DE BASE PARA CÁMARA Y PLACA

3.3. Placa

Para realizar las perforaciones de la placa se requería utilizar una herramienta que nos permitiera perforar con un ángulo de inclinación, por este motivo se decidió utilizar una fresadora la cual permitió mantener fija la placa y al mismo tiempo inclinar el cabezal, cabe destacar que debido a las dimensiones de la placa y de la bancada de la fresadora que se utilizó no se pudo realizar barrenos con una inclinación mayor a 30 grados. Para la elección de la posición de los barrenos no se tomó ninguna consideración especial, lo único que se busco fue que quedara dentro del área alcanzable por la fresadora, a continuación, se muestra en la Figura 100 las perforaciones realizadas para cada barreno.



FIGURA 100.-PERFORACIÓN DE PLACA PARA ESCENARIO DE PRUEBAS

En la Figura 101 se observa la placa después de la realización de todos los barrenos.

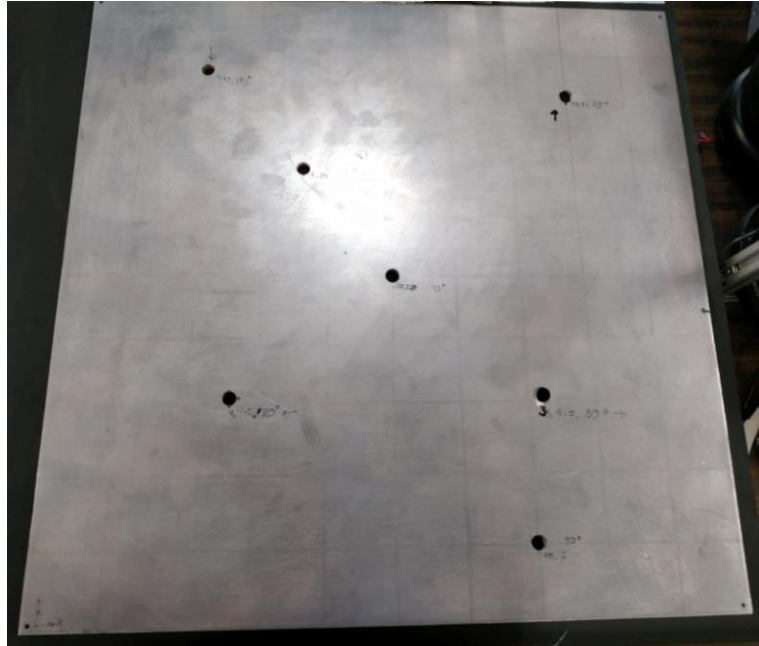


FIGURA 101.-FOTO DE PLACA CON LOS BARRENOS DE PRUEBA

3.4. Sistema de Potencia

Para la manufactura del sistema de potencia se utilizó la técnica de planchado, para esto se imprimieron los circuitos generados en el software Proteus 8 Professional en papel cauché, después con ayuda de una plancha casera se pasaron las pistas del papel cauché a una placa fenólica para después remover el cobre innecesario con ayuda de cloruro férrico, una vez removido el exceso de cobre se prosiguió a realizar las perforaciones pertinentes para finalmente soldar los componentes, en la Figura 102 se observa el procedimiento previamente descrito:



FIGURA 102.-ELABORACIÓN DE TARJETAS DE POTENCIA

3.5. Integración Final

Para la unión de la junta 1 a la junta 2 se utilizó un cople de aluminio con tornillos M3 y un rodamiento de bolas de 10 cm de diámetro, para unir la junta 2 a la junta 3 se utilizó el eslabón de aluminio de 190 mm de largo unido con tornillos de ¼ de pulgada, para la unión de la junta 3 a la junta 4 se utilizó un codo unido a la junta 3 por medio de un cople de aluminio con tornillos M3 y un rodamiento de bolas de 10 cm de diámetro y el eslabón de aluminio de 180 mm de largo unido con tornillos de ¼ de pulgada, para unir la junta 4 y la junta 5 se usó un codo sujeto por medio de un cople de aluminio con tornillos M4 y un rodamiento de bolas de 6 cm de diámetro, para la unión de la junta 5 a la junta 6 se unió desde el diseño de los eslabones, por último para unir el efector final con la junta 6 se utilizaron tornillos M4.

Para sujetar la placa de prueba a la base de la placa se utilizaron tornillos M3, de la misma manera para poder sujetar el brazo robótico a la base del robot se utilizaron tornillos de ½ pulgada, finalmente para unir estos dos sistemas se utilizaron un par de escuadras que unen los pilares de la base del robot con la base para la placa usando tornillos M3.

Para sujetar la base de la cámara principal a la base de la placa se utilizó una escuadra que las sujeta con tornillo M3.

En la Figura 103 podemos observar todos los sistemas integrados.

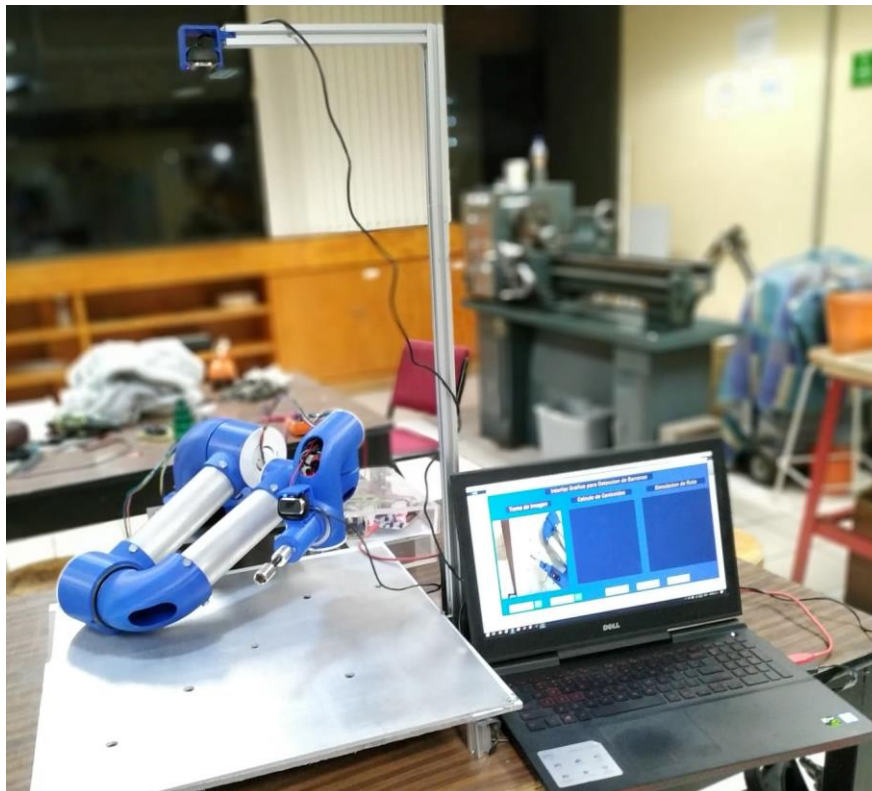


FIGURA 103.-INTEGRACIÓN FINAL DE TODOS LOS SISTEMAS

1. PRUEBAS Y RESULTADOS

1.1. Propios del Desarrollo Tecnológico

1.1.1. Validación mecánica

Para comprobar que el diseño mecánico fuera el adecuado y cumpliera con todas las condiciones que el sistema exige, se procedió a realizar dos tipos diferentes de análisis en el ensamblaje final: análisis estático y de frecuencia, los cuales consistían en poner a prueba al brazo robótico en la posición de mayor esfuerzo y en la posición que se espera tenga mayor ocurrencia.

Todos los análisis se ejecutaron con las cargas máximas que podrían ser desarrolladas dentro del brazo, es decir, por los torques máximos desarrollados por los motores por el mismo movimiento del brazo. Dando resultados satisfactorios en los dos estudios, empezando con los resultados desarrollados dentro de los análisis estáticos, siendo los esfuerzos mostrados son menores a los esfuerzos permitidos por los materiales que se estarán usando dentro del brazo robot. A continuación, se mostrará en Figura 104 la configuración completa del robot en la posición de máxima flexión y los esfuerzos desarrollados dentro de este, y en la Figura 105 la proyección de corte de la pieza donde se desarrolla el máximo esfuerzo, siendo esta pieza el rodamiento del segundo grado de libertad.

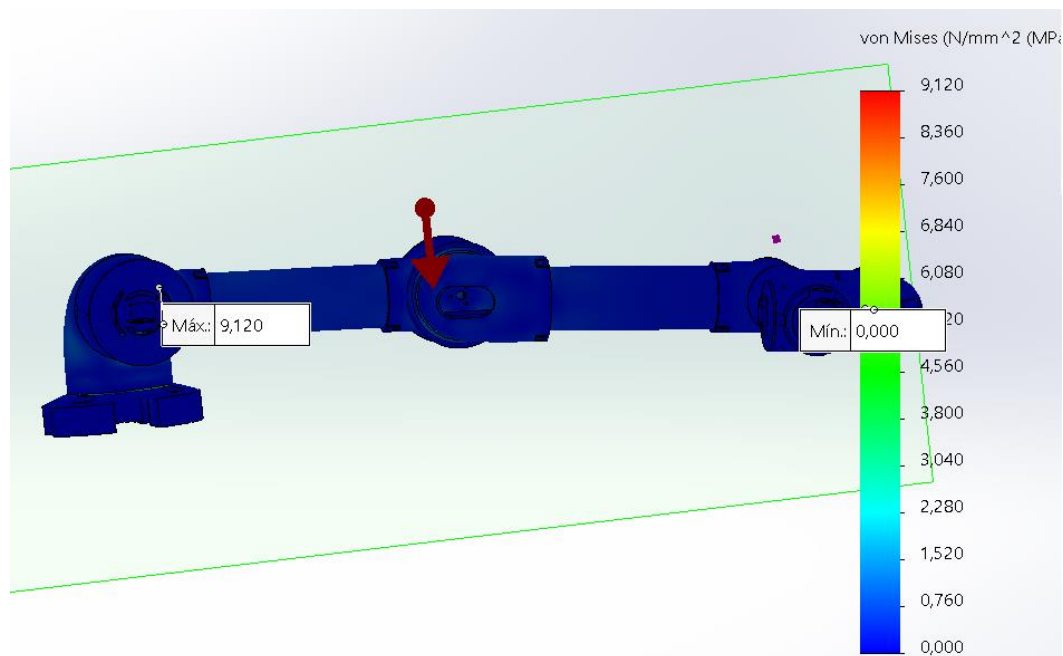


FIGURA 104.-GRÁFICA DE ESFUERZOS EN POSICIÓN DE MÁXIMA EXTENSIÓN

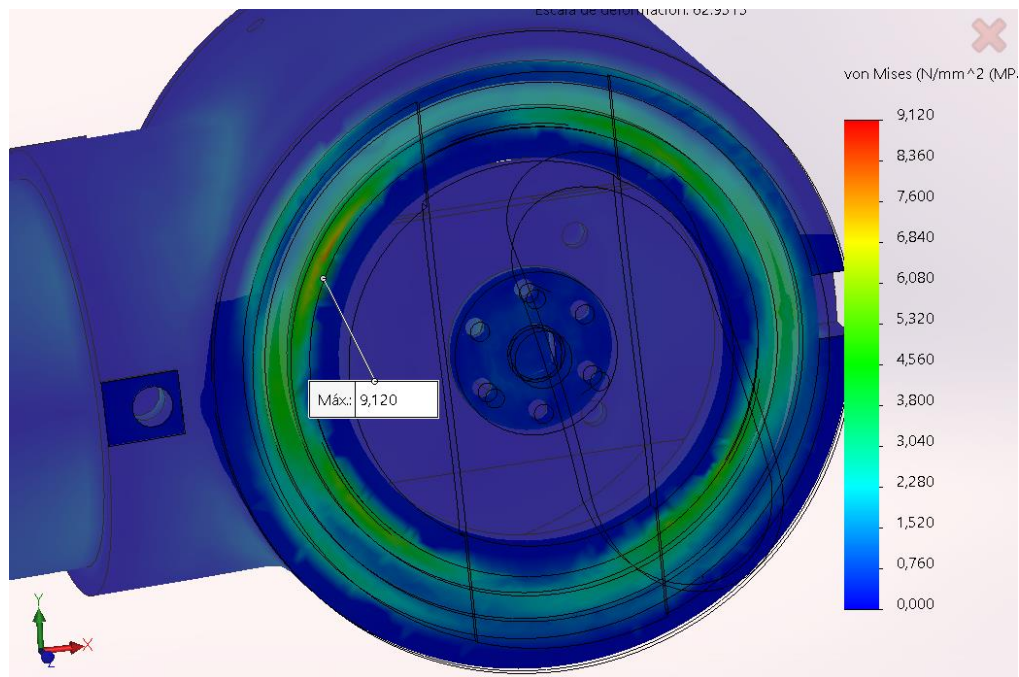


FIGURA 105.-ESFUERZO MÁXIMO PRESENTADO EN POSICIÓN DE MÁXIMA EXTENSIÓN

Culminando con el análisis de frecuencia, esto para corroborar que el movimiento de los motores no afectará con la integridad mecánica del brazo, además de enlistar las cinco principales frecuencias de resonancia, esto con la finalidad de evitarlas por medio del software y así tener aún mayor fiabilidad en la parte dinámica del desarrollo del brazo. Los resultados obtenidos para cada forma modal se exponen en la Tabla 4.

TABLA 4.-PRIMERAS 5 FRECUENCIAS RESONANTES DEL ENSAMBLAJE

Nº de modo	Frecuencia(Rad/seg)	Frecuencia(Hertz)	Período(Segundos)
1	89.824	14.296	0.06995
2	96.672	15.386	0.064995
3	313.49	49.893	0.020043
4	345.7	55.02	0.018175
5	536.11	85.325	0.01172

En la Figura 106 se exponen los resultados del estudio generado por SolidWorks.

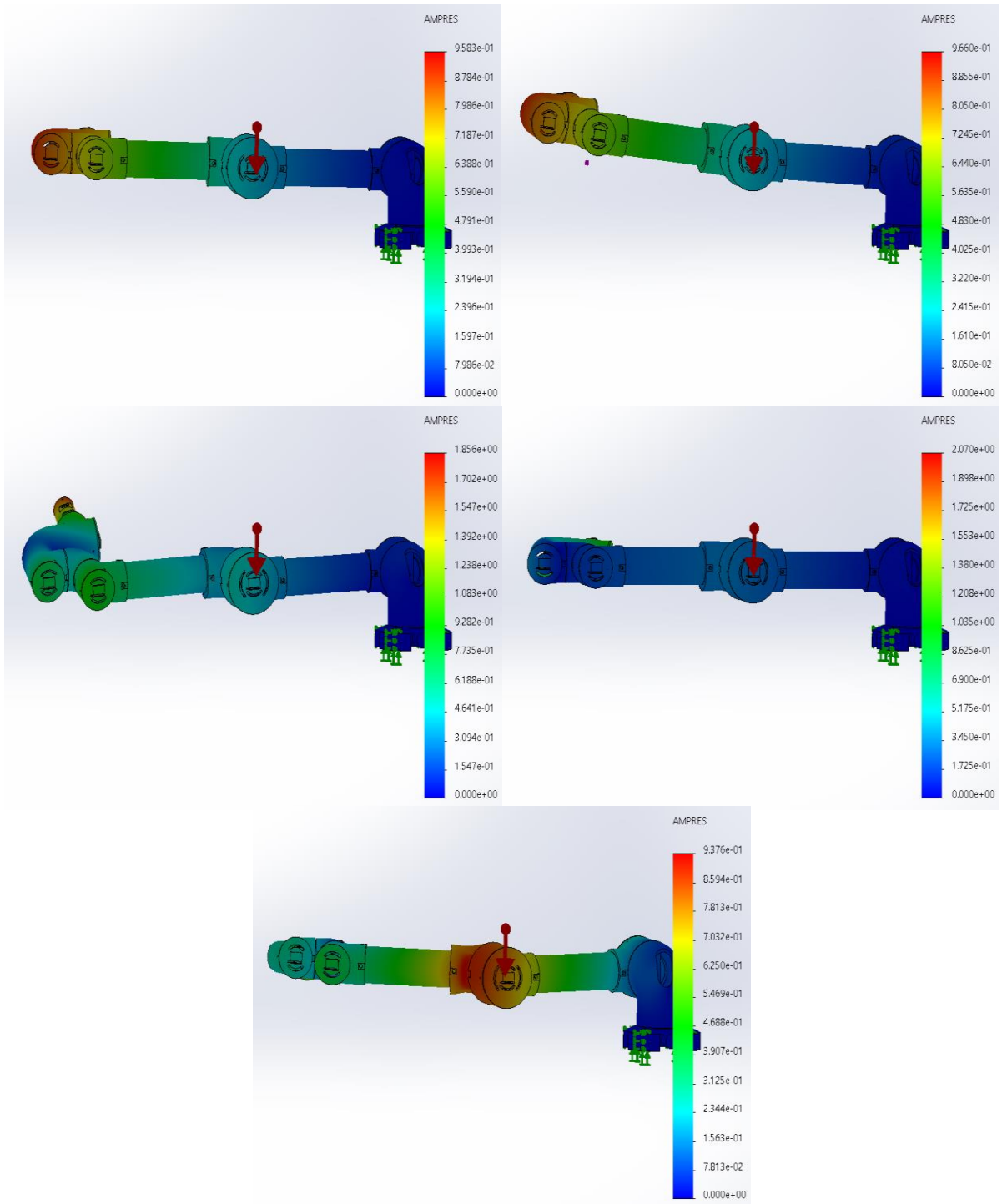
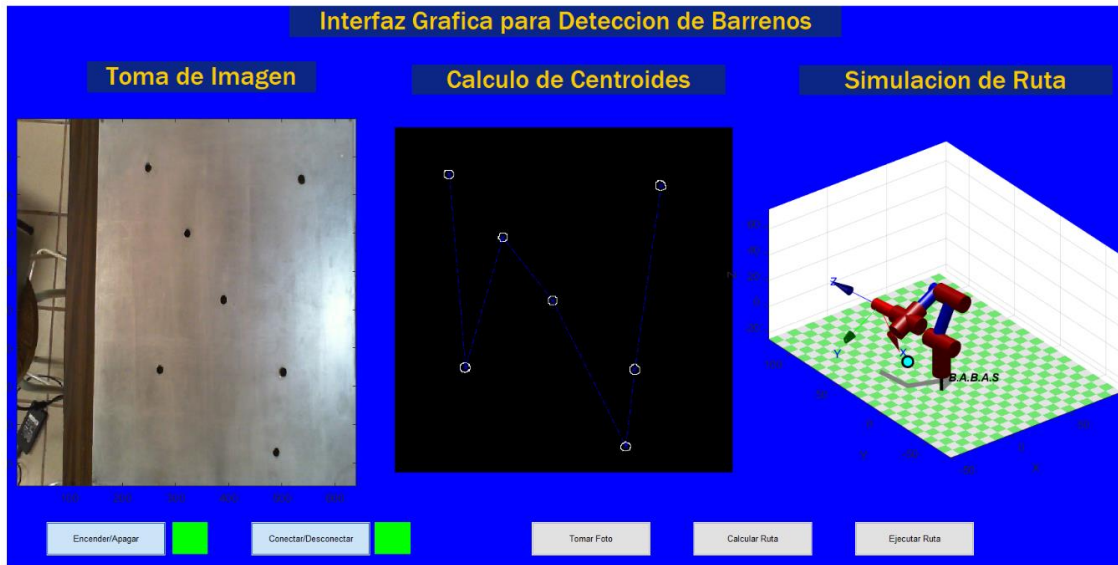


FIGURA 106.- FIGURAS MODALES DE LAS PRIMERAS 5 FRECUENCIAS RESONANTES

1.1.2. Validación del Sistema de Visión Artificial

Para la validación de la implementación del sistema de visión artificial se prosiguió a calcular los centroides de los barrenos, para después comparar esas medidas con las medidas reales de la placa. A continuación, se muestran los valores obtenidos por la interfaz en la Figura 107.-Resultados del Cálculo de Centroide



```
px =  
105 130 181 250 350 360 398  
  
py =  
427 157 340 250 50 154 408
```

FIGURA 107.-RESULTADOS DEL CÁLCULO DE CENTROIDE

Para el primer barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (105,427) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (103,429) mm como se observa en la Figura 108.

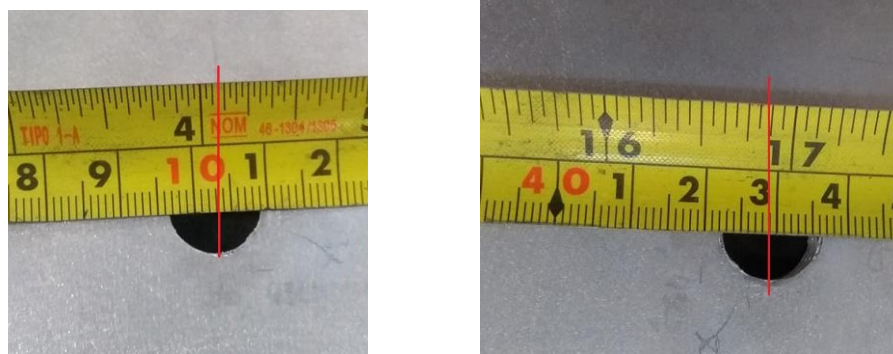


FIGURA 108.-MEDICIÓN EN MM DEL PRIMER BARRENO

Para el segundo barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (130,157) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (129,155) mm como se observa en la Figura 109.



FIGURA 109.- MEDICIÓN EN MM DEL SEGUNDO BARRENO

Para el tercer barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (181,340) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (181,339) mm como se observa en la Figura 110.

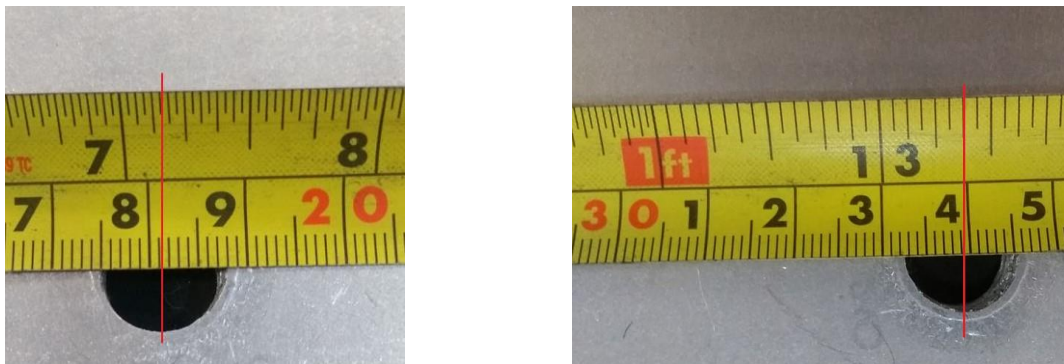


FIGURA 110.- MEDICIÓN EN MM DEL TERCER BARRENO

Para el cuarto barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (250,250) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (250,250) mm como se observa en la Figura 111.



