

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT
PARALELO TIPO DELTA**

**FRANKLIN OLMEDO BARCO GONZÁLEZ
JHON ÁLVARO LARA GARZÓN**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
COLOMBIA - BOGOTÁ D.C. 2018**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT
PARALELO TIPO DELTA**

**FRANKLIN OLMEDO BARCO GONZÁLEZ
JHON ÁLVARO LARA GARZÓN**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO
MECÁNICO**

TUTOR: INGENIERO - ALEXANDER ALVARADO MORENO

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
INGENIERÍA MECÁNICA
COLOMBIA - BOGOTÁ D.C. 2018**

Nota De Aceptación

Firma del jurado

CONTENIDO

1	Introducción.....	7
2	Objetivos	7
2.1	Objetivo General	7
2.2	Objetivos Específicos	8
3	Alcance	8
4	Marco Teórico	8
4.1	Robot.....	8
4.2	Manipulador Paralelo	9
4.3	Robot paralelo tipo delta.	9
4.4	Cinemática De Los Robots Paralelos.....	10
4.4.1	Cinemática Directa	10
4.4.2	Cinemática Inversa.....	10
4.5	Espacio De Trabajo.....	11
5	Metodología	11
5.1	Fase 1. Comprensión de la necesidad.	12
5.2	Fase 2. Diseño conceptual.....	12
5.3	Casa de las calidades (QFD).	13
5.4	Generación de conceptos.	15
5.4.1	Subsistema movimiento y control	15
5.5	Fase 3: Diseño de detalle.....	24
5.5.1	Modelo general para el prototipo de robot paralelo tipo delta.....	24
5.5.2	Diseño de subsistema movimiento y control.....	28
5.5.3	Diseño subsistema brazos de control.	31
5.5.4	Diseño base móvil.	34
5.5.5	Diseño de subsistema estructura de soporte.....	36
5.6	Fase 4: Fabricación del prototipo físico del Robot paralelo tipo Delta.....	38
6	Cinemática Directa.....	38
6.1	Implementación en el software Matlab:	42
6.2	Código Arduino	44
6.3	Resultados	45
7	Conclusiones.....	48
8	Recomendaciones	48

9	Bibliografía	49
10	Anexo A - Planos de fabricación.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema Robot Paralelo Tipo Delta [4].	9
Figura 2	Ejemplo de solución para la cinemática Directa (software Matlab) [6]....	10
Figura 3	Ejemplo, de solución de cinemática inversa [6].....	11
Figura 4	Diagrama de flujo para Metodología de Diseño	12
Figura 5	Motor DC	16
Figura 6	Motor paso a paso.....	16
Figura 7	Servomotor	16
Figura 8	Controlador específico JOYSTICK S310182.....	17
Figura 9	Microcontrolador Arduino Uno	17
Figura 10	Microcontrolador.....	17
Figura 11	Prototipo de una impresora 3D implementado mediante un Robot Delta [7]	19
Figura 12	Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB) [6]	19
Figura 13	Junta universal	21
Figura 14	Rótula esférica	22
Figura 15	Junta de bola magnética	22
Figura 16	Diagrama general del Robot paralelo tipo Delta