FIGURA 111.- MEDICIÓN EN MM DEL CUARTO BARRENO

Para el quinto barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (350,50) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (350,52) mm como se observa en la Figura 112.

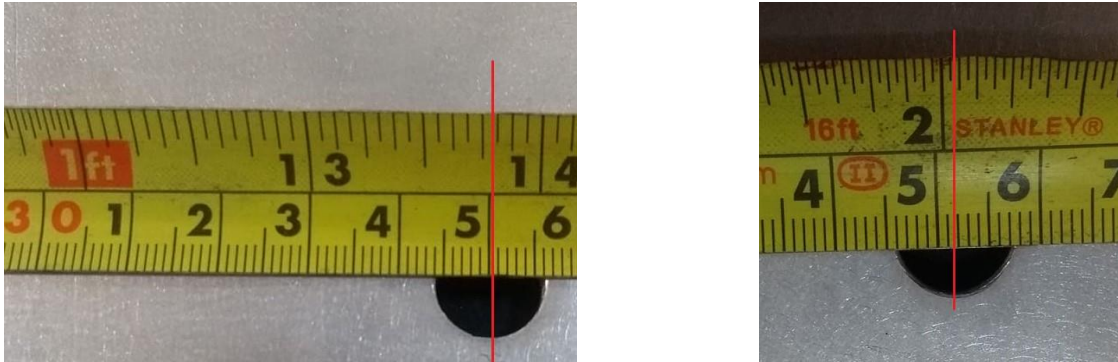


FIGURA 112.- MEDICIÓN EN MM DEL QUINTO BARRENO

Para el sexto barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (360,154) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (361,155) mm como se observa en la Figura 113.

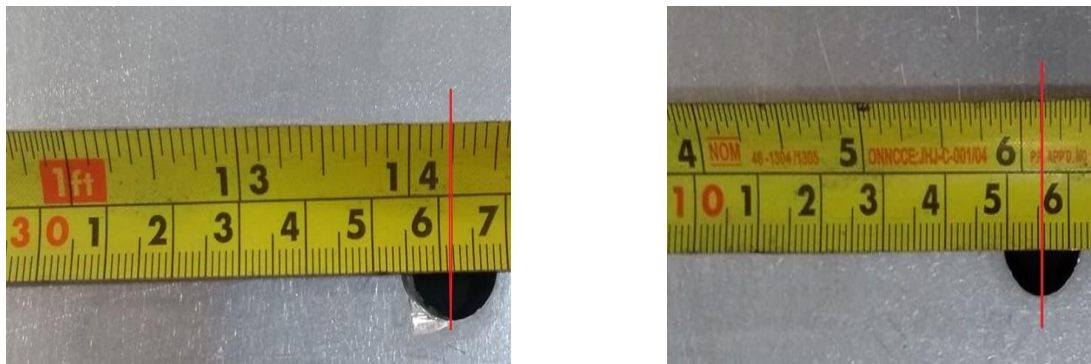


FIGURA 113.- MEDICIÓN EN MM DEL SEXTO BARRENO

Para el séptimo barreno la coordenada obtenida por el sistema de visión fue (398,408) mm, para corroborar que la posición obtenida fuera la correcta se midió el centroide del barreno, las medidas obtenidas fueron (400,411) mm como se observa en la Figura 114.

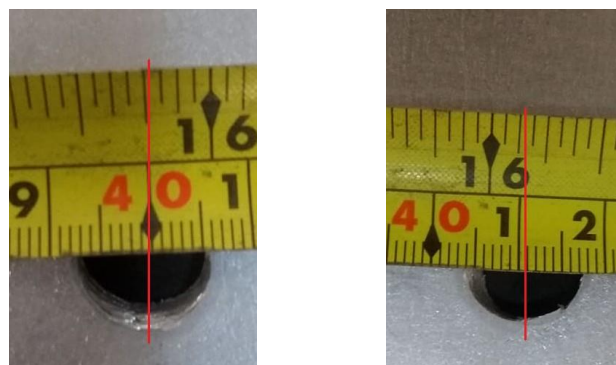


FIGURA 114.- MEDICIÓN EN MM DEL SÉPTIMO BARRENO

1.1.3. Validación de Control

1.1.3.1. Simulación de control dinámico

Para la simulación del control se realizó el cálculo de todas las ecuaciones del modelo dinámico del robot, partiendo del análisis dinámico mencionado con anterioridad. Debido a que se poseía un sistema de seis grados de libertad, el desarrollo de todas las ecuaciones del modelo dinámico se tuvo que realizar por medio del software “Wolfram Mathematica”. Mostrando a continuación el código empleado para el cálculo de la matriz de inercia en la Figura 115, la matriz de Coriolis en la Figura 116 y el vector gravitacional en la Figura 117.

```
Dq1 = m1 * Simplify[Transpose[Jv1] . Jv1] + Transpose[Jw1] . R1 . I1 . Transpose[R1] . Jw1 ;
Dq2 = m2 * Simplify[Transpose[Jv2] . Jv2] + Transpose[Jw2] . R2 . I2 . Transpose[R2] . Jw2 ;
Dq3 = m3 * Simplify[Transpose[Jv3] . Jv3] + Transpose[Jw3] . R3 . I3 . Transpose[R3] . Jw3 ;
Dq4 = m4 * Simplify[Transpose[Jv4] . Jv4] + Transpose[Jw4] . R4 . I4 . Transpose[R4] . Jw4 ;
Dq5 = m5 * Simplify[Transpose[Jv5] . Jv5] + Transpose[Jw5] . R5 . I5 . Transpose[R5] . Jw5 ;
Dq6 = m6 * Simplify[Transpose[Jv6] . Jv6] + Transpose[Jw6] . R6 . I6 . Transpose[R6] . Jw6 ;
Dq = Simplify[Dq1 + Dq2 + Dq3 + Dq4 + Dq5 + Dq6] ;
```

FIGURA 115.-CALCULO DE MATRIZ DE INERCIA

```
Cqqp = ConstantArray[0, {n, n}] ;
For[i = 1, i ≤ n, i++,
  For[j = 1, j ≤ n, j++,
    For[k = 1, k ≤ n, k++,
      Chr[i, j, k] =  $\frac{1}{2} * (D[Dq[[k, j]], q_i[t]] + D[Dq[[k, i]], q_j[t]] - D[Dq[[i, j]], q_k[t]])$  ;
    ] ;
  ] ;
For[j = 1, j ≤ n, j++,
  For[k = 1, k ≤ n, k++,
    Cqqp[[k, j]] = Simplify[Sum[Chr[i, j, k] * D[q_i[t], t], {i, 1, n}]] ;
  ] ;
```

FIGURA 116.-CALCULO DE MATRIZ DE CORIOLIS

```
g = {0 0 -9.8} ;
P = m1 * (g . Ocm1) + m2 * (g . Ocm2) + m3 * (g . Ocm3) + m4 * (g . Ocm4) + m5 * (g . Ocm5) + m6 * (g . Ocm6) ;
For[i = 1, i ≤ n, i++,
  If[i = 1, G = Simplify[D[P, q_i[t]]] ;,
  G = Join[G, Simplify[D[P, q_i[t]]]] ;
] ;
```

FIGURA 117.-CALCULO DE VECTOR GRAVITACIONAL

Al ingresar todas las ecuaciones dentro del notebook de Wolfram, fue capaz de desarrollar todo el sistema y dejar las matrices dependientes de las posiciones de cada articulación como de sus velocidades. Para poder migrar con mayor facilidad dichas ecuaciones de Wolfram a Matlab, se utilizó una librería de Wolfram que convierte los resultados en texto plano para poder ser editadas en Matlab, sin embargo, como para el cálculo

de dichas matrices es necesario realizar derivadas temporales, dentro del ambiente de Wolfram se propuso que las posiciones fueran dependientes del tiempo, por lo que, al momento de realizar la migración, las posiciones tendrían otros nombres. Para corregir lo anteriormente mencionado, se desarrolló un programa dentro del ambiente de NetBeans para interactuar con las ecuaciones como si fueran cadenas de texto y poder editarlas, mostrando dicho programa en la.Figura 118.

```

int i,j=0;
for (i=0;i<ec.length()-7;i++){
    if(ec.substring(i,i+4).equals(" ...")){
        ecc=ecc+ec.substring(j,i);
        i=i+7;
        j=i;
    }
}
ecc=ecc+ec.substring(j,ec.length());
ec=ecc;

j=0;
for (i=0;i<ec.length()-8;i++){
    if(ec.substring(i,i+9).equals("Subscript")){
        nec=nec+ec.substring(j,i)+"q"+ec.substring(i+12,i+14);
        i=i+17;
        j=i;
    }
    if(i<ec.length()-22){
        if(ec.substring(i,i+23).equals("Derivative(1) (Subscript)")){
            nec=nec+ec.substring(j,i)+"qp"+ec.substring(i+26,i+28);
            i=i+32;
            j=i;
        }
    }
}
nec=nec+ec.substring(j,ec.length());
System.out.println(nec);
}

```

FIGURA 118.-EDICIÓN DE ECUACIONES PARA INCORPORACIÓN A MATLAB

Una vez sometidas todas las matrices al código de NetBeans, fueron exportadas a Matlab como funciones en base de la posiciones y velocidad, para que, en cada iteración del código, se calcularan. Para el desarrollo de control se propuso como entrada de control el voltaje del motor, utilizando el modelo simplificado de este para el cálculo del torque, una vez obtenido el cálculo del torque se somete al modelo dinámico del robot para obtener la aceleración y con integradores numéricos, se obtiene la velocidad y la posición. Utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\tau = \frac{(rk_i V - J_m R \ddot{q} - (RB_m + k_b k_i) \dot{q}}{R}$$

$$\ddot{q} = D^{-1}(\tau - C\dot{q} - G)$$

Mostrando la implementación del código de control a continuación en la Figura 119.

```

e1(i)=q1-q1i;
while(abs(e1)>0.0003)
    ep=-qp(i,1);
    r=delta*e1(i)-ep;
    qrp=delta*e1(i);
    qrpp=delta*ep;
    V=Jm*R*qrpp+(R*Bm+kb*ki)*qrp+K*sign(r);
    if(V>24)
        V=24;
    elseif(V<-24)
        V=-24;
    end
    Tao=fr*(ki*V-Jm*R*qp(i,1)-(R*Bm+kb*ki)*qp(i,1))/R;
    T=[Tao;0;0;0;0];
    D=MatrizInercia(q(i,:));
    C=MatrizCoreolis(q(i,:),qp(i,:));
    G=VectorGravitacional(q(i,:));
    i=i+1;

    qpp(i,:)=(inv(D)*(T-C*qp(i-1,:)-G))';
    qpp(i,:)=[qpp(i,1),0,0,0,0];
    qp(i,:)=qp(i-1,:)+qpp(i,:)*dt;
    q(i,:)=q(i-1,:)+qp(i,:)*dt;
    e1(i)=q1-q(i,1);
end

```

FIGURA 119.-IMPLEMENTACIÓN DE LA SIMULACIÓN DE CONTROL CON EL MODELO DINÁMICO

Logrando que todos los errores tiendan a cero en todas las articulaciones y movimientos, y alcance el punto deseado en el ángulo requerido, mostrando grafica del error para cada articulación en la Figura 120.

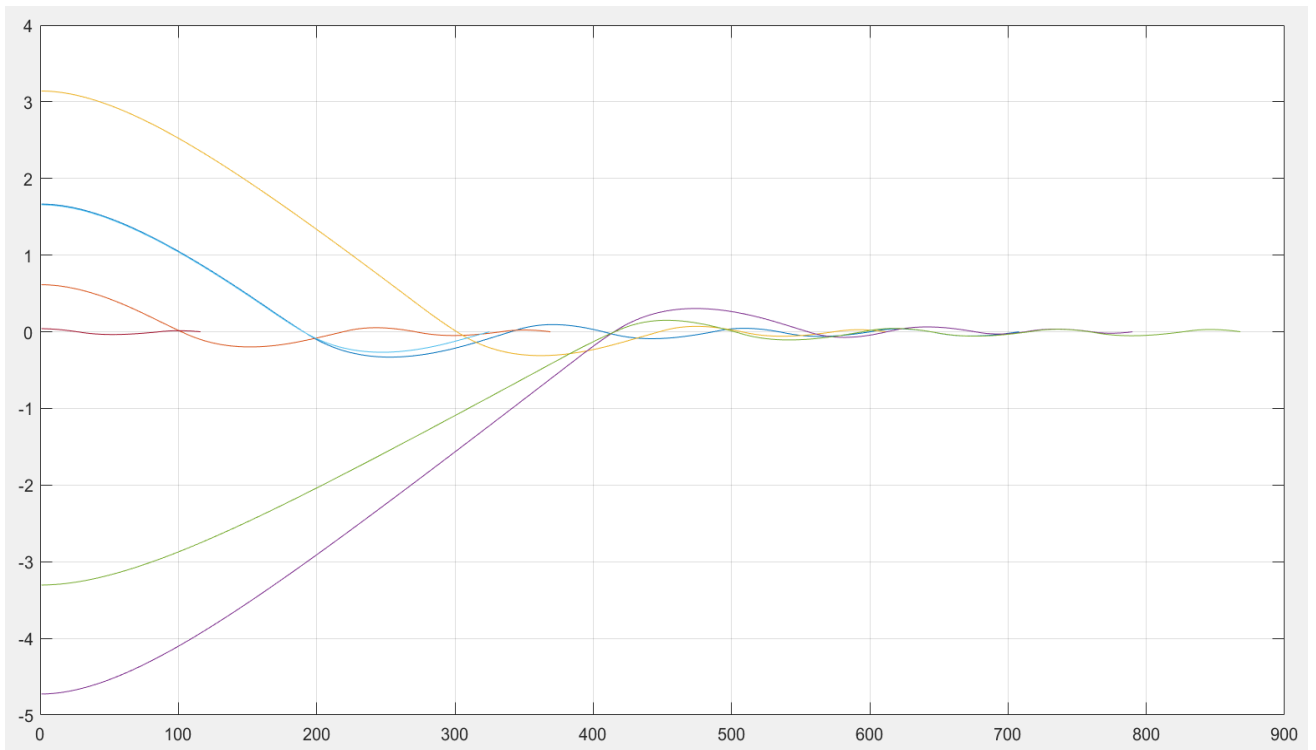


FIGURA 120.-GRÁFICA DE ERRORES EN SIMULACIÓN DE CONTROL

En la Figura 121 podemos observar la simulación del control previamente descrito.

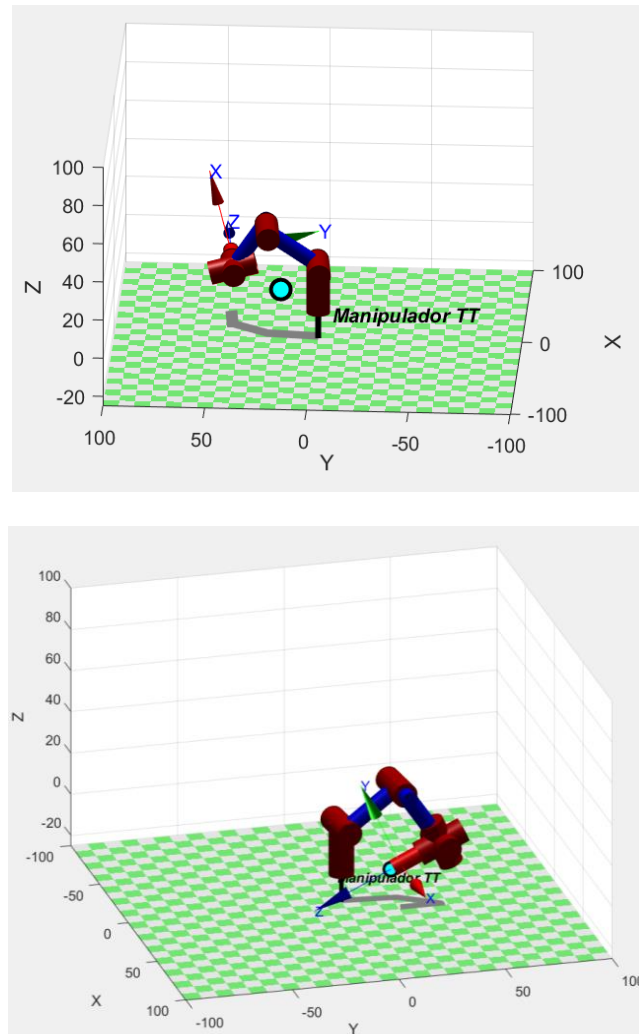


FIGURA 121.-REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL ROBOT ALCANZANDO EL PUNTO DESEADO

1.1.3.2. Validación de control físico

Una vez definido el control que se iba a utilizar y las ecuaciones que este llevaría, se prosiguió a implementarlo en la tarjeta de adquisición de datos, utilizando el sistema de instrumentación previamente mencionado como sistema de retroalimentación, y los motorreductores como los actuadores del sistema. Para este proceso se tuvo que utilizar el código de instrumentación a la par del código de control, además de interrupciones temporales para los cálculos del error y la derivada del error, utilizando un método numérico para calcular la derivada, por lo que todo el proceso de control se llevaría a cabo a base de interrupciones y llamada a otras funciones en el momento. Mostrando el código utilizado para esto en la Figura 122.

```

encoder[5]=11118->CNI;

for(int Index_e=0;Index_e<=5;Index_e++)
{
    error[Index_e]=q_deseada[Index_e]-(((float)encoder[Index_e])-32768)*0.000248;
}

if(error[0]>0.1||error[0]<-0.1)
{
    r=delta*(error[0])-error_p[0];
    qrp=delta*error[0];
    qrpp=delta*error_p[0];

    if(r>0) V=(R*Bm+kb*ki)*qrp+K+Jm*R*qrpp;
    else if(r<0) V=(R*Bm+kb*ki)*qrp-K+Jm*R*qrpp;
    else V=0;

    if(V<-23.5) V=-23.5;
    else if(V>23.5) V=23.5;
}

else V=0;

PWM=abs(round((V*125)/24));

if(V>0)
{i=0;
PWM_CH1[0]=PWM;
PWM_CH2[0]=0;
}
else if (V<0)
{i=1;
PWM_CH2[0]=PWM;
PWM_CH1[0]=0;
}
else
{
    PWM_CH1[0]=0;
    PWM_CH2[0]=0;
}
}

```

FIGURA 122.-CÓDIGO DE CONTROL

Cómo se puede observar, se ingresaron las ecuaciones mencionadas en el desarrollo de control, pero al momento de implementarlas se tuvo que hacer el cambio para poder interactuar correctamente con la tarjeta y sobre todo con el sistema de potencia, ya que estaremos trabajando con un puente H, este no varía su voltaje, sino que, para variar el voltaje promedio de este, se utilizaría un PWM, tomando como referencia el ciclo de trabajo total que es de 24V. Aunado a esto, el voltaje calculado por la ley de control no siempre sería positivo por lo que cuando este resultada negativo, lo único necesario es cambiar de canal la señal del PWM para poder cambiar la dirección de giro del motor, y poniendo la condición de no exceder el límite permitido por la fuente, que es de 24V.

Por último, verificando el funcionamiento correcto del control con el sistema de instrumentación, calculando el error y obteniendo uno menor al 3%, por lo que se considera que el sistema de control funciona de manera adecuada, mostrando los resultados del error en la **Figura**.

```

Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384
Error: 0.098544 0.000000 0.000000 -0.058120 0.060920 0.096384

```

FIGURA 123.- MEDICIÓN DEL ERROR PARA CADA JUNTA

1.1.4. Validación de la Integración

Para la validación de la integración se ejecutó el proceso completo del reconocimiento de barrenos, a continuación, en la Figura 124 se observa la interfaz una vez que se enciende la interfaz.



FIGURA 124.-INICIALIZACIÓN DE INTERFAZ

Después se prosiguió a ejecutar la conexión de la interfaz, esto se corrobora cuando el indicador se colocó en color verde como se muestra en la Figura 125.



FIGURA 125.-CONEXIÓN INTERFAZ-TARJETA NÚCLEO

Después se prosiguió a tomar la foto para la detección de barrenos y calcular la ruta, esto se observa en la Figura 126.

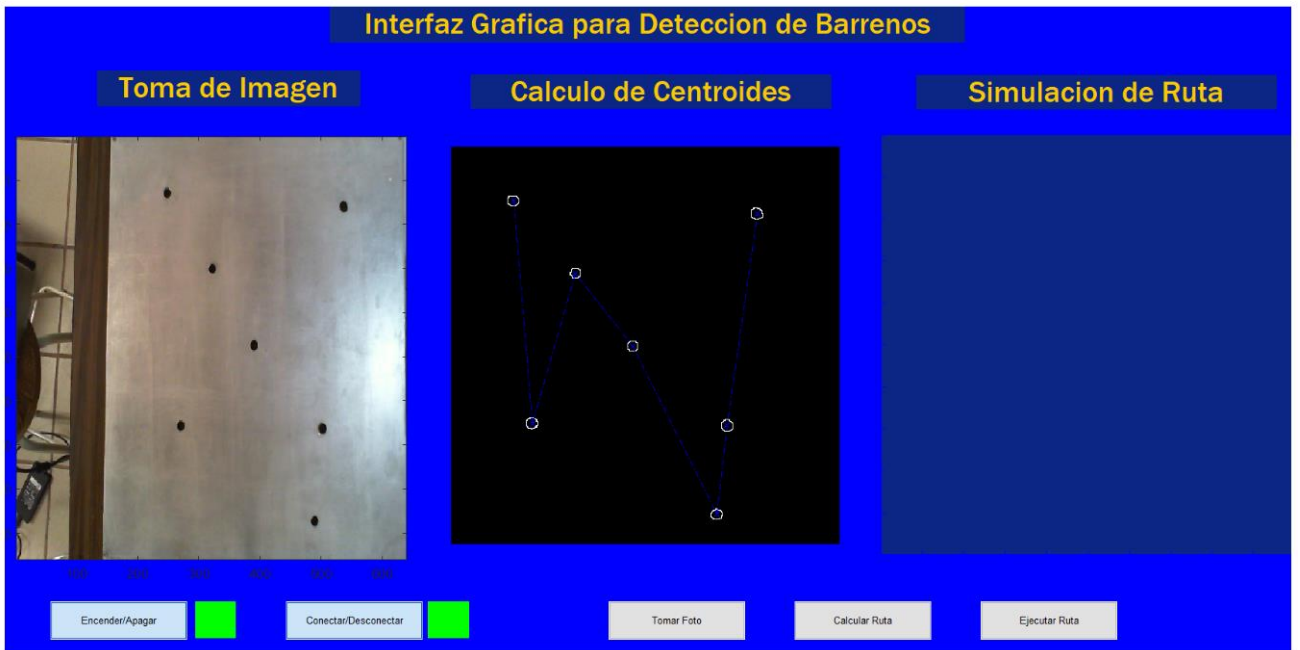


FIGURA 126.-CALCULO DE RUTA

Una vez calculados los centroides para cada barreno se prosiguió a ejecutar la simulación de la trayectoria a realizar por parte del brazo, esto se observa en la Figura 127.

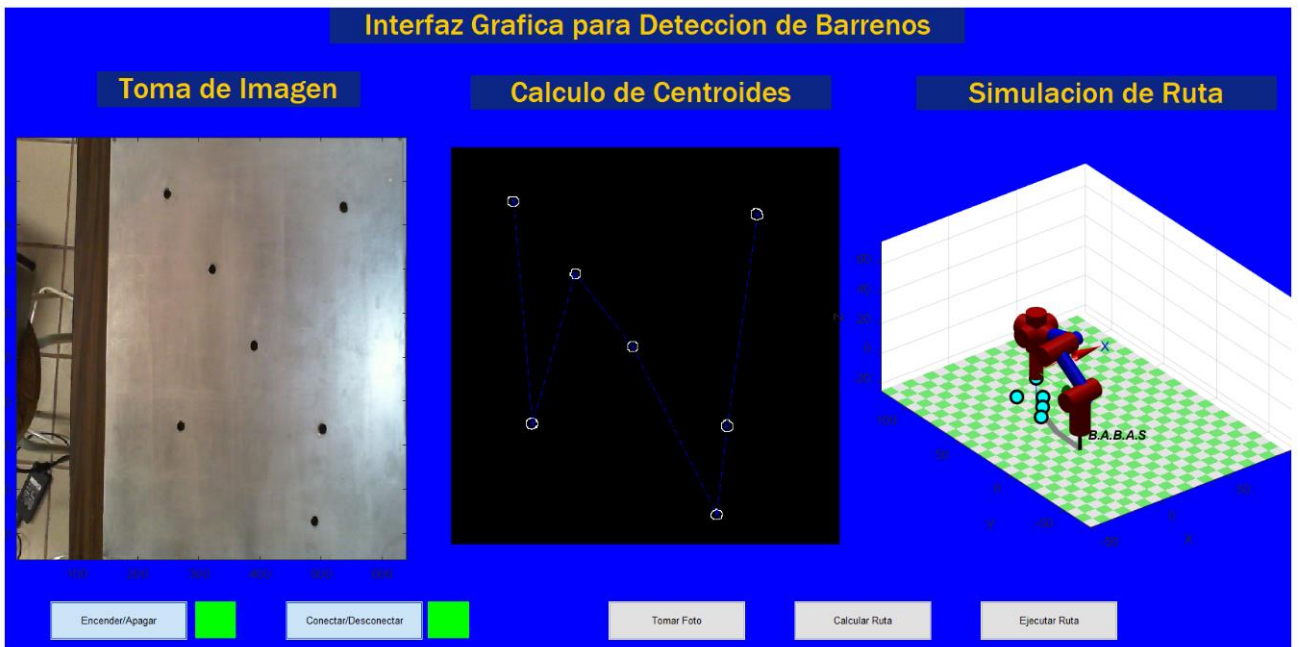


FIGURA 127.-SIMULACIÓN DE RUTA

Después de terminar correctamente la simulación de la ruta a seguir por parte del brazo robótico se muestra la opción de ejecutar la ruta, en la Figura 128 se muestra el mensaje de selección.

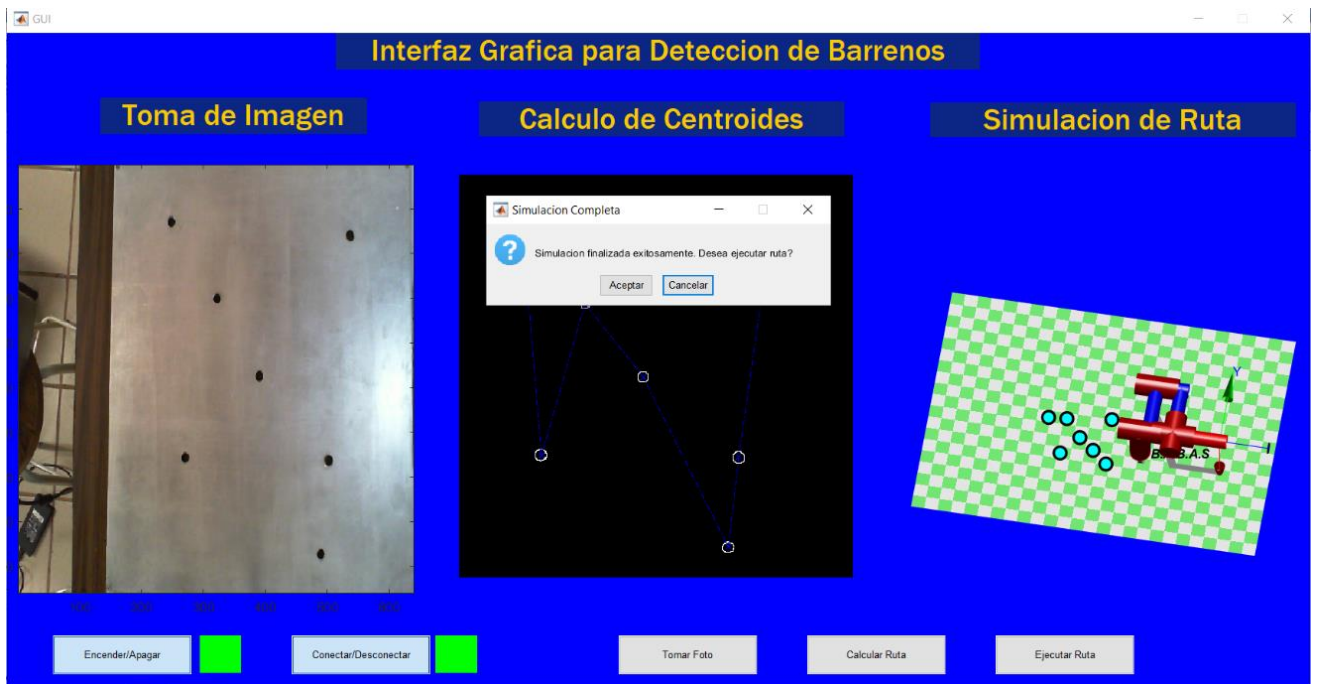


FIGURA 128.-CONFIRMACIÓN PARA EJECUCIÓN DE RUTA

Por último, se prosiguió a la ejecución del control en el brazo robótico a través de la tarjeta núcleo, esto se observa en la Figura 129.

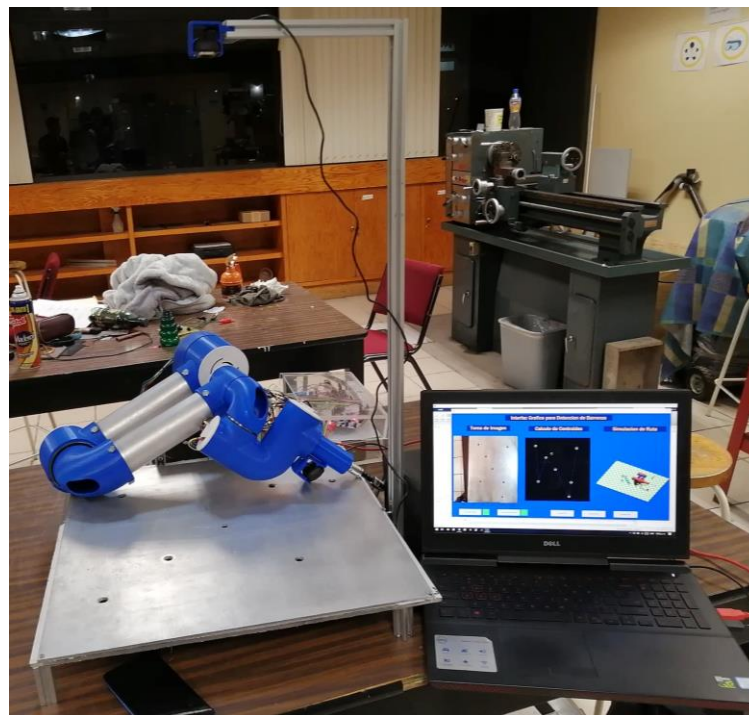


FIGURA 129.- EJECUCIÓN EN TIEMPO REAL DE RUTA

1.2. Análisis de Costos

Para la realización del robot se requirió de los siguientes materiales, considerando que no se tomaron en cuenta costos de las herramientas a utilizar para los diferentes procesos, puesto que se considera que, aunque fueron utilizadas para su fabricación, no forman parte del presupuesto de los materiales del robot. Siendo la tabla de costos final la presentada a continuación:

TABLA 6.-ANÁLISIS DE COSTOS

Material	Características	Costo Unitario	Cantidad	Total
Laptop	InterCore I7, 8GB de memoria RAM, tarjeta de gráficos NVIDIA GFORCE GTX-1050	\$20,000	1	\$20,000
Cámara T3H-00011	WebCam USB, Full HD, true color	\$250	2	\$500
Motorreductor GW4058-555	Torque nominal de 70[kg cm], sistema de bloqueo de gusano, encoder de cuadratura	\$1,100	2	\$2,200
Motorreductor JGY-371	Torque nominal de 35[kg cm], encoder de cuadratura	\$370	4	\$1,480
Sistema de potencia	Puente H capaces de proporcionar 10[A] y cuya velocidad de conmutación sea de 100[Hz]	\$600	3	\$1,800
Sistema de control e instrumentación	Tarjeta de lógica de desarrollo STM32F446RE	\$360	1	\$360
Sistema de multiplexado	Tarjeta lógica capaz de multiplexar la señal de entrada de varios motores	\$160	1	\$160
Tubos de aluminio	Perfiles tubulares de aluminio de 2 pulgadas de diámetro	\$288 por metro	1 metro	\$288
Servicio de impresión en PLA	Impresión de plástico ABS con una precisión mínima de 10 micras	Variante dependiendo de la pieza a imprimir	17 piezas de impresión	\$7,000
Fuente de voltaje	Fuente de alimentación de 24[V] capaz de proporcionar mínimo 10[A]	\$800	1	\$800
Efactor final	Motor WIK25GAD012 de 0.7[kg*cm]	\$150	1	\$150
Escenario de prueba	Placa de aluminio de 50cmx50cm calibre 10	\$500	1	\$500

Mesa de montaje	Barra de aluminio estructural de 20mmx20mm con placas de acrílico de calibre 6	\$1,000	1	\$1,000
Elementos de sujeción	Tornillería (M3, M4, ½ pulg, ¼ pulg)	\$200	1	\$200
Acopladores	Acopladores para motorreductor de 6mm y 8mm	\$80	6	\$480
Rodamientos (primeros 3 ejes de libertad)	Rodamiento SKF-61814	\$100	3	\$300
Rodamiento (últimos 3 ejes de libertad)	Rodamiento SKF-51108	\$50	3	\$150
Total				\$37,080

2. Conclusiones

Después de realizar la validación de los sistemas que constituyen el brazo robótico se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El diseño modular para sistemas mecánicos permite identificar de forma rápida y precisa los componentes que presenten alguna falla, lo que permite hacer correcciones rápidas al robot. Cabe destacar que para que diseño modular sea funcional se necesita considerar el material y la geometría de todas las piezas que se utilizaran, de otra manera puede existir inconsistencias al momento de realizar el ensamblaje.
- La impresión en 3D permitió dar un diseño personalizado a cada eslabón, lo que facilitó la manufactura del mismo y permitió realizar una optimización respecto a la cantidad de material a utilizar generando una reducción de costos, además de que a pesar de que el PLA no tiene la dureza ni la resistencia de un metal como el aluminio el brazo robótico no presentó ninguna fractura debido al factor de seguridad propuesto.
- El área de trabajo del brazo robótico quedó limitada únicamente por las restricciones físicas del medio donde está implementado de tal manera que se logró llegar a cualquier punto dentro de la misma considerando que para lograrlo siempre se despreciaron las rutas que impliquen una restricción física para el robot.
- El sistema de visión permitió el cálculo del centroide real de cada barreno, cabe destacar que para su obtención fue necesario realizar las transformaciones de orientación entre el eje de la cámara y el del brazo robótico, además de proponer un factor de corrección para corregir el efecto barril que provoca el redondeo del lente de la cámara.
- Para el sistema de visión es necesario tener un medio de trabajo donde la iluminación y la distancia entre la cámara y la placa permanezcan constantes, esto debido a que el procesamiento que se realizó toma en consideración una toma muestra donde las alteraciones las considera como prospectos de barreno. Esto permitió la eliminación de los defectos físicos del aluminio, así como el reflejo generado por la placa, favoreciendo la detección de barrenos ya que al realizar las comparaciones entre la imagen muestra y la imagen tomada por el sistema las únicas perturbaciones eran los barrenos.
- Para la detección del ángulo de inclinación se determinó que es necesario mantener una distancia constante entre la cámara y el barreno, tomando en cuenta de que el error del cálculo del ángulo de inclinación será directamente proporcional a la distancia entre la cámara y el barreno. Además de que el lente de la cámara deberá coincidir con el centroide del barreno, de lo contrario la toma del barreno presenta una deformación por el paralelismo.
- Si la constitución del barreno presenta deformaciones o irregularidades esto afecta considerablemente el cálculo del ángulo de inclinación a diferencia del cálculo de la localización del centroide el cual no se ve afectado por estas, concluyendo que el cálculo del ángulo de inclinación requiere de condiciones de trabajo limitadas a diferencia de la localización de centroides la cual tiene menos afectación por su medio de trabajo.

- La utilización de un sistema de bloqueo en los motores nos permitió tener un error despreciable para todas las articulaciones, además de que permitió que el robot permaneciera estático sin necesidad de mantener el sistema alimentado.
- Si bien el sistema de bloqueo favoreció el control de las articulaciones al momento de realizar movimientos ascendentes, se requiere que el material de los engranes de la caja de reducción sea capaz de resistir movimientos descendentes de lo contrario el sistema desciende más rápido de lo que la caja le permite y esto ocasiona la fractura de la caja de reducción. Cabe destacar que esto solo es comprobable de forma experimental, ya que, aunque los motores sean seleccionados correctamente en cuanto al torque de operación esto no asegura que los elementos de la caja reductora resistan.
- El sistema de potencia utilizado permite el manejo de corrientes de trabajo de hasta 5 [A], lo que nos permitió proporcionarle a cada motor la corriente necesaria al momento del arranque, sin embargo, debido a la corriente que manejan no es recomendable habilitar las dos salidas al mismo tiempo porque esto ocasiona daño en los MOSFET.
- El modelo de control dinámico permitió la realización de una simulación fiable para comprobar que el sistema puede ser controlado por un control por modos deslizantes, además de observar el grado de oscilaciones que sufriría cada articulación del sistema y poder adaptar eso a un control más amortiguado y capaz de estabilizar fácilmente al sistema.
- El control por modos deslizantes nos permitió obtener un error del 3% para el valor deseado en cada articulación evitando la presencia de oscilaciones alrededor una vez alcanzada la posición deseada.
- La interfaz utilizada permite el monitoreo del sistema y facilita la implementación del proceso de visión artificial al grado de que el usuario solo necesita capturar una foto para su ejecución, sin embargo, debido a que se requiere una lectura continua tanto de la cámara como de la comunicación realizada con la tarjeta núcleo se tiene un alto costo computacional al momento de su ejecución.

Tomando en cuenta todo lo anterior se concluyó que el sistema de visión artificial permitió la interacción del brazo robótico con su ambiente de trabajo, favoreciendo su funcionamiento y evitando el cálculo de la cinemática inversa para la obtención de los puntos y de la programación de la ruta, logrando así la automatización del proceso.

3. Referencias

- [1] P. Mickle, «1961: A peep into the automated future,» [En línea]. Available: <http://www.capitalcentury.com/1961.html>. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [2] Robotic Industries Asociation, «A Tribute to Joseph Engelberger,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [3] C. Sanchez, «Shakey, el primer robot inteligente de la historia y el abuelo del coche autónomo,» El Diario, [En línea]. Available: https://www.eldiario.es/hojaderouter/tecnologia/shakey-robot-inteligencia_artificial-coche_autonomo_0_632037257.html. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [4] B. R.C, «PUMA: Programmable Universal Machine for Assembly,» Springer Link, [En línea]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4613-3027-1_8. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [5] DICIS, «Operacion Manual del Brazo Robot,» [En línea]. Available: <http://www.dicis.ugto.mx/profesores/balvantin/documentos/Manufactura%20Avanzada/5%20PRACTICAS%20ROBOT%20NACHI.pdf>. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [6] T. Granollers, «Teach Pendant para Robot Industrial,» Industrias & Empresas, [En línea]. Available: <http://www.industriasyempresas.com.ar/node/2105>. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [7] M. A. M. Armendariz, «Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional,» [En línea]. Available: <https://www.ctrl.cinvestav.mx/~yuw/pdf/DoTesMAM.pdf>. [Último acceso: 21 Septiembre 2018].
- [8] I. O. f. Standardization, «ISO 8373:2012,» International Organization for Standardization, 2012. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>. [Último acceso: 20 Septiembre 2018].
- [9] J. M. Garcia, Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas, 2017.
- [1 R. Klette, «Concise Computer Vision,» de *Concise Computer Vision*, Londres, Springer, 2014, p. 7. 0]
- [1 Leopoldo, «Wiki de Robótica,» 25 Agosto 2015. [En línea]. Available: 1] <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/cinematica/>. [Último acceso: 20 Septiembre 2018].

- [1 R. M. Jon Legarreta, «Dinámica de Robots y Control,» [En línea]. Available:
2] https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/15328/mod_resource/content/6/T6%20DINAMICA%20OCW_Revision.pdf. [Último acceso: 20 Septiembre 2018].
- [1 L. F. P. C. B. R. A. Antonio Barrientos, «Fundamentos de Robótica,» de *Fundamentos de Robótica*,
3] McGraw-Hill, 1997, pp. 50-53.
- [1 P. R. F. Chaumette Espiau, «A New Approach to Visual Servoing in Robotics,» de *A New Approach*
4] *to Visual Servoing in Robotics*, 1992, p. 313.
- [1 A. P. O' Reilly Attolini, «Diseño de un Contol Servo-Visual para Seguimiento de Trayectorias de un
5] Robot Caminante,» Trabajo de fin de grado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Zacatenco, 2017.
- [1 P. A. C. Parada, C. A. P. Cortés y C. I. R. Jaimes, «Módulo Robótico para la Clasificación de Lulos
6] (Solanum Quitoense) Implementando Visión Artificial,» *INGE CUC*, vol. 10, n° 1, p. 51–62, 2014.
- [1 J. Ortiz Castillo, *Sistema de Visión Artificial Humanoide para Reconocimiento de Formas y Patrones*
7] *de Objetos, Aplicando Redes Neuronales y Algoritmos de Aprendizaje Automático*, Trabajo de final de
grado: Universidad Ricardo Palma, 2015.

4. Apéndices

4.1. Diagrama GANTT

En esta sección se presentan la herramienta que fue utilizada para administrar la ejecución de las distintas actividades del proyecto. Se presentan el diagrama de Gantt.

ID	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin
1		Trabajo Terminal 2	80 días?	lun 29/07/19	vie 15/11/19
2		Fase 1	31 días?	lun 29/07/19	lun 09/09/19
3		Contactar proveedores	5 días	lun 29/07/19	vie 02/08/19
4		Compra de materiales	10 días	lun 05/08/19	vie 16/08/19
5		Sistema de visión	11 días	lun 19/08/19	lun 02/09/19
6		Desarrollo de interfaz	2 días	lun 19/08/19	mar 20/08/19
7		Perforación de placa de pruebas	3 días	mié 21/08/19	vie 23/08/19
8		Prueba e implementación de algoritmo para identificación de barrenos	6 días	lun 26/08/19	lun 02/09/19
9		Sistema de control	10 días	lun 19/08/19	vie 30/08/19
10		Programación de algoritmo de generación de trayectoria	6 días	lun 19/08/19	lun 26/08/19
11		Implementación con cinemática inversa	4 días	mar 27/08/19	vie 30/08/19
12		Desarrollo de pruebas	4 días	mar 27/08/19	vie 30/08/19
13		Desarrollo y entrega de reporte preliminar	2 días	mar 03/09/19	mié 04/09/19
14		Corrección de observaciones	2 días	jue 05/09/19	vie 06/09/19

<p>Resumen inactivo</p> <p>Resumen del proyecto</p> <p>Tarea inactiva</p> <p>Hito inactivo</p>	<p>Resumen inactivo</p> <p>Tarea manual</p> <p>Informe de resumen manual</p> <p>Resumen manual</p> <p>solo el comienzo</p> <p>solo fin</p>	<p>Tareas externas</p> <p>Hito externo</p> <p>Fecha límite</p> <p>Tareas críticas</p> <p>División crítica</p> <p>Progreso manual</p>
--	--	--

Proyecto: Cronograma TT2 v2.mn
Fecha: lun 12/08/19

Página 1

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Gantt Chart														
						20	27	03	10	17	24	03	10	17	24	31	07	1		
15		Entrega de reporte mensual 1	1 día	lun 09/09/19	lun 09/09/19															
16		Fase 2	20 días?	mar 10/09/19	lun 07/10/19															
17		Sistema Mecanico	12 días	mar 10/09/19	mié 25/09/19															
18		Envío de piezas a imprimir	2 días	mar 10/09/19	mié 11/09/19															
19		Tiempo estimado de impresiones	7 días	jue 12/09/19	vie 20/09/19															
20		Realización de pruebas de impresión 3D	1 día	lun 23/09/19	lun 23/09/19															
21		Analisis Y ensamble	2 días	mar 24/09/19	mié 25/09/19															
22		Sistema de electronica	15 días	mar 10/09/19	lun 30/09/19															
23		Prueba de funcionamiento de controladores	3 días	mar 10/09/19	jue 12/09/19															
24		Prueba de circuitos de potencia	3 días	mar 10/09/19	jue 12/09/19															
25		Rediseño de circuitos impresos	3 días	vie 13/09/19	mar 17/09/19															
26		Envío de diseño a fabricante	2 días	mié 18/09/19	jue 19/09/19															
27		Espera de llegada de circuitos impresos	4 días	vie 20/09/19	mié 25/09/19															
28		Montaje de circuitos en placas	3 días	jue 26/09/19	lun 30/09/19															

<p>Resumen inactivo</p> <p>Tarea manual</p> <p>solo duracion</p> <p>Informe de resumen manual</p> <p>Resumen manual</p> <p>solo el comienzo</p> <p>solo fin</p>	<p>Tareas externas</p> <p>Hito externo</p> <p>Fecha limite</p> <p>Tareas criticas</p> <p>Division critica</p> <p>Progreso</p> <p>Progreso manual</p>
---	--

Proyecto: Cronograma_TT2_v2.m
Fecha: lun 12/08/19

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Gantt Chart											
						20	27	03	10	17	24	03	10	17	24	31	07
29		Sistema de vision II	5 días	mié 25/09/19	mar 01/10/19												
30		Montaje de camara en robot	1 día	mié 25/09/19	mié 25/09/19												
31		Pruebas y calibración	1 día	jue 26/09/19	jue 26/09/19												
32		Toma de fotografías de placa	1 día	vie 27/09/19	vie 27/09/19												
33		Implementación de algoritmo	1 día	lun 30/09/19	lun 30/09/19												
34		Desarrollo de pruebas	1 día	mar 01/10/19	mar 01/10/19												
35		Desarrollo y entrega de reporte preliminar	2 días	mié 02/10/19	jue 03/10/19												
36		Corrección de observaciones	1 día	vie 04/10/19	vie 04/10/19												
37		Entrega de reporte mensual 2	1 día	lun 07/10/19	lun 07/10/19												
38		Fase 3	19 días	mar 08/10/19	vie 01/11/19												
39		Integración de sistemas	14 días	mar 08/10/19	vie 25/10/19												
40		Diseño de interfaz gráfica	3 días	mar 08/10/19	jue 10/10/19												
41		Establecer comunicación entre todos los sistemas	3 días	vie 11/10/19	mar 15/10/19												
42		Montaje de todos los sistemas	4 días	mié 16/10/19	lun 21/10/19												
43		Desarrollo de pruebas	2 días	mar 22/10/19	mié 23/10/19												

Proyecto: Cronograma_TT2_V2.mn
Fecha: lun 12/08/19

Tarea

Division

Hito

Resumen

Resumen del proyecto

Tarea inactiva

Hito inactivo

Resumen inactivo

Tarea manual

solo duracion

Informe de resumen manual

Resumen manual

solo el comienzo

solo fin

Tareas externas

Hito externo










Tareas criticas

Fecha limite

Division critica

Progreso

Progreso manual

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo		Fin	
				Inicio	Fin	Inicio	Fin
44	 tarea	Corrección de errores	2 días	jue 24/10/19	vie 25/10/19	20	27
45		Desarrollo y entrega de reporte preliminar	2 días	lun 28/10/19	mar 29/10/19	03	10
46		Corrección de observaciones	2 días	mié 30/10/19	jue 31/10/19	17	24
47		Entrega reporte mensual 3	1 día	vie 01/11/19	vie 01/11/19	03	10
48		Fase 4	10 días	lun 04/11/19	vie 15/11/19	17	24
49		Corrección de reporte final	1 día	lun 04/11/19	lun 04/11/19	31	07
50		Entrega de acuse y reporte final	1 día	mar 05/11/19	mar 05/11/19	07	14
51		Preparación de defensa oral	4 días	mié 06/11/19	lun 11/11/19	14	21
52		Defensa oral	4 días	mar 12/11/19	vie 15/11/19	21	28

<p>Proyecto: Cronograma_TT2_v2.m</p> <p>Fecha: lun 12/08/19</p>	<p>Tarea</p> <p>Division</p> <p>Hito</p> <p>Resumen</p> <p>Resumen del proyecto</p> <p>Tarea inactiva</p> <p>Hito inactivo</p>	<p>Resumen inactivo</p> <p>Tarea manual</p> <p>solo duración</p> <p>Informe de resumen manual</p> <p>Resumen manual</p> <p>solo el comienzo</p> <p>solo fin</p>	<p>Tareas externas</p> <p>Hito externo</p> <p>Fecha límite</p> <p>Tareas críticas</p> <p>Division crítica</p> <p>Progreso</p> <p>Progreso manual</p>
---	--	---	--

4.2. Selección de materiales

Dentro de las opciones presentadas para el material que constituirá el sistema se han propuesto las siguientes: ABS, PLA y aluminio. El ABS es un material que mantiene propiedades físicas aceptables para la operación del brazo, ya que se han considerado como factores dominantes las propiedades mecánicas y la densidad, siendo que el ABS tiene una densidad de $1.01e3 - 1.21e3 \text{ Kg/m}^3$ con un módulo de Young y tenacidad a la fractura altos, aunque si bien no tanto como los presentes en el aluminio, este material presenta un menor peso gracias a su baja densidad, y más aún, a la capacidad de relleno de las piezas en impresión 3D. Otros factores importantes a considerar para su empleo son la facilidad de diseño y creación de piezas. A continuación, se muestran las propiedades físicas de cada material, usos comunes y gráficas comparando las propiedades mecánicas a considerar para su empleo en el proyecto.

ABS

ABS (Acrilonitrilo-butadieno-estireno) es resistente, elástico y fácil de moldear. Suele ser opaco, aunque algunos grados ahora pueden ser transparentes y se le pueden dar colores vivos. Las aleaciones de ABS-PVC son más resistentes que el ABS estándar y, en grados auto extingüibles, se utilizan para las cubiertas de las herramientas eléctricas.

Propiedades generales

Densidad $1.01e3 - 1.21e3 \text{ kg/m}^3$

Precio * $37.4 - 41.2 \text{ MXN/kg}$

Propiedades mecánicas

Módulo de Young $1.1 - 2.9 \text{ GPa}$

Resistencia al rendimiento (límite elástico) $18.5 - 51 \text{ MPa}$

Resistencia a la tracción $27.6 - 55.2 \text{ MPa}$

Resistencia a la compresión $31 - 86.2 \text{ MPa}$

Elongación $1.5 - 100\% \text{ de tensión}$

Dureza - Vickers $5.6 - 15.3 \text{ HV}$

Tenacidad a la fractura $1,19 - 4,29 \text{ MPa.m}^{0,5}$

ABS tiene la mayor resistencia al impacto de todos los polímeros.

Usos típicos

Cascos de seguridad; camper tops; paneles de instrumentos de automoción y otros componentes interiores.

PLA

Poly lactide, PLA, es un termoplástico biodegradable derivado del ácido láctico natural del maíz, el maíz o la leche. Se asemeja al poliestireno transparente, proporciona una buena estética (brillo y claridad), pero es rígido y quebradizo y necesita modificaciones con plastificantes para la mayoría de las aplicaciones prácticas.

Propiedades generales

Densidad 1.21e3 - 1.25e3 kg/m³

Precio * 29 - 34.9 MXN/kg

Propiedades mecánicas

Módulo de Young 3.45 - 3.83 GPa

Resistencia al rendimiento (límite elástico) 48 - 60 MPa

Resistencia a la tracción 48 - 60 MPa

Resistencia a la compresión 48 - 60 MPa

Elongación 5 - 7% de tensión

Dureza - Vickers 14 - 18 HV

Tenacidad a la fractura 0.7 - 1,1 MPa.m^{0,5}

Aluminio

Propiedades generales

Densidad 2.5e3 - 2.9e3 kg/m³

Precio * 31 - 34 MXN/kg

Propiedades mecánicas

Módulo de Young 72 - 89 GPa

Resistencia al rendimiento (límite elástico) 50 - 330 MPa

Resistencia a la tracción 65 - 386 MPa

Resistencia a la compresión 50 - 330 MPa

Elongación 0.5 - 10% de tensión

Dureza - Vickers 60 - 150 HV

Tenacidad a la fractura 18 - 35 MPa.m^{0,5}

Usos típicos

Ingeniería Aeroespacial; ingeniería automotriz - pistones, carcasas de embrague, colectores de escape; fundición de chasis y cubiertas para productos domésticos y electrónicos.

Graficas comparando los posibles materiales

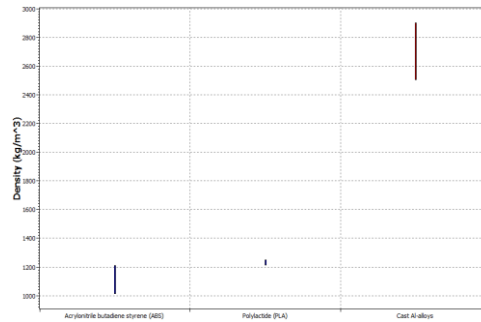


FIGURA 130.- COMPARACIÓN DE MATERIALES POR DENSIDAD [GRÁFICA OBTENIDA A PARTIR DE SOFTWARE CES EDUPACK 2013]

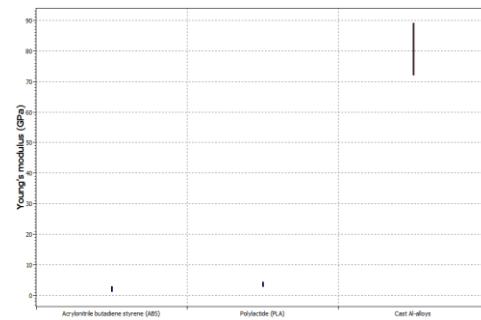


FIGURA 131.- COMPARACIÓN DE MATERIALES POR MÓDULO DE YOUNG [GRÁFICA OBTENIDA A PARTIR DE SOFTWARE CES EDUPACK 2013]

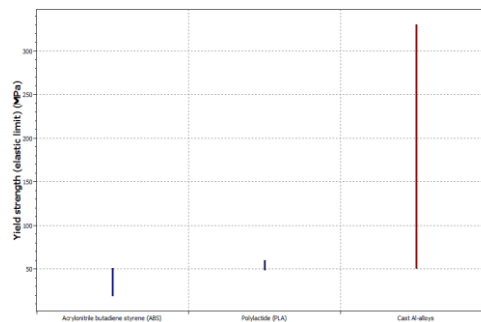
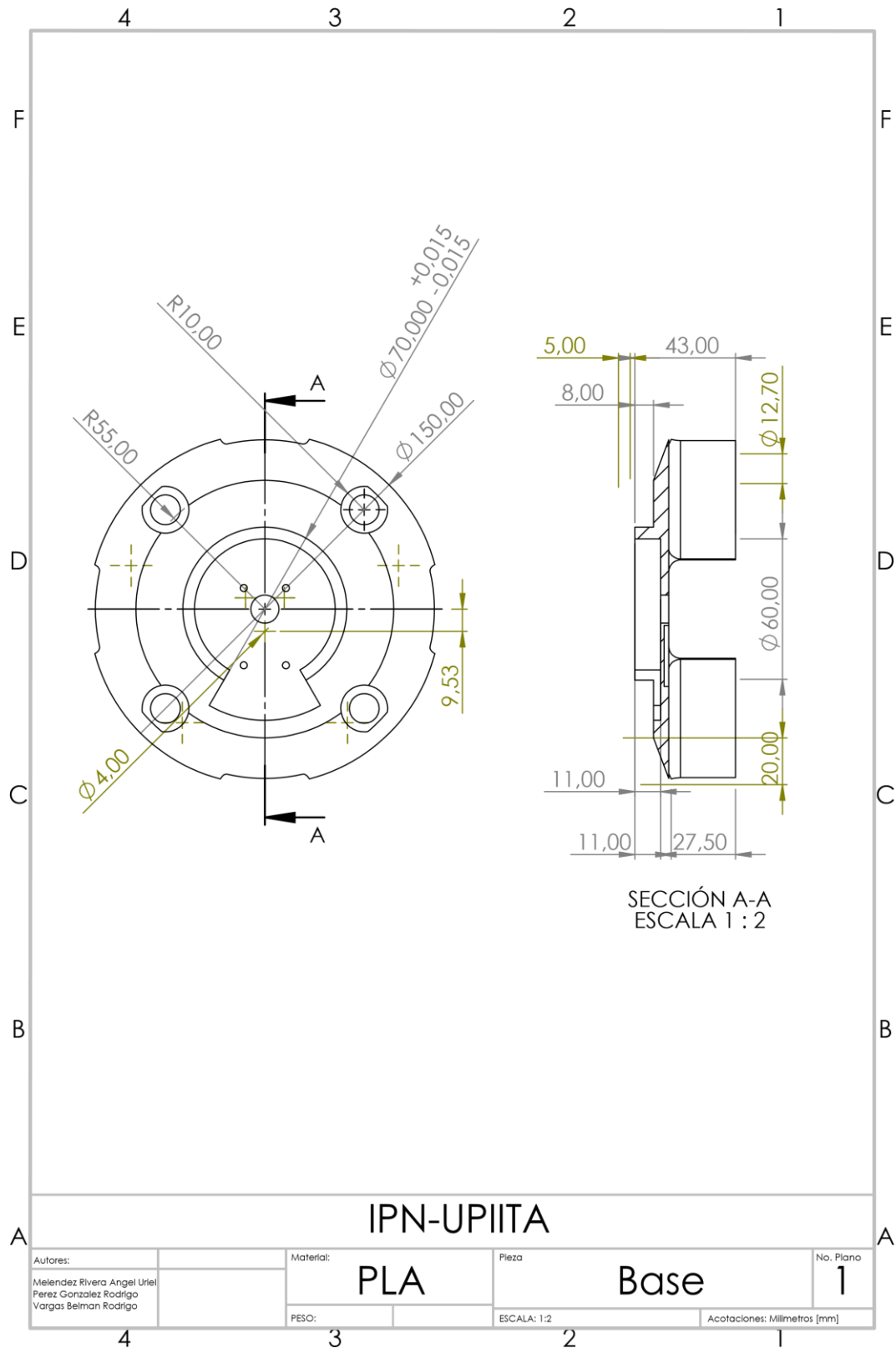
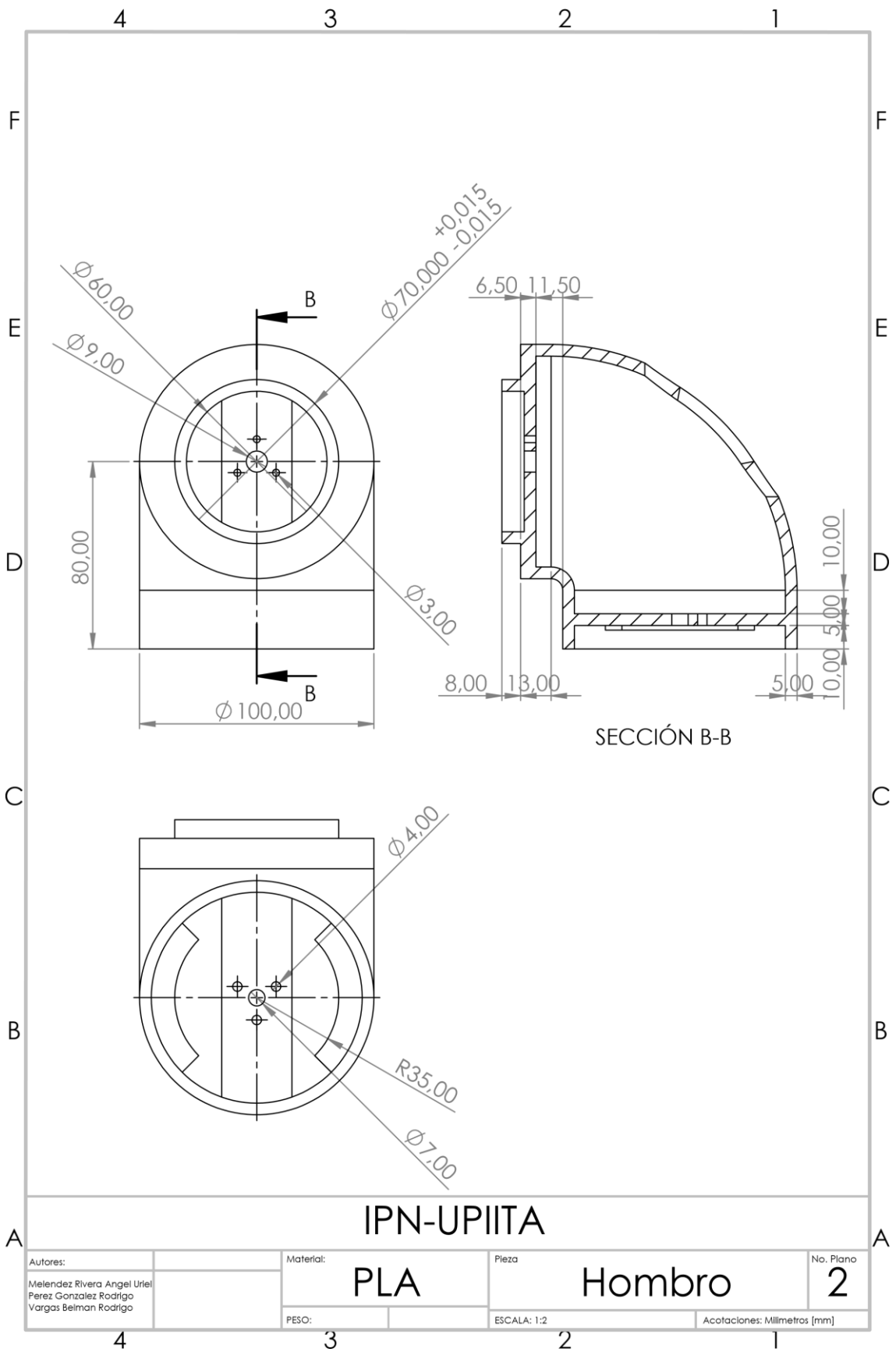
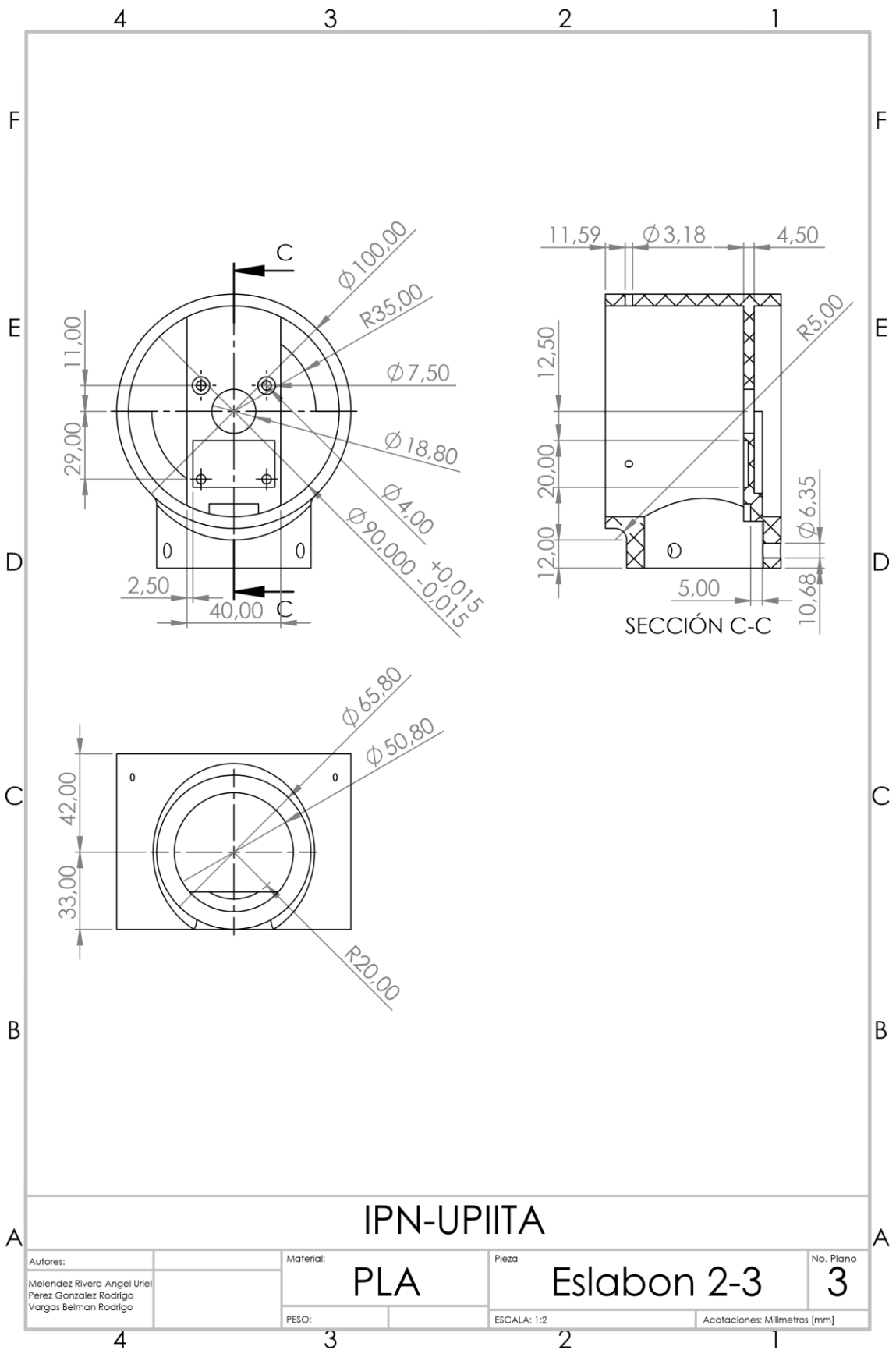


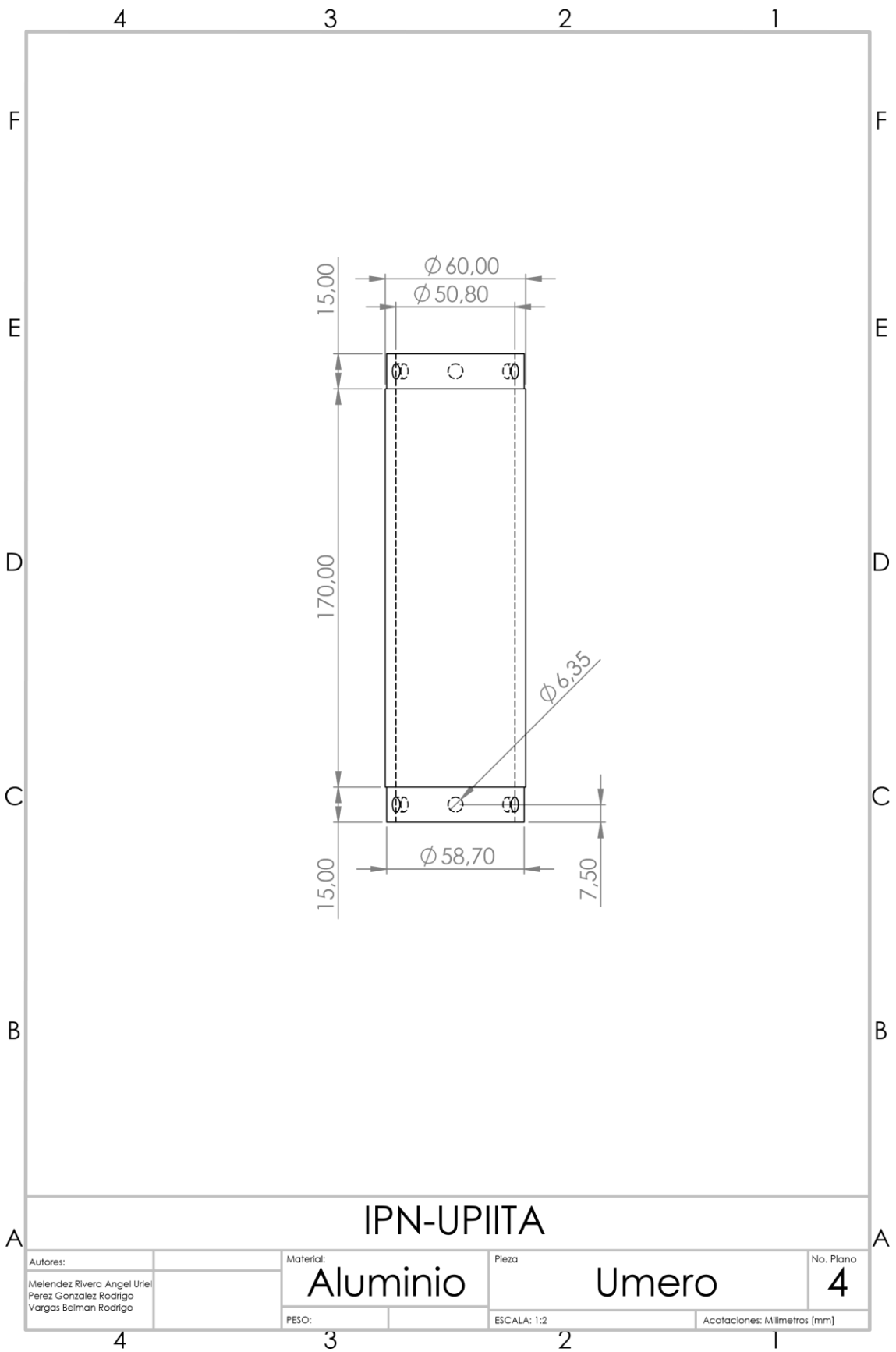
FIGURA 132.- COMPARACIÓN DE MATERIALES POR LIMITE ELÁSTICO [GRÁFICA OBTENIDA A PARTIR DE SOFTWARE CES EDUPACK 2013]

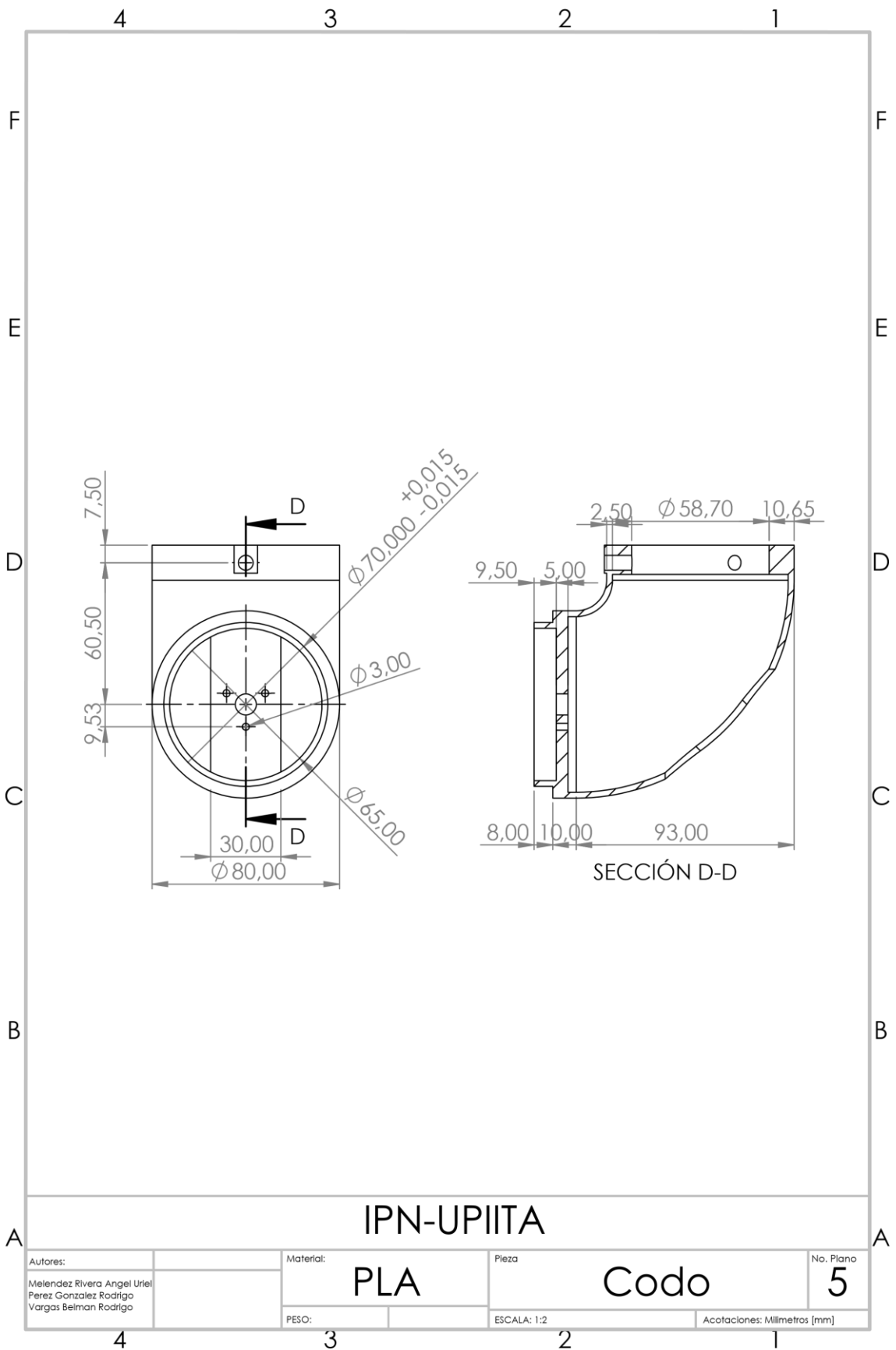
4.3. Planos

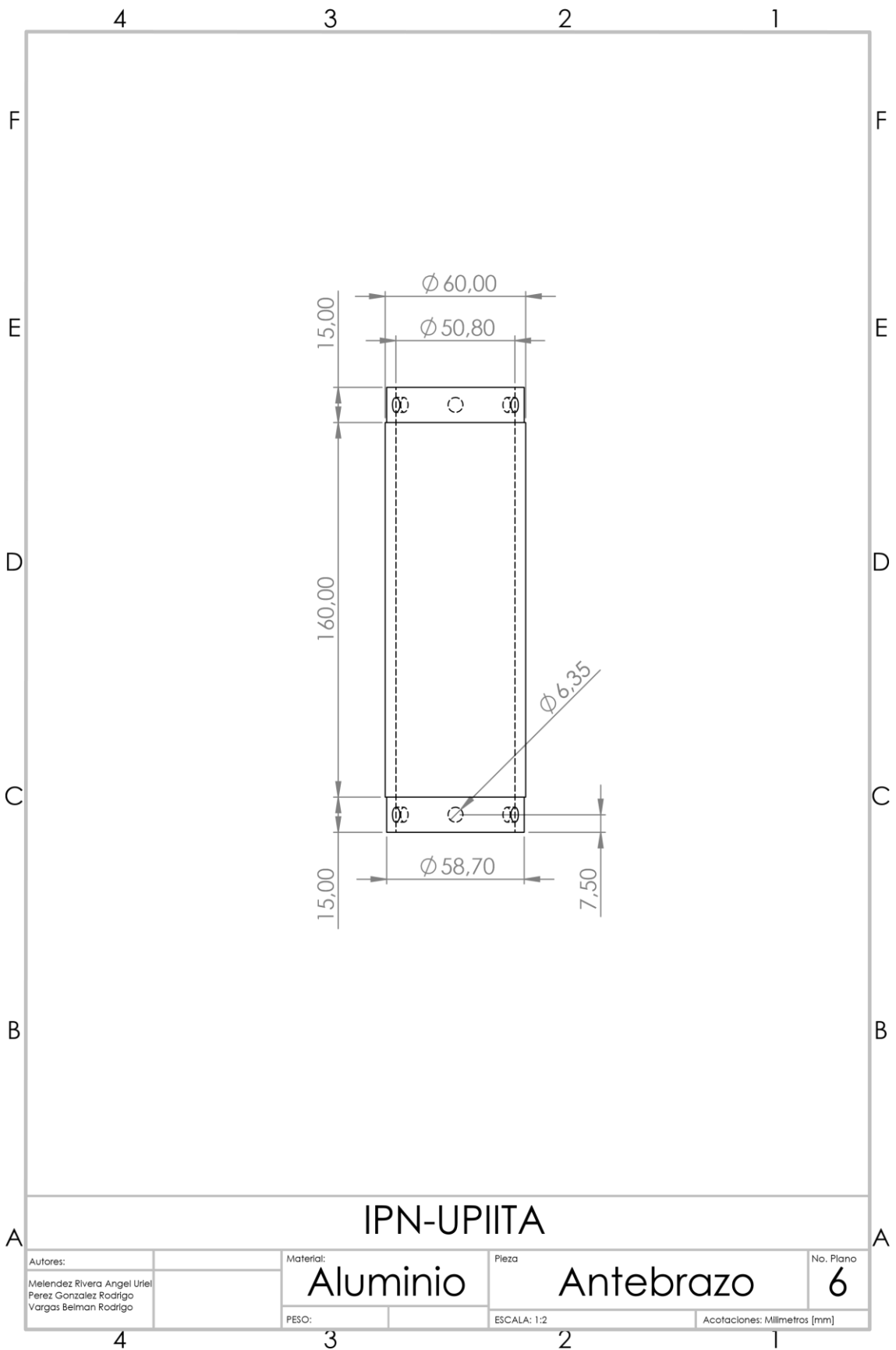


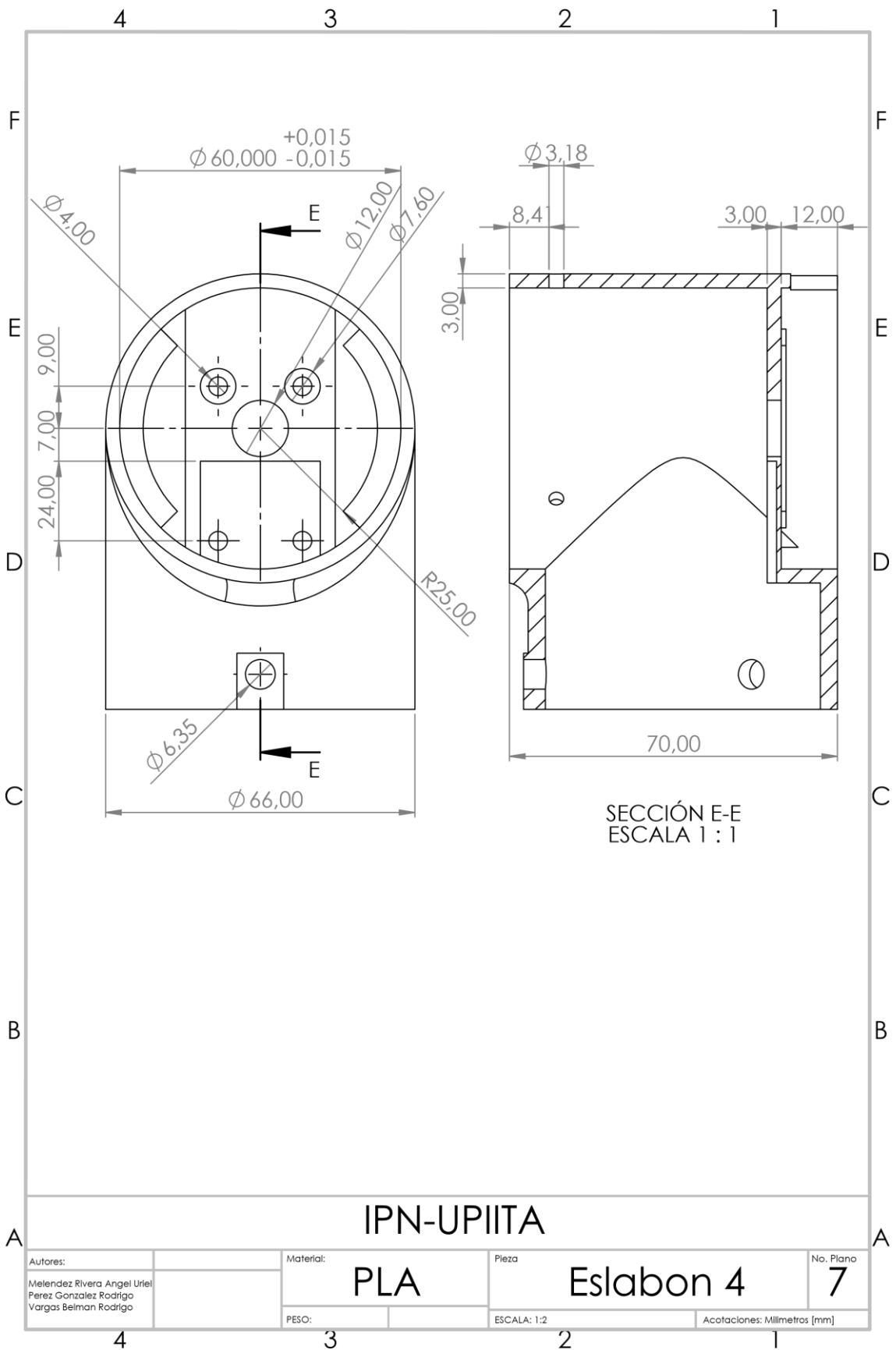


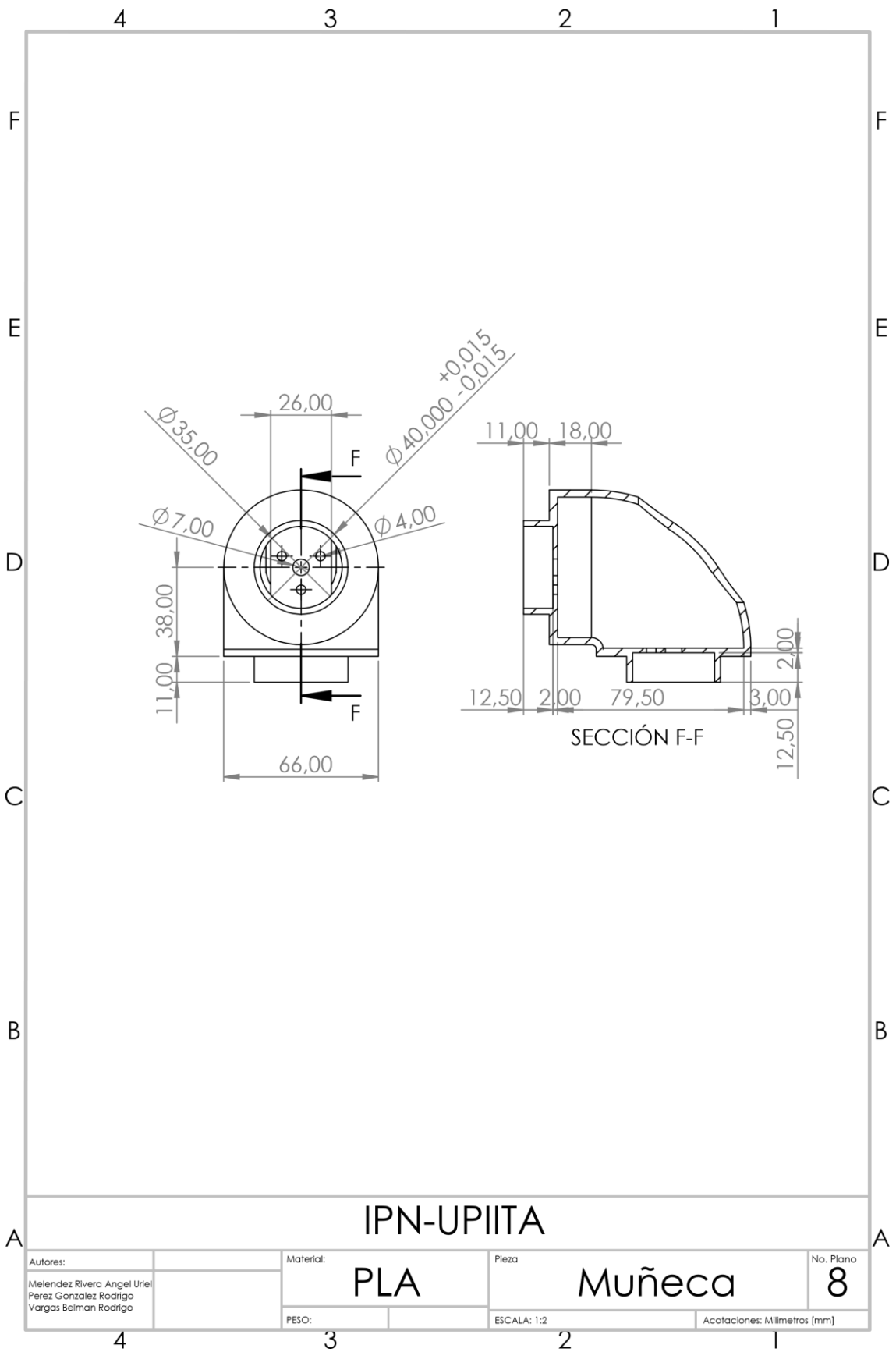


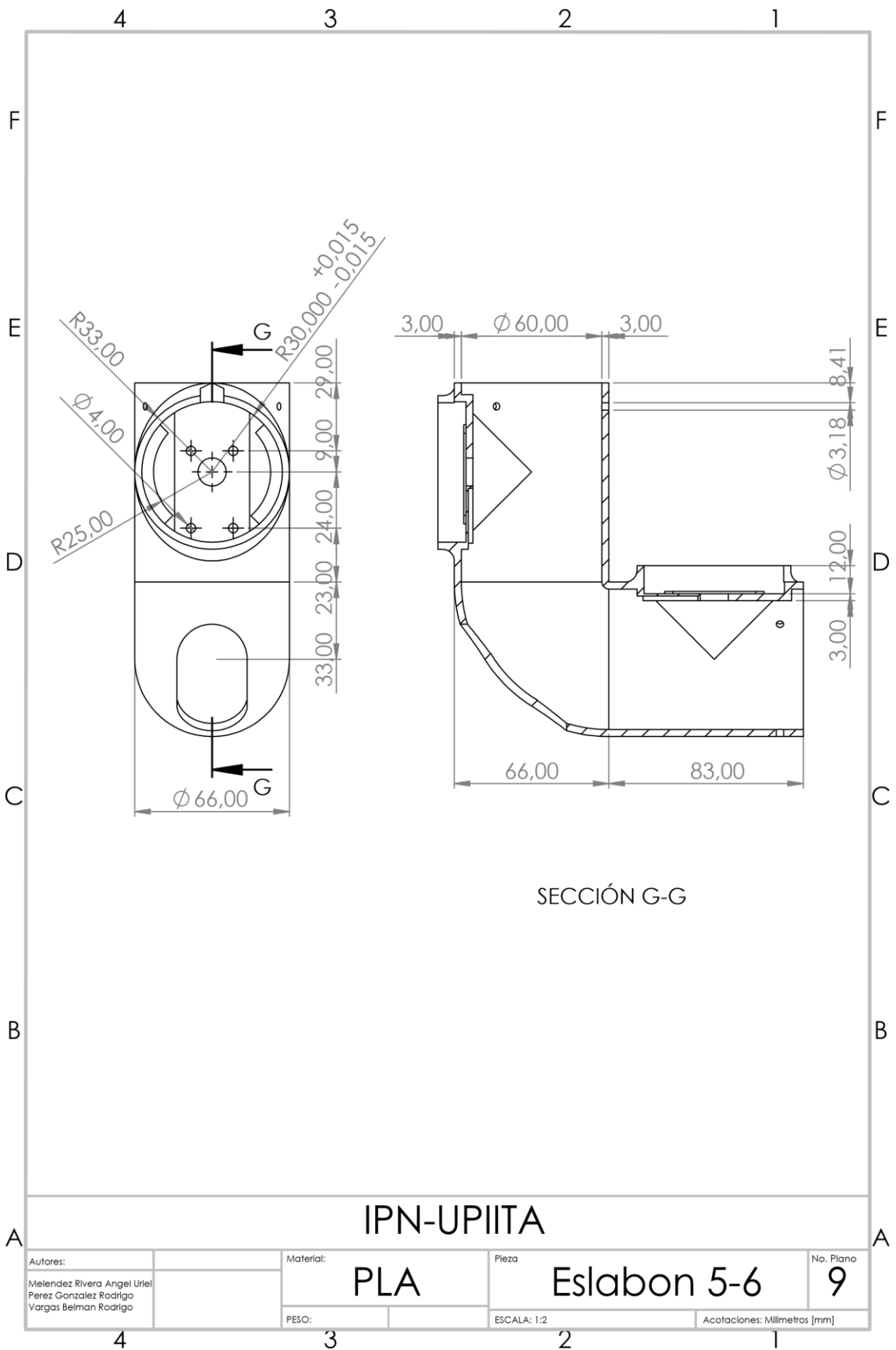


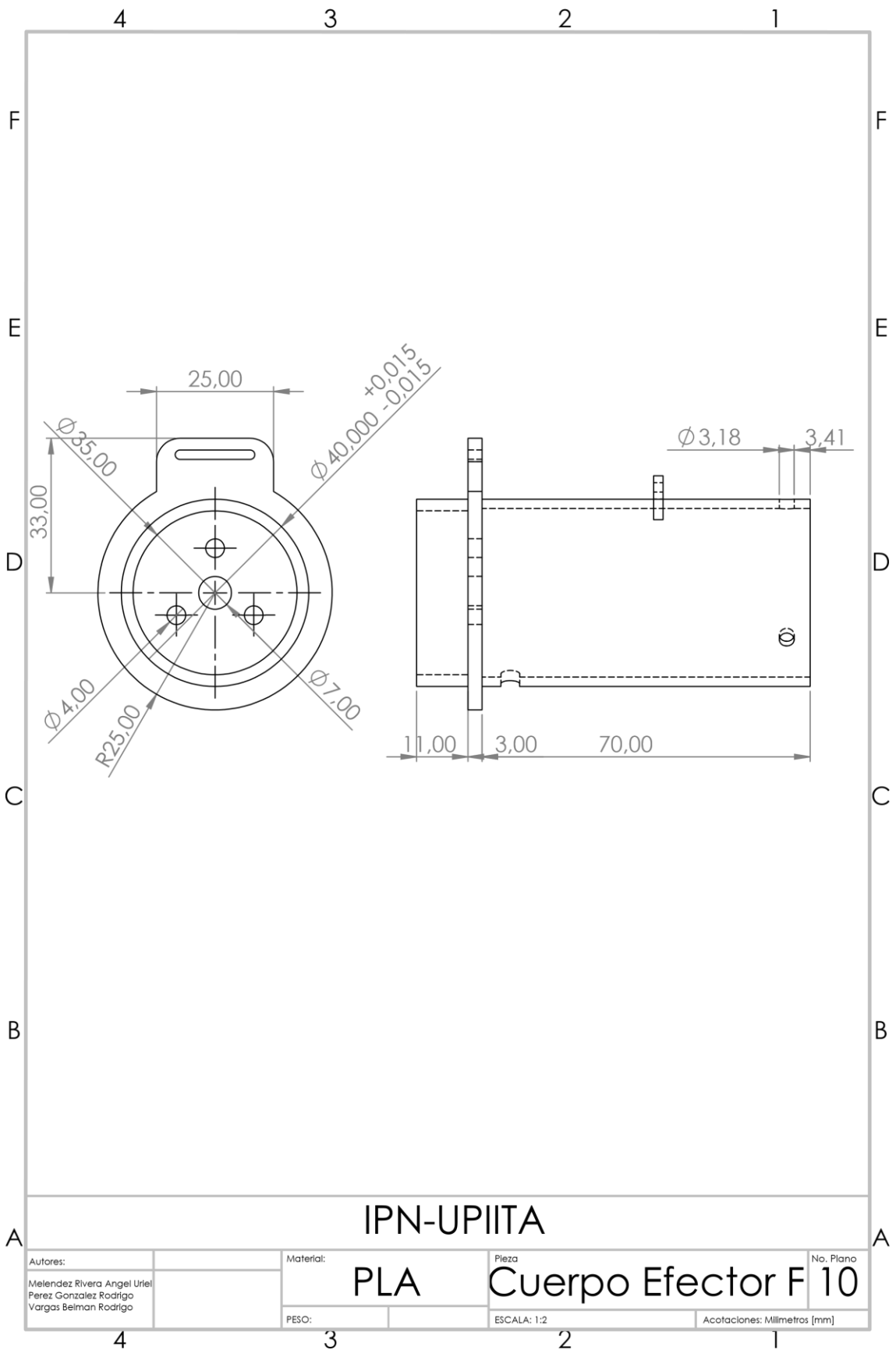






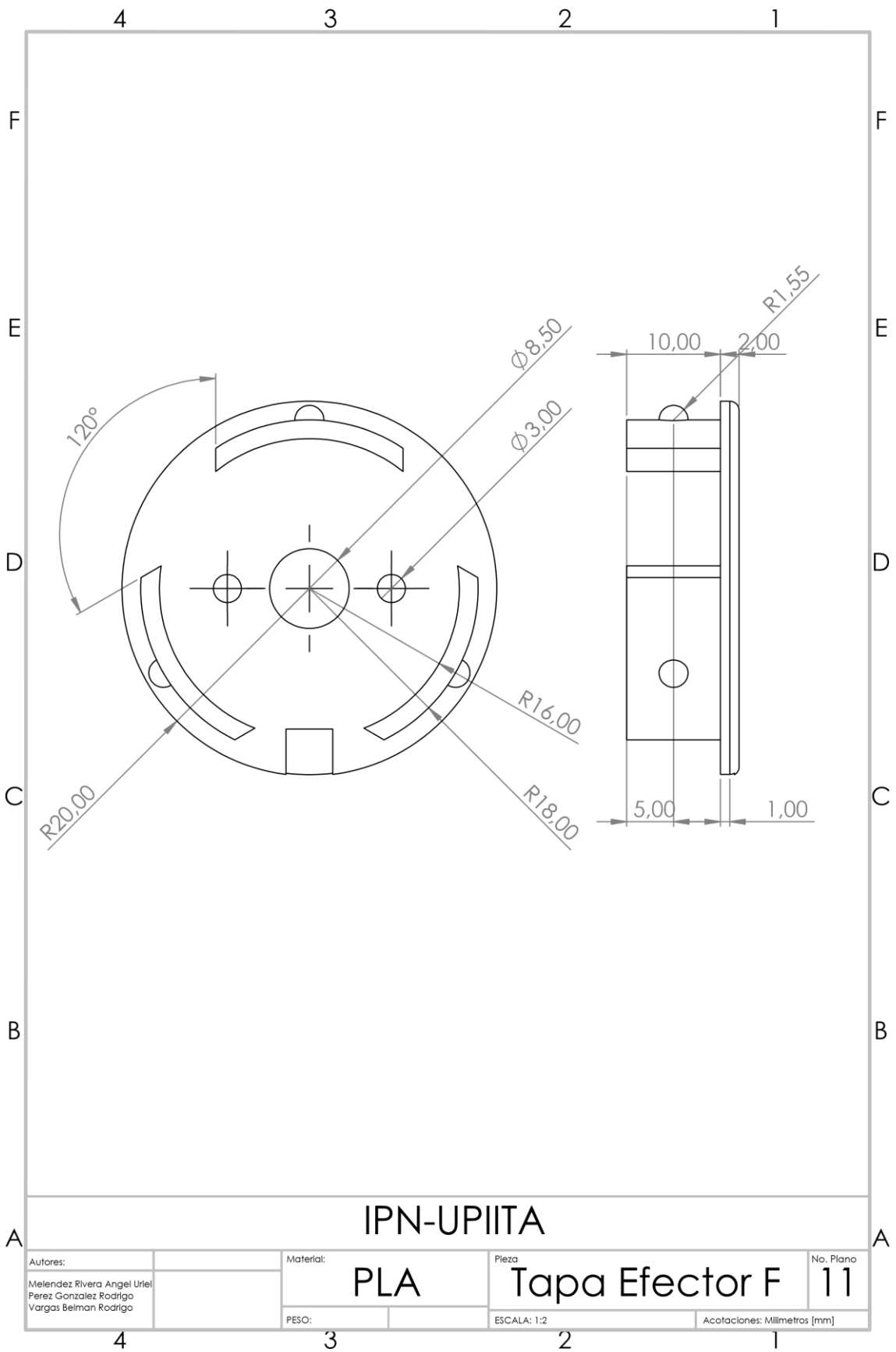


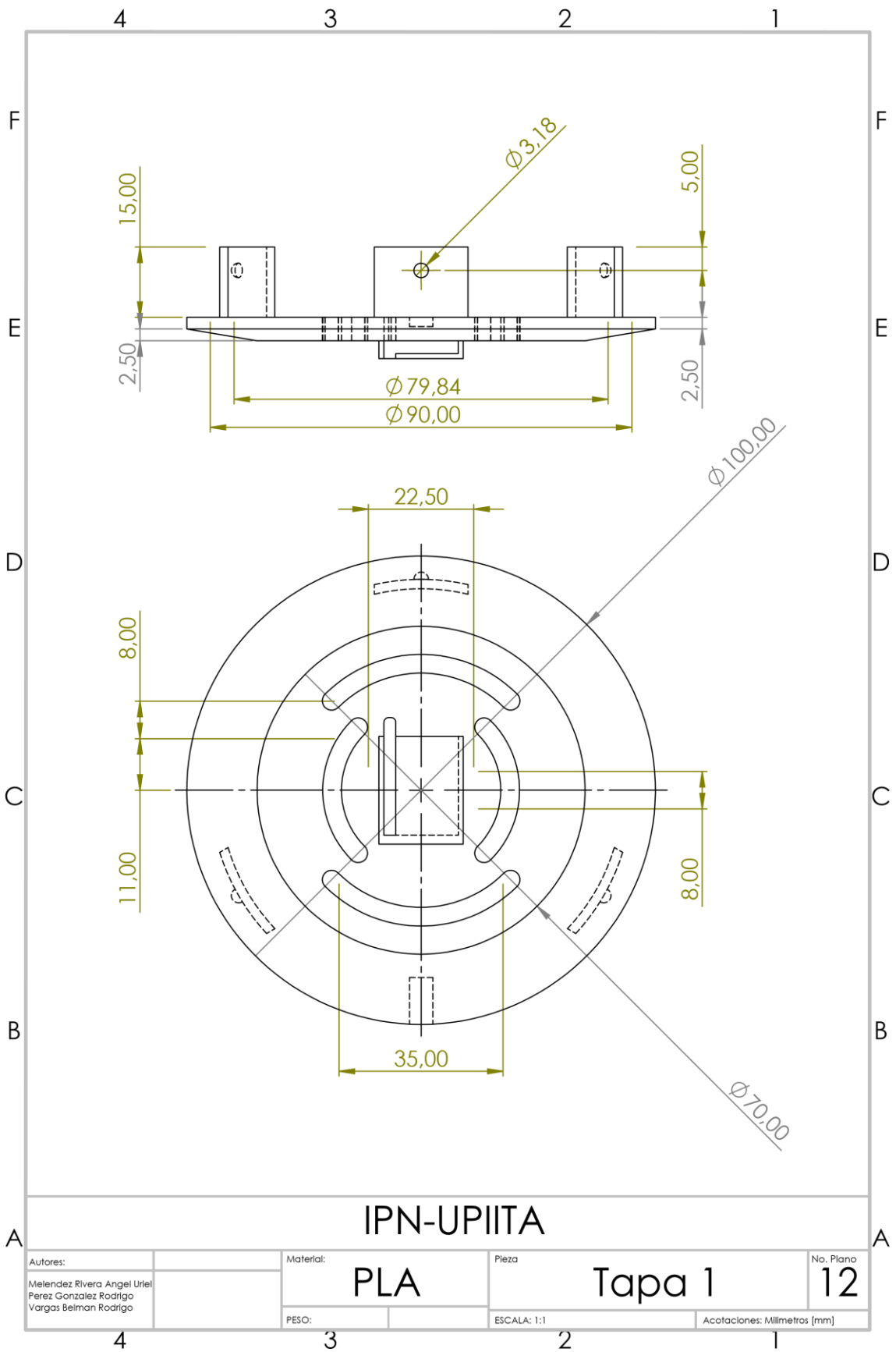


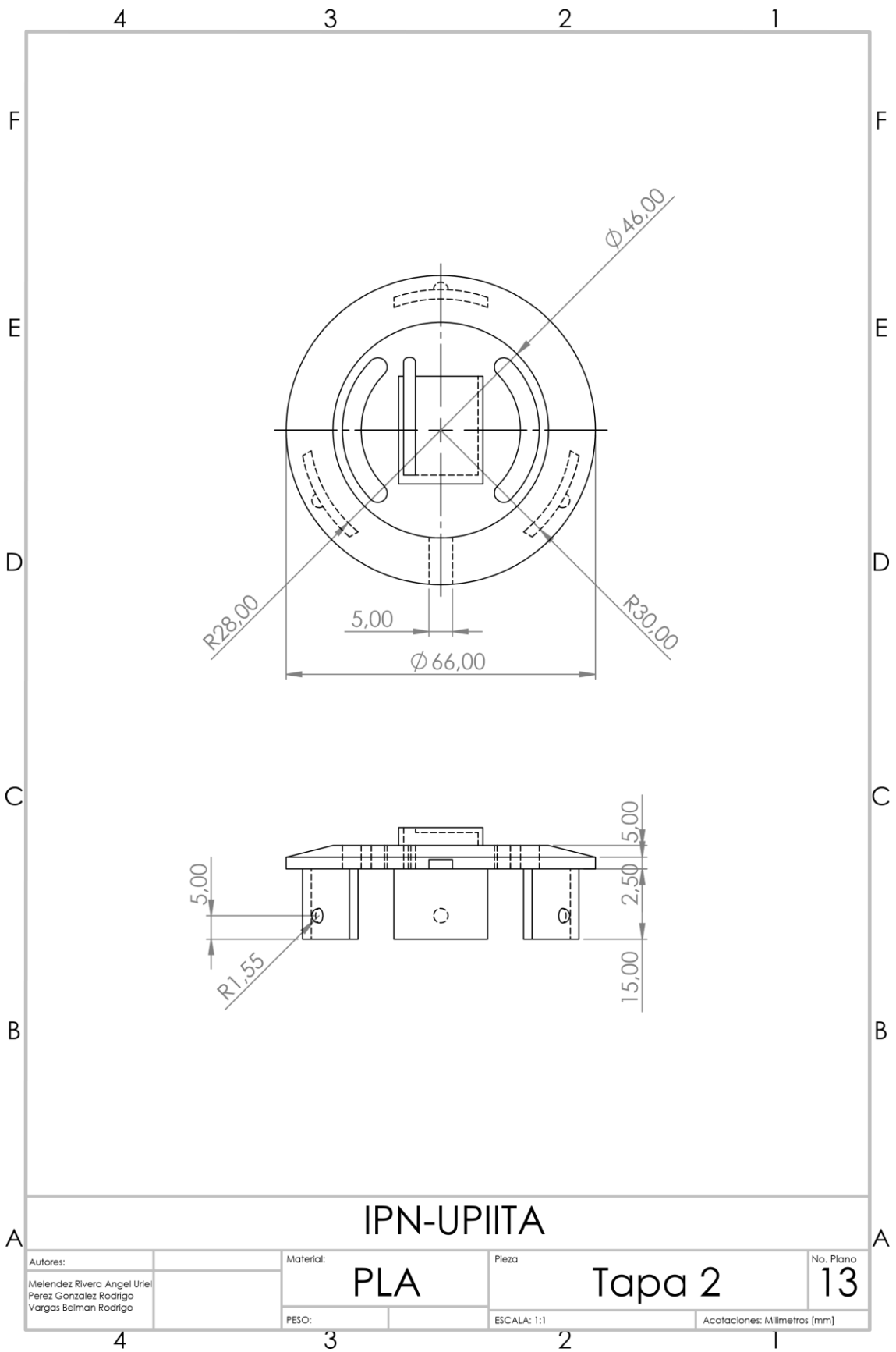


IPN-UPIITA

Autores: Melendez Rivera Angel Uriel Perez Gonzalez Rodrigo Vargas Belman Rodrigo		Material: PLA	Pieza Cuerpo Efectador F 10	No. Plano
PESO:		ESCALA: 1:2	Anotaciones: Milímetros [mm]	

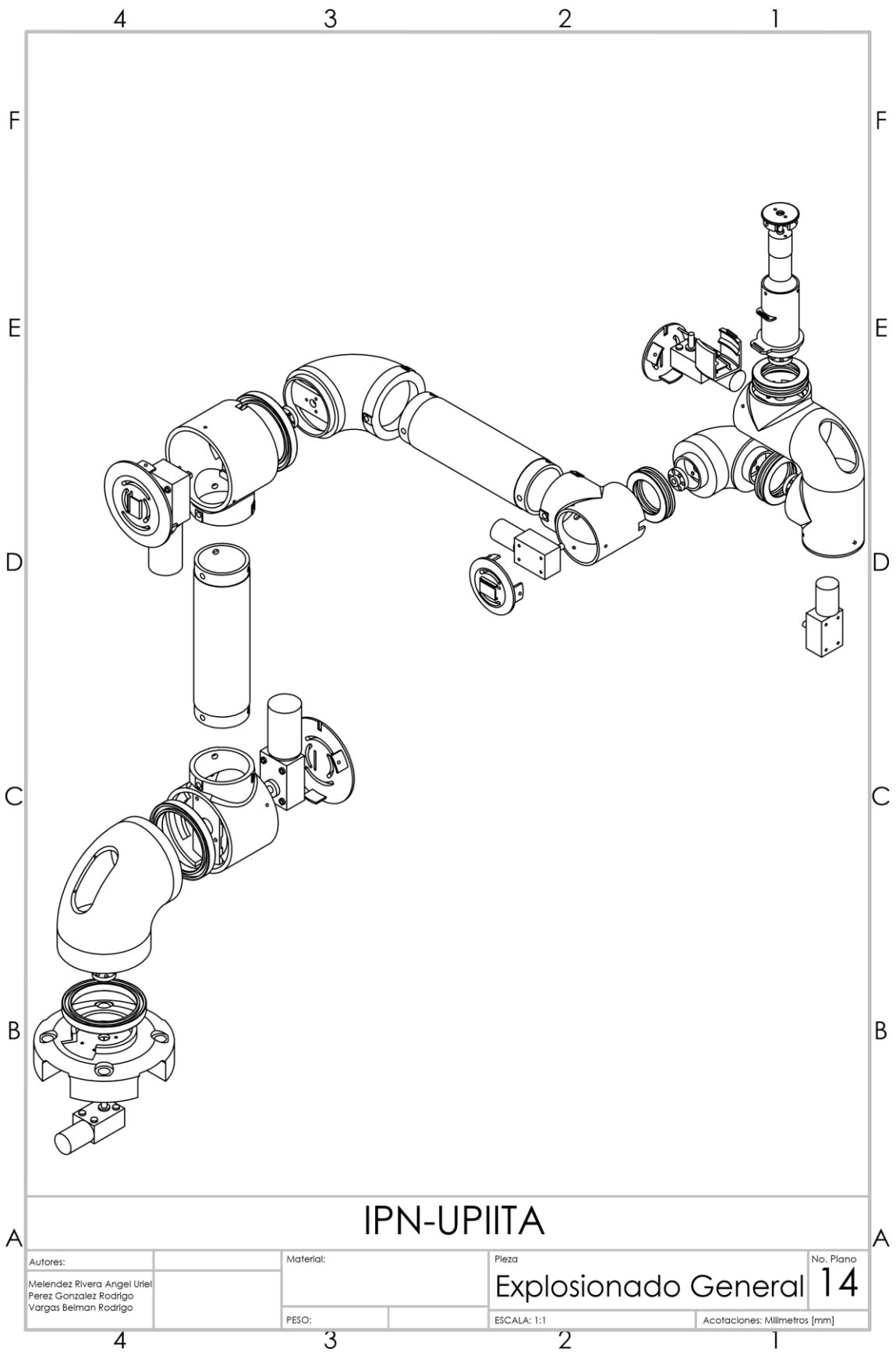


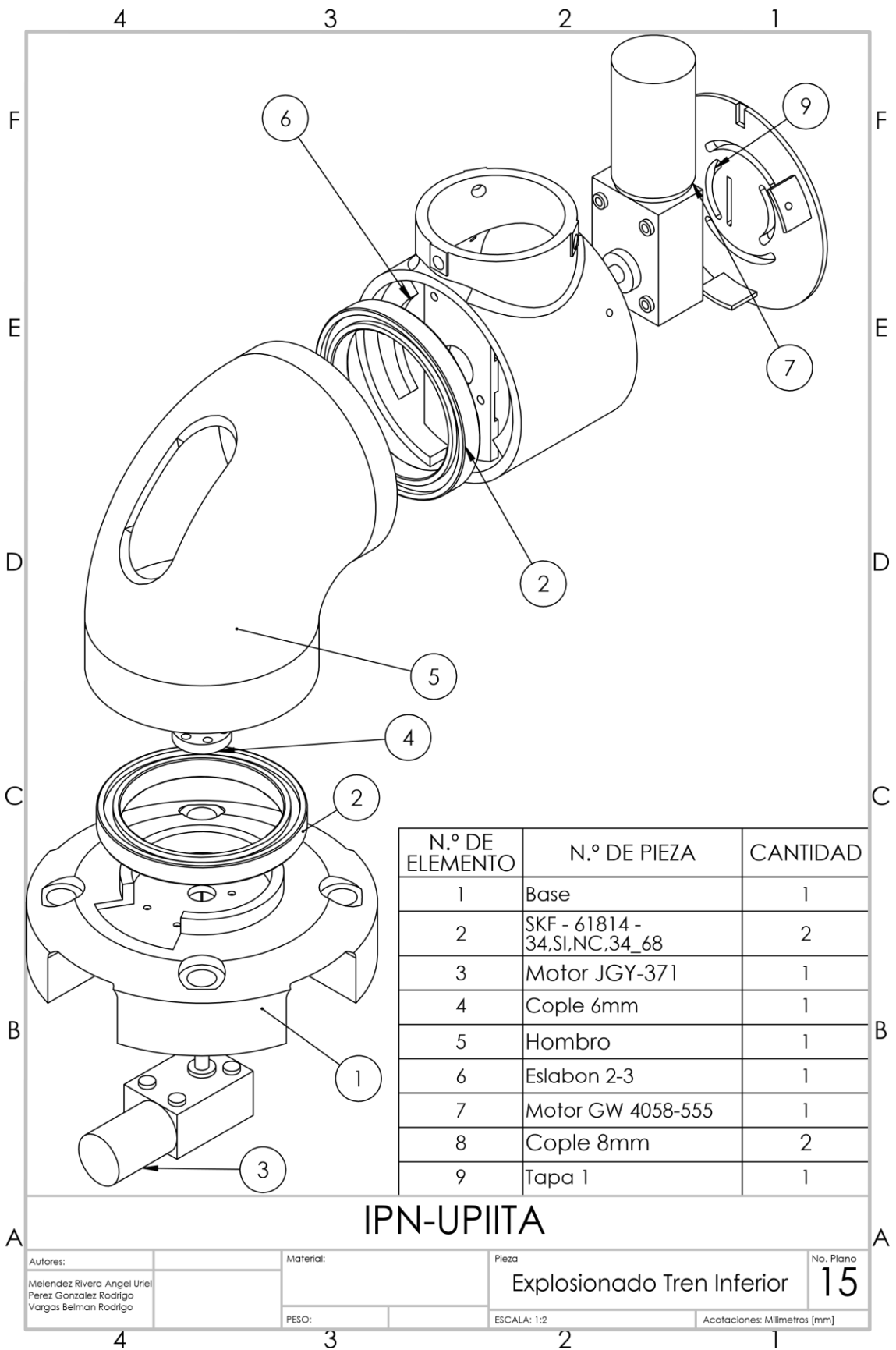


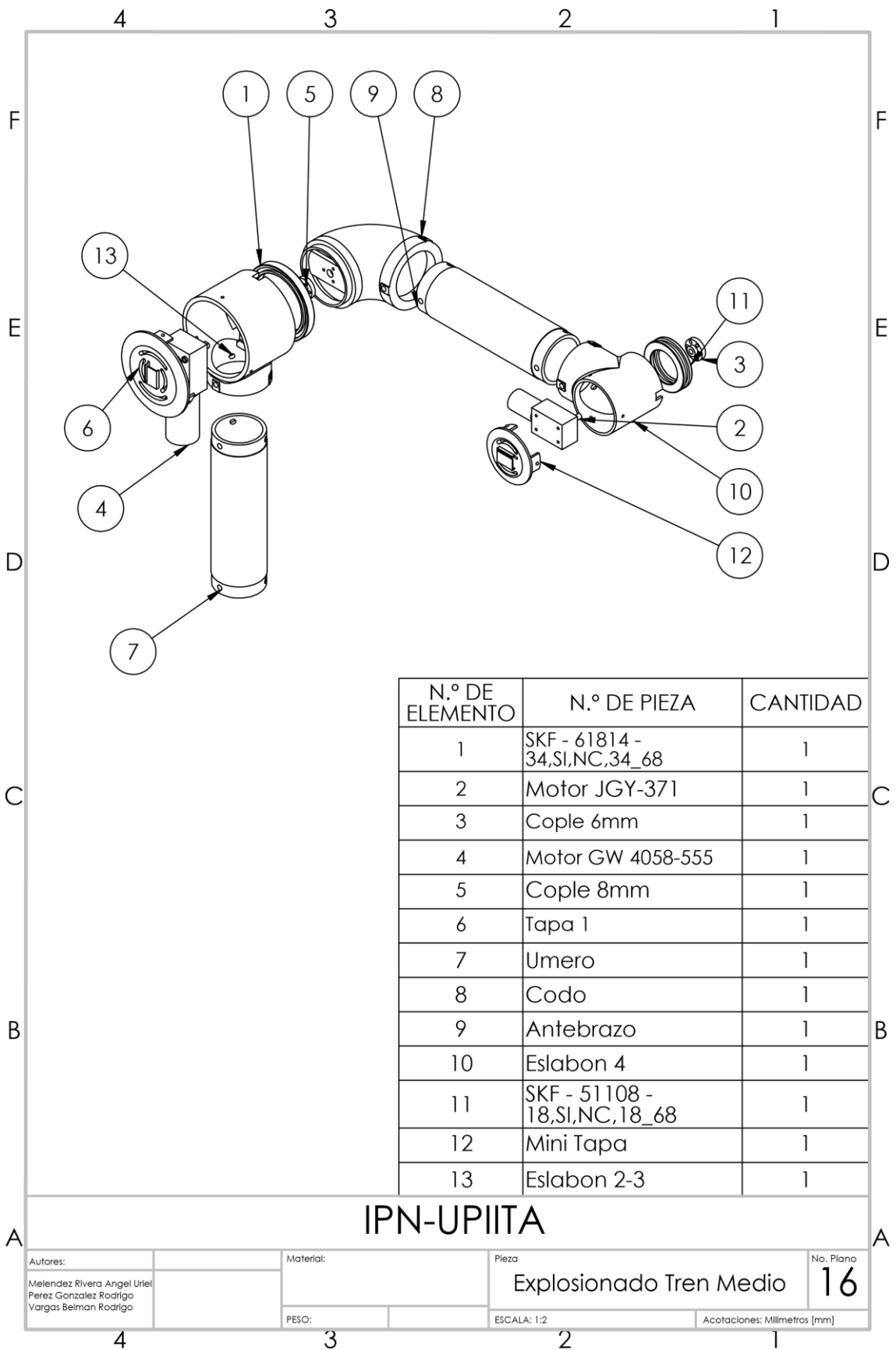


IPN-UPIITA

Autores: Melendez Rivera Angel Uriel Perez Gonzalez Rodrigo Vargas Belman Rodrigo		Material: PLA	Pieza Tapa 2	No. Plano 13
PESO:		ESCALA: 1:1	Acotaciones: Milímetros [mm]	







4 3 2 1

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Motor JGY-371	2
2	Cople 6mm	2
3	SKF - 51108 - 18,SI,NC,18_68	2
4	Tapa 2	2
5	Muñeca	1
6	Eslabon 5-6	1
7	Motor WIK25GAD012	1
8	EfectoFinalCuerpo	1
9	EfectoFinalTapa	1
10	Camara	1

IPN-UPIITA

Autores: Melendez Rivera Angel Uriel Perez Gonzalez Rodrigo Vargas Belman Rodrigo		Material:	Pieza Explosionado Tren Superior	No. Plano 17
PESO:		ESCALA: 1:2	Acotaciones: Milímetros [mm]	

4 3 2 1

5. Anexos

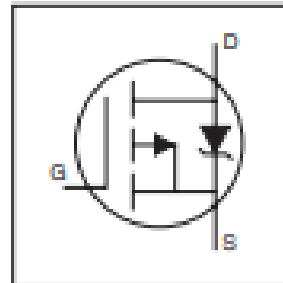
International
IR Rectifier

PD - 94788

IRF5305PbF

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- P-Channel
- Fully Avalanche Rated
- Lead-Free



$$V_{DSS} = -55V$$

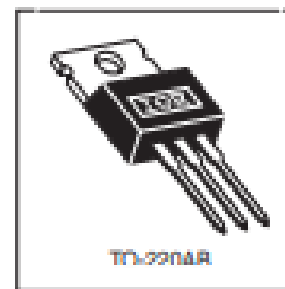
$$R_{DS(on)} = 0.06\Omega$$

$$I_D = -31A$$

Description

Fifth Generation HEXFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET Power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-31	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ -10V$	-22	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{\textcircled{D}}$	-110	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Power Dissipation	110	W
	Linear Derating Factor	0.71	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy $\text{\textcircled{D}}$	280	mJ
I_{AR}	Avalanche Current $\text{\textcircled{D}}$	-18	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy $\text{\textcircled{D}}$	11	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt $\text{\textcircled{D}}$	-5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and	-55 to +175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds (300 (1.8mm from case)		
	Mounting torque, 8-32 or M3 screw	10 lbIn (1.1Nm)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.4	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

10/31/03

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	-55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = -250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	-0.034	—	V/°C	Reference to 25°C , $I_D = -1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.08	Ω	$V_{GS} = -10V, I_D = -16A$ @
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	-2.0	—	-4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = -250\mu A$
g_m	Forward Transconductance	8.0	—	—	S	$V_{GS} = -25V, I_D = -16A$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	-25	μA	$V_{GS} = -55V, V_{DS} = 0V$ $V_{GS} = -44V, V_{DS} = 0V, T_J = 150^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100	nA	$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = -16A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	13	nC	$V_{GS} = -44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	29	nC	$V_{GS} = -10V$, See Fig. 6 and 13 @
$t_{D(on)}$	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	$V_{DS} = -28V$ $I_D = -16A$ $R_G = 6.8\Omega$ $R_D = 1.6\Omega$, See Fig. 10 @
t_r	Rise Time	—	66	—		
$t_{D(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	39	—		
t_f	Fall Time	—	63	—		
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1200	—	pF	$V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = -25V$ $f = 1.0MHz$, See Fig. 5
C_{oss}	Output Capacitance	—	520	—		
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	250	—		

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	-31	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) @	—	—	-110		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	-1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = -16A, V_{GS} = 0V$ @
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	71	110	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_S = -16A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	170	250	nC	$di/dt = -100A/\mu s$ @

Notes:

ⓐ Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)

ⓑ $V_{DS} = -25V$, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 2.1mH$
 $R_G = 25\Omega, I_{DS} = -16A$. (See Figure 12)

ⓐ $I_{DS} \leq -16A, di/dt \leq -280A/\mu s, V_{DS} \leq V_{(BR)DSS}$,
 $T_J \leq 175^\circ\text{C}$

ⓑ Pulse width $\leq 300\mu s$; duty cycle $\leq 2\%$.

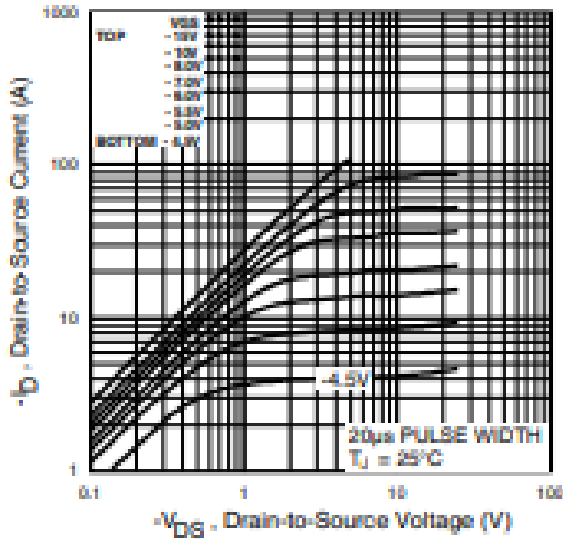


Fig 1. Typical Output Characteristics

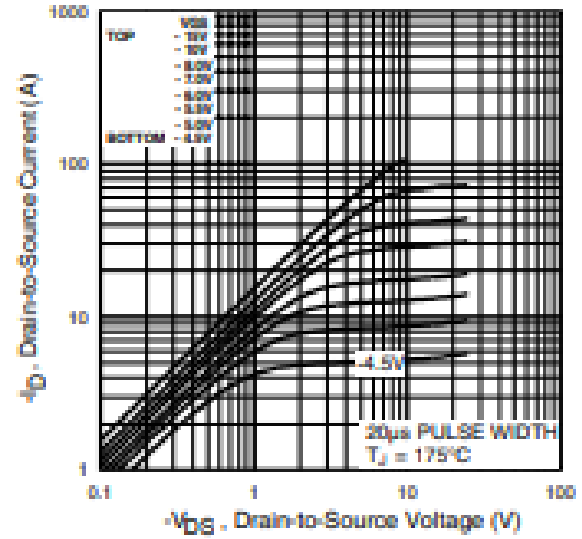


Fig 2. Typical Output Characteristics

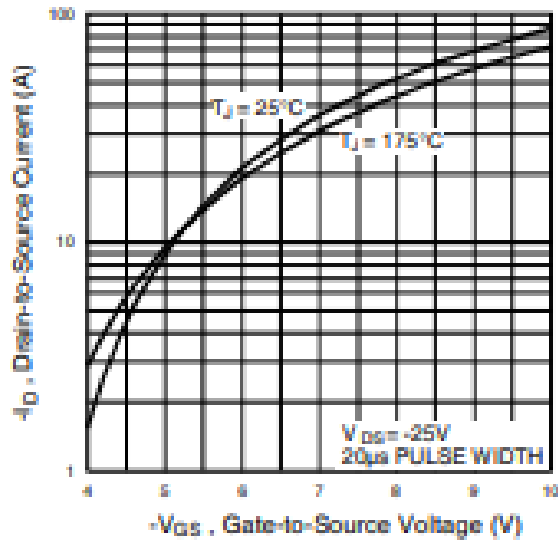


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

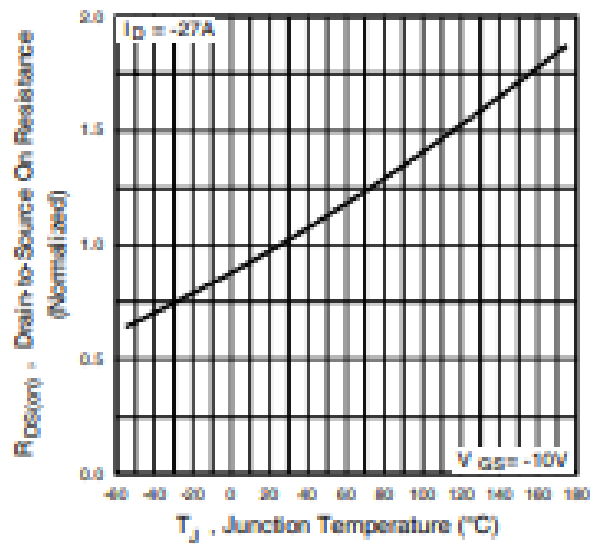


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

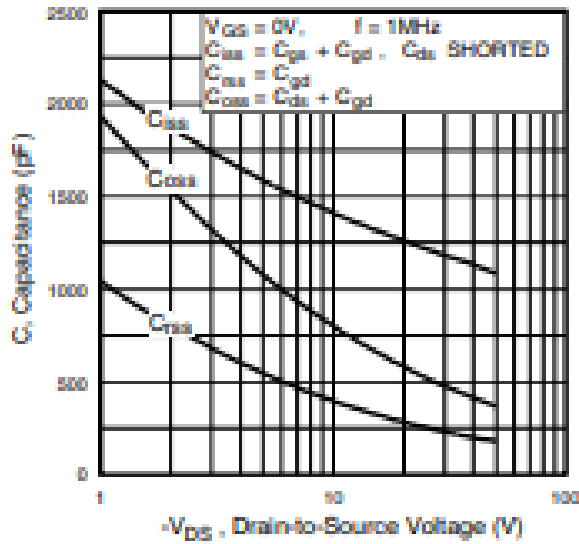


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

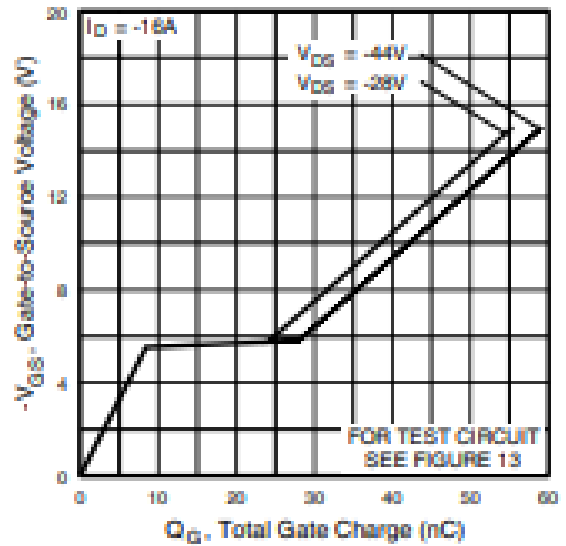


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

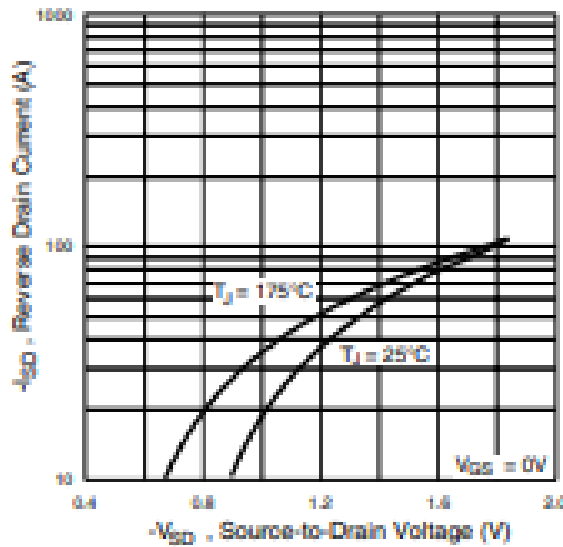


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

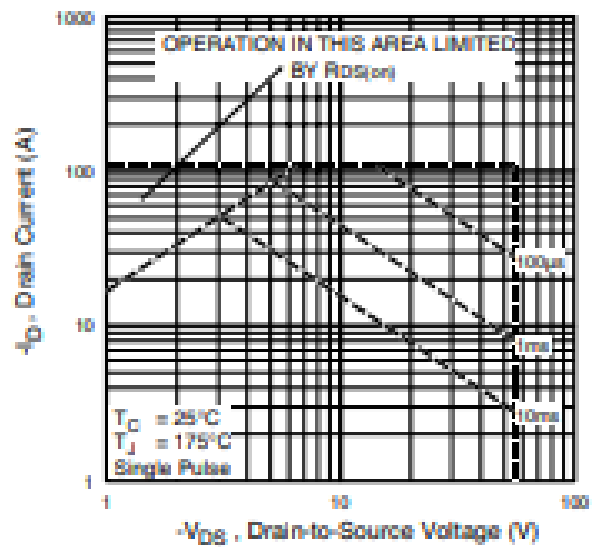


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

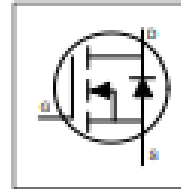
Application

- Brushed Motor drive applications
- BLDC Motor drive applications
- Battery powered circuits
- Half-bridge and full-bridge topologies
- Synchronous rectifier applications
- Resonant mode power supplies
- OR-ing and redundant power switches
- DC/DC and AC/DC converters
- DC/AC Inverters

Benefits

- Improved Gate, Avalanche and Dynamic dV/dt Ruggedness
- Fully Characterized Capacitance and Avalanche SOA
- Enhanced body diode dV/dt and dI/dt Capability
- Lead-Free, RoHS Compliant, Halogen-Free

HEXFET® Power MOSFET



V_{DSS}	100V
$R_{DS(on)}$ typ.	7.2mΩ
max	8.6mΩ
I_D (silicon limited)	97A



G	D	S
Gate	Drain	Source

Base part number	Package Type	Standard Pack		Orderable Part Number
		Form	Quantity	
IRF100B202	TO-220	Tube	50	IRF100B202

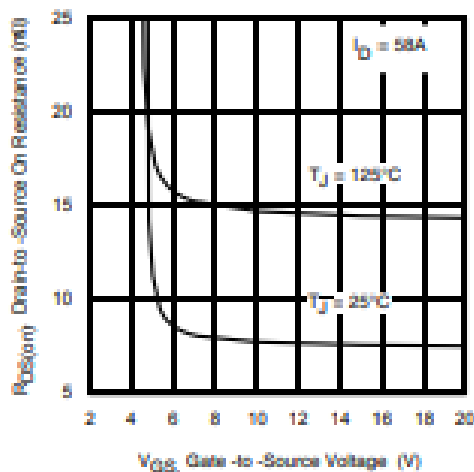


Fig 1. Typical On- Resistance vs. Gate Voltage

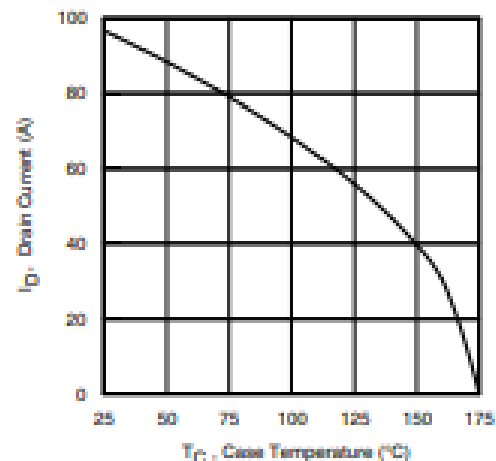


Fig 2. Maximum Drain Current vs. Case Temperature

Absolute Maximum Rating

Symbol	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	97	A
$I_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10\text{V}$	68	
I_{DM}	Pulsed Drain Current $\text{\textcircled{1}}$	380	
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	221	W
	Linear Derating Factor	1.5	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
T_J	Operating Junction and	-55 to + 175	°C
T_{STG}	Storage Temperature Range		
	Soldering Temperature, for 10 seconds (1.6mm from case)		
	Mounting Torque, 6-32 or M3 Screw	10 lbf-in (1.1 N-m)	

Avalanche Characteristics

E_{AS} (Thermally limited)	Single Pulse Avalanche Energy $\text{\textcircled{2}}$	189	mJ
E_{AS} (Thermally limited)	Single Pulse Avalanche Energy $\text{\textcircled{2}}$	292	
E_{AS} (tested)	Single Pulse Avalanche Energy Tested Value $\text{\textcircled{2}}$	217	
I_{AR}	Avalanche Current $\text{\textcircled{3}}$	See Fig 15, 16, 23a, 23b	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy $\text{\textcircled{3}}$		mJ

Thermal Resistance

Symbol	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case $\text{\textcircled{4}}$	—	0.68	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Static @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS} = 0\text{V}, I_D = 250\mu\text{A}$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.10	—	V/°C	Reference to 25°C, $I_D = 5\text{mA}$ $\text{\textcircled{5}}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	7.2	8.6	mΩ	$V_{GS} = 10\text{V}, I_D = 58\text{A}$
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 150\mu\text{A}$
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	20	μA	$V_{DS} = 100\text{V}, V_{GS} = 0\text{V}$
		—	—	250		$V_{DS} = 80\text{V}, V_{GS} = 0\text{V}, T_J = 125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{DS} = 20\text{V}$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{DS} = -20\text{V}$
R_G	Gate Resistance	—	2.4	—	Ω	


Notes:

- $\text{\textcircled{1}}$ Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature.
- $\text{\textcircled{2}}$ Limited by T_{Jmax} , starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.113\text{mH}$, $R_G = 50\Omega$, $I_{AS} = 58\text{A}$, $V_{DS} = 10\text{V}$.
- $\text{\textcircled{3}}$ $I_{AS} \leq 58\text{A}$, $dI/dt \leq 1316\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DS} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq 175^\circ\text{C}$.
- $\text{\textcircled{4}}$ Pulse width $\leq 400\mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.
- $\text{\textcircled{5}}$ C_{oss} eff. (TR) is a fixed capacitance that gives the same charging time as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DS} .
- $\text{\textcircled{6}}$ C_{oss} eff. (ER) is a fixed capacitance that gives the same energy as C_{oss} while V_{DS} is rising from 0 to 80% V_{DS} .
- $\text{\textcircled{7}}$ R_G is measured at T_J approximately 90°C.
- $\text{\textcircled{8}}$ Limited by T_{Jmax} , starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 1\text{mH}$, $R_G = 50\Omega$, $I_{AS} = 24\text{A}$, $V_{DS} = 10\text{V}$.
- $\text{\textcircled{9}}$ This value determined from sample failure population, starting $T_J = 25^\circ\text{C}$, $L = 0.113\text{mH}$, $R_G = 50\Omega$, $I_{AS} = 58\text{A}$, $V_{DS} = 10\text{V}$.

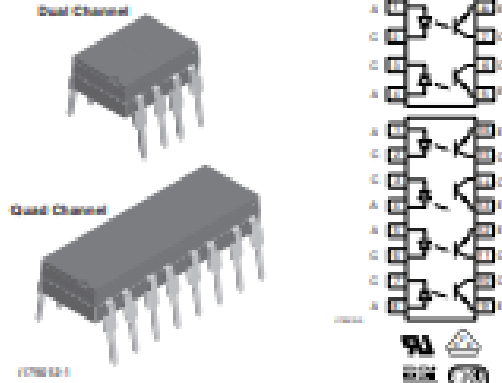
Dynamic Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
g_{fs}	Forward Transconductance	123	—	—	S	$V_{GS} = 10V, I_D = 58A$
Q_g	Total Gate Charge	—	77	116	nC	$I_D = 58A$ $V_{GS} = 50V$ $V_{DS} = 10V$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	20	—		
Q_{gd}	Gate-to-Drain Charge	—	23	—		
Q_{gync}	Total Gate Charge Sync. ($Q_g - Q_{gd}$)	—	54	—		
t_{don}	Turn-On Delay Time	—	11	—		
t_r	Rise Time	—	56	—	ns	$V_{DS} = 65V$ $I_D = 58A$ $R_{\theta} = 2.7\Omega$
t_{doff}	Turn-Off Delay Time	—	55	—		
t_f	Fall Time	—	58	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	4476	—	pF	$V_{GS} = 0V$ $V_{DS} = 50V$ $f = 1.0\text{MHz}$, See Fig.5
C_{oss}	Output Capacitance	—	319	—		
C_{riss}	Reverse Transfer Capacitance	—	154	—		
$C_{oss\text{eff}}(ER)$	Effective Output Capacitance (Energy Related)	—	355	—		
$C_{oss\text{eff}}(TR)$	Output Capacitance (Time Related)	—	385	—		

Diode Characteristics

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	97	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	380		
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_D = 58A, V_{GS} = 0V \text{ @}$
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ②	—	28	—	V/ns	$T_J = 175^\circ\text{C}, I_D = 58A, V_{GS} = 100V$
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	51	—	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $V_{SD} = 85V$ $T_J = 125^\circ\text{C}$ $I_r = 58A$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	105	—		
		—	133	—	nC	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $dv/dt = 100A/\mu s \text{ @}$ $T_J = 125^\circ\text{C}$
I_{RRM}	Reverse Recovery Current	—	3.7	—	A	$T_J = 25^\circ\text{C}$

Optocoupler, Phototransistor Output (Dual, Quad Channel)



FEATURES

- Current transfer ratio at $I_f = 10 \text{ mA}$
- Isolation rated voltage 4420 V_{CEAS}
- Material categorization:
for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99812



RoHS COMPLIANT

AGENCY APPROVALS

- UL1577, file no. E52744, double protection
- cUL tested to CSA 22.2 bulletin 5A
- CSA 93751
- BSI EN 60950, BSI EN 60065
- DIN EN 60747-5-5 (VDE 0884-5) available with option 1
- FIMKO

DESCRIPTION

The ILD1, ILD2, ILD5, ILQ1, ILQ2 are optically coupled isolated pairs employing GaAs infrared LEDs and silicon NPN phototransistor. Signal information, including a DC level, can be transmitted by the drive while maintaining a high degree of electrical isolation between input and output.

The ILD1, ILD2, ILD5, ILQ1, ILQ2 are especially designed for driving medium-speed logic and can be used to eliminate troublesome ground loop and noise problems. Also these couplers can be used to replace relays and transformers in many digital interface applications such as CTR modulation.

The ILD1, ILD2, ILD5 have two isolated channels in a single DIP package and the ILQ1, ILQ2 have four isolated channels per package.

ORDERING INFORMATION							
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">I</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">L</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">x</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">#</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">-</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">X</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">#</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">#</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">T</div> </div> <p style="text-align: center;">PART NUMBER</p> <p style="text-align: center;">x = D (dual) or Q (quad)</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">X</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">#</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">#</div> </div> <p style="text-align: center;">PACKAGE OPTION</p>			<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">T</div> </div> <p style="text-align: center;">TAPE AND REEL</p>		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>DIP-8 7.62 mm</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Option 8 10.16 mm</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>Option 7 10.16 mm</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Option 9 10.16 mm</p> </div> </div>	
AGENCY CERTIFIED/PACKAGE	DUAL CHANNEL			QUAD CHANNEL			
	CTR (%)						
UL, CSA, BSI, FIMKO	20 to 300	100 to 500	50 to 400	20 to 300	100 to 500		
DIP-8	ILD1	ILD2	ILD5	-	-		
DIP-8, 400 mil, option 8	-	ILD2-X008	-	-	-		
SMD-8, option 7	ILD1-X007T ⁽¹⁾	ILD2-X007T ⁽¹⁾	-	-	-		
SMD-8, option 9	ILD1-X009T ⁽¹⁾	ILD2-X009T ⁽¹⁾	ILD5-X009T ⁽¹⁾	-	-		
DIP-16	-	-	-	ILQ1	ILQ2		
DIP-16, 400 mil, option 8	-	-	-	ILQ1-X008	ILQ2-X008		
SMD-16, option 7	-	-	-	ILQ1-X007	ILQ2-X007T ⁽¹⁾		
SMD-16, option 9	-	-	-	ILQ1-X009T ⁽¹⁾	ILQ2-X009T ⁽¹⁾		



AGENCY CERTIFIED/PACKAGE	DUAL CHANNEL			QUAD CHANNEL	
	GTR (%)				
VDE, UL, CSA, BSI, FIMKO	20 to 300	100 to 500	50 to 400	20 to 300	100 to 500
DIP-8	ILD1-X001	ILD2-X001	ILD5-X001	-	-
DIP-8, 400 mil, option 8	-	ILD2-X016	-	-	-
SMD-8, option 7	-	ILD2-X017	-	-	-
SMD-8, option 9	ILD1-X019T	-	-	-	-
DIP-18	-	-	-	-	ILQ2-X001
DIP-18, 400 mil, option 8	-	-	-	-	ILQ2-X016
SMD-18, option 7	-	-	-	-	ILQ2-X017T ⁽¹⁾

Notes

- Additional options may be possible, please contact sales office

⁽¹⁾ Also available in tubes; do not put T on end

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T _{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)					
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT					
Reverse voltage			V _R	8	V
Forward current			I _F	50	mA
Surge current			I _{FSM}	2.5	A
Power dissipation			P _{DM}	100	mW
Derate linearly from 25 °C				1.3	mW/°C
OUTPUT					
Collector emitter reverse voltage		ILD1	V _{CEO}	50	V
		ILQ1	V _{CEO}	50	V
		ILD2	V _{CEO}	70	V
		ILQ2	V _{CEO}	70	V
		ILD5	V _{CEO}	70	V
Collector current	t < 1 ms		I _C	50	mA
			I _C	400	mA
Power dissipation			P _{DM}	200	mW
Derate linearly from 25 °C				2.8	mW/°C
COUPLER					
Package power dissipation			P _{DM}	250	mW
Derate linearly from 25 °C				3.3	mW/°C
Storage temperature			T _{stg}	-40 to +150	°C
Operating temperature			T _{amb}	-40 to +100	°C
Junction temperature			T _J	100	°C
Soldering temperature ⁽¹⁾	2 mm from case bottom		T _{sol}	260	°C

Notes

- Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability

⁽¹⁾ Refer to reflow profile for soldering conditions for surface mounted devices (SMD). Refer to wave profile for soldering conditions for through hole devices (DIP)

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT						
Forward voltage	$I_F = 60\text{ mA}$	V_F	-	1.25	1.65	V
Reverse current	$V_R = 8\text{ V}$	I_R	-	0.01	10	μA
Capacitance	$V_{IO} = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{IO}	-	25	-	pF
Thermal resistance, junction to lead		$R_{th(j-l)}$	-	750	-	K/W
OUTPUT						
Collector emitter capacitance	$V_{CE} = 5\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{CE}	-	6.8	-	pF
Collector emitter leakage current	$V_{CE} = 10\text{ V}$	I_{CEO}	-	5	50	nA
Saturation voltage, collector emitter	$I_C = 1\text{ mA}$, $I_B = 20\text{ }\mu\text{A}$	$V_{CE(sat)}$	-	0.25	0.4	V
DC forward current gain	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 20\text{ }\mu\text{A}$	h_{FE}	200	650	1800	
DC forward current gain saturated	$V_{CE} = 0.4\text{ V}$, $I_C = 20\text{ }\mu\text{A}$	$h_{FE(sat)}$	120	400	600	
Thermal resistance, junction to lead		$R_{th(j-l)}$	-	500	-	K/W
COUPLER						
Capacitance (input to output)	$V_{IO} = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_{IO}	-	0.8	-	pF

Note

- Minimum and maximum values are testing requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluation. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements

CURRENT TRANSFER RATIO ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
I_C/I_B (collector emitter saturated)	$I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 0.4\text{ V}$	ILD1	$CTR_{CE(sat)}$	-	75	-	%
		ILQ1	$CTR_{CE(sat)}$	-	75	-	%
		ILD2	$CTR_{CE(sat)}$	-	170	-	%
		ILQ2	$CTR_{CE(sat)}$	-	170	-	%
		ILD5	$CTR_{CE(sat)}$	-	100	-	%
	$I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 10\text{ V}$	ILD1	CTR_{CE}	20	80	300	%
		ILQ1	CTR_{CE}	20	80	300	%
		ILD2	CTR_{CE}	100	200	500	%
		ILQ2	CTR_{CE}	100	200	500	%
		ILD5	CTR_{CE}	50	130	400	%

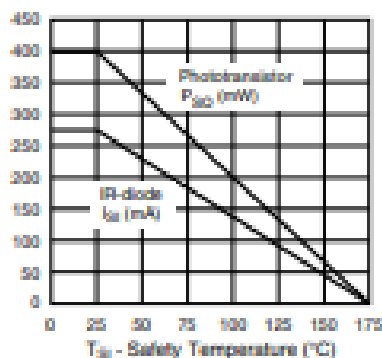


Fig. 1 - Derating Diagram

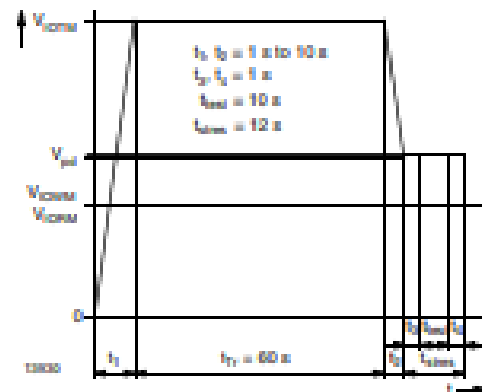


Fig. 2 - Test Pulse Diagram for Sample Test according to DIN EN 60747-5-2 (VDE 0884); IEC 60747-5-5

1N5400 thru 1N5408

Axial-Lead Glass Passivated Standard Recovery Rectifiers

Lead mounted standard recovery rectifiers are designed for use in power supplies and other applications having need of a device with the following features:

Features

- High Current to Small Size
- High Surge Current Capability
- Low Forward Voltage Drop
- Void-Free Economical Plastic Package
- Available in Volume Quantities
- Plastic Meets UL 94 V-0 for Flammability
- These are Pb-Free Devices

Mechanical Characteristics:

- Case: Epoxy, Molded
- Weight: 1.1 Gram (Approximately)
- Finish: All External Surfaces Corrosion Resistant and Terminal Leads are Readily Solderable
- Lead and Mounting Surface Temperature for Soldering Purposes: 260°C Max. for 10 Seconds
- Polarity: Cathode Indicated by Polarity Band

*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.



ON Semiconductor®

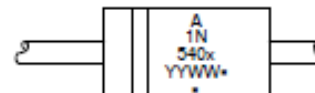
www.onsemi.com

STANDARD RECOVERY
RECTIFIERS
50-1000 VOLTS
3.0 AMPERES



AXIAL LEAD
CASE 267-05
STYLE 1

MARKING DIAGRAM



A = Assembly Location
1N540x = Device Number
x = 0, 1, 2, 4, 6, 7 or 8
YY = Year
WW = Work Week
* = Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information on page 5 of this data sheet.

1N5400 thru 1N5408

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N5400	1N5401	1N5402	1N5404	1N5406	1N5407	1N5408	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
Non-repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RSM}	100	200	300	525	800	1000	1200	V
Average Rectified Forward Current (Single Phase Resistive Load, 1/2 in. Leads, $T_L = 105^\circ\text{C}$)	I_O	3.0							A
Non-repetitive Peak Surge Current (8 ms Single Half-Sine-Wave)	I_{RSM}	200 (one cycle)							A
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J T_{stg}	- 65 to +150 - 65 to +175							$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Typ	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient (PC Board Mount, 1/2 in. Leads)	$R_{\theta JA}$	53	$^\circ\text{C}/\text{W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Forward Voltage ($I_F = 3.0\text{ A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	V_F	-	-	1.0	V
Reverse Current (Rated DC Voltage) $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = 100^\circ\text{C}$	I_R	-	-	10 30	μA

Product parametric performance is indicated in the Electrical Characteristics for the listed test conditions, unless otherwise noted. Product performance may not be indicated by the Electrical Characteristics if operated under different conditions.

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

60 Hz resistive or inductive loads.

For capacitive load, derate current by 20%.

250 & 500W Single Output Power Supplies

Features

- ◆ High Efficiency, up to 93%
- ◆ 1.8" high (For 1U racking)
- ◆ Wide Range AC Input
- ◆ 250W Convection Cooled
- ◆ Five year warranty



Key Market Segments & Applications



GWS500 Shown



Specifications		GWS250	GWS500
Model			
AC Input Voltage (300VAC for 5s)	VAC	85 - 264VAC	
Input Frequency	Hz	47 - 63Hz	
DC Input Voltage	VDC	120 - 373VDC*	
Inrush Current (cold start)	A	20A at 115VAC, 40A at 230VAC	
Power Factor (1)	-	Meets EN61000-3-2 (Typical PF 0.98/0.95)	
Input Current (115/230VAC)	A	3.0 / 1.4	5.5 / 2.7
Temperature Coefficient	°C	<0.02%/°C (0 - 50°C)	
Overcurrent Protection	-	>105% of nominal or >101% of peak. 12V hiccup style, 24V-48V Constant current style	
Overvoltage Protection (2)	V	12V: 13.8 - 16.2V 24V: 30.3 - 35.5V, 36V: 41.4 - 48.6V, 48V: 60 - 69.6V	
Overtemperature Protection (2)	-	Yes	
Hold Up Time (115 / 230V input)	ms	16ms	
Leakage Current (230VAC 60Hz)	mA	<0.75mA	
Remote Sense	-	No	Yes
Remote On/Off	-	Active Low	
Standby Input Power Draw	W	<0.5W	
5V Standby (always on)	-	5V 0.3A	
DC Good	-	DC Good, open collector signal, High on Fail	
LED Indicator	-	Green LED = On	
Output Remote Programming	-	See installation manual for details	
Operating Temperature	°C	-25 to +70°C. Derate linearly to 50% load from +50 to +70°C	-25 ⁽³⁾ to +70°C. Derate linearly to 50% load from +50 to +70°C
Storage Temperature	°C	-30 to +85°C	
Operating Humidity	-	30 - 90% RH (non condensing)	
Storage Humidity	-	10 - 95% RH (non condensing)	
Cooling	-	Convection	Internal fan
Withstand Voltage	-	Input to Ground 1.5kVAC, Input to Output 3kVAC, Output to Ground 500VAC ⁽⁴⁾ for 1 min.	
Isolation Resistance	-	>100M at 25°C & 70%RH, Output to Ground 500VDC	
Vibration (non operating)	-	10 - 55Hz: 19.6m/s ² constant sweep 1 min X, Y, Z for 1 hour	
Shock	-	< 196.1 m/s ² (20G)	
Immunity	-	IEC61000-4-2 (lv 2, 3), -3 (lv3), -4 (lv 3), -5 (lv 3), -6 (lv 3), -8 (lv 4), -11	
Safety Agency Approvals	-	UL60950-1, CSA C22.2 No 60950-1-07 (cUL), EN60950-1 2nd Edition, IEC60950-1, CE Mark	
Conducted & Radiated EMI	-	EN55022-B, FCC-B	
Weight (Typ)	g	850	1020
Size (LxWxH)	in	7.8 x 4.1 x 1.61"	8.6 x 4.1 x 1.61"
Warranty	yrs	Five Years	

(1) 115 / 230VAC input

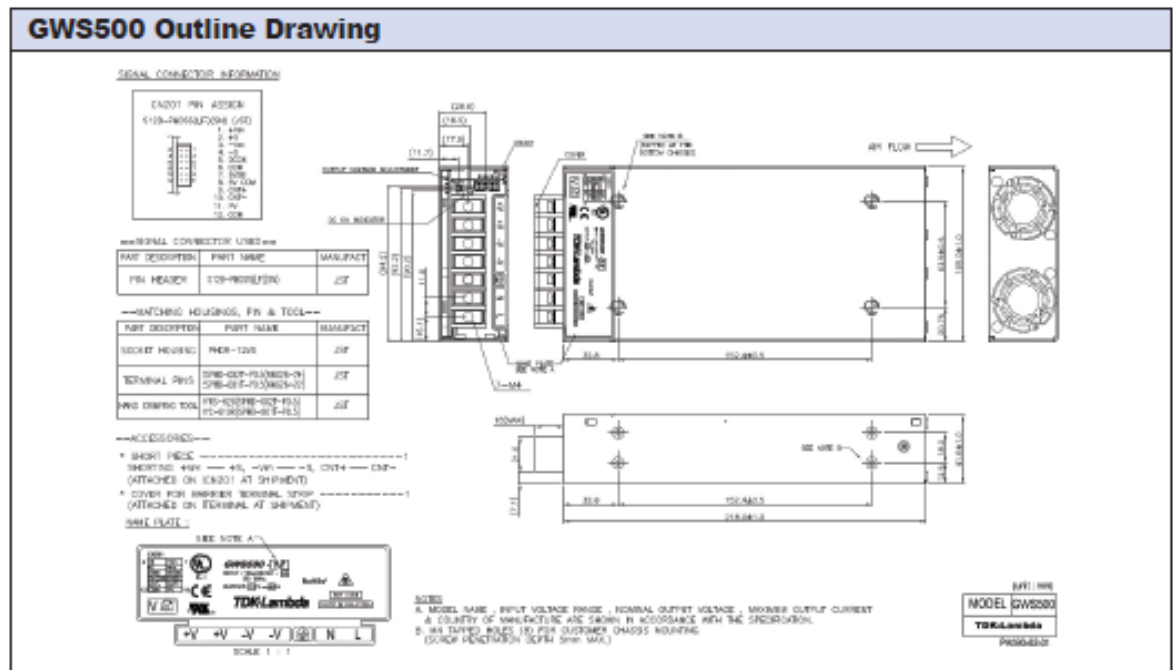
(2) Recycle AC, or use remote on/off to reset

(3) Guaranteed start up at -40°C

(4) 500VDC for GWS500

*Safety certified for AC input only

Model Selector								
Model	Voltage (V)	Adjust Range (V)	Max Current (A)	Peak Curr. <10s, <35% DC (A)	Load Reg. (mV)	Line Reg. (mV)	Ripple Noise (mV)	Efficiency (typ) % (230VAC)
GWS250-12	12V	10.8 - 13.2	21	-	96	48	150	92
GWS500-12	12V	10.8 - 13.2	42	-	96	48	150	89
GWS250-24	24V	22 - 28.8	10.5	12.5	192	96	240	92
GWS500-24	24V	22 - 28.8	21	25.0	192	96	150	90
GWS250-36	36V	32 - 40	7	8.4	288	144	360	93
GWS500-36	36V	32 - 40	14	16.7	288	144	200	90
GWS250-48	48V	42 - 57.6	5.3	-	384	192	480	93
GWS500-48	48V	42 - 57.6	10.5	-	384	192	300	90



Other Industrial Products	
LS25 - 200	25W to 200W low cost
HWS15 - 1800	15W to 1800W limited lifetime warranty
RWS-B	50W to 600W single output
CSS500	360W to 500W medical

For Additional Information, please visit us.tdk-lambda.com/lp/products/gws-series.htm

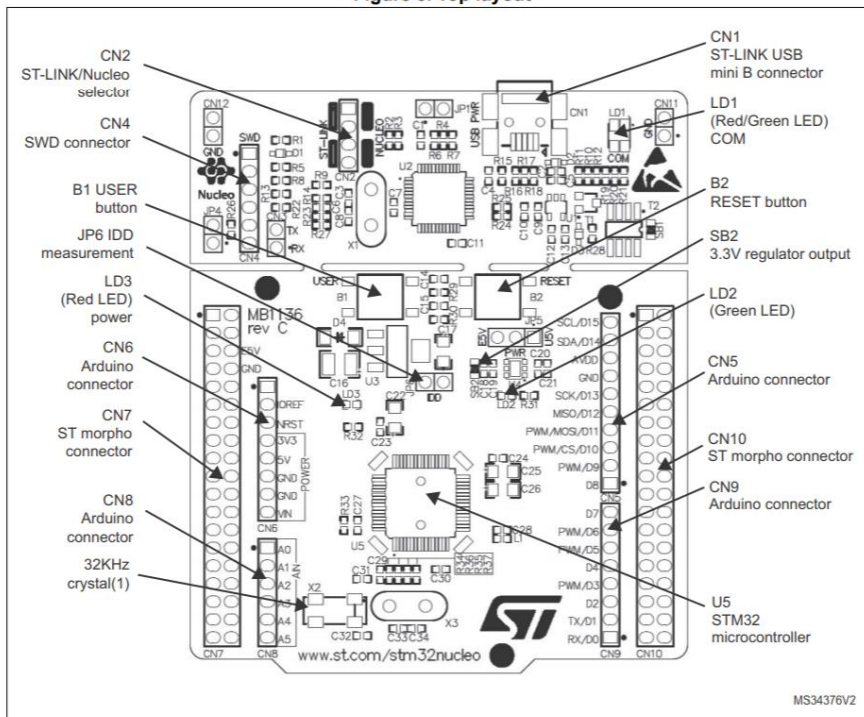


1 Features

The STM32 Nucleo board offers the following features:

- STM32 microcontroller in LQFP64 package
- Three LEDs:
 - USB communication (LD1), user LED (LD2), power LED (LD3)
- Two push-buttons: USER and RESET
- Two types of extension resources
 - Arduino™ Uno V3 connectivity
 - ST morpho extension pin headers for full access to all STM32 I/Os
- Flexible board power supply:
 - USB VBUS or external source (3.3 V, 5 V, 7-12 V)
 - Power management access point
- On-board ST-LINK/V2-1 debugger and programmer with SWD connector
 - Selection-mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2-1
- USB re-enumeration capability. Three different interfaces supported on USB:
 - Virtual COM port
 - Mass storage
 - Debug port
- Comprehensive free software libraries and examples available with the STM32Cube MCU Package
- Arm® Mbed™(a) (see <http://mbed.org>)

Figure 3. Top layout



1. Crystal may be present or not depending on board version, refer to [Section 6.7.2](#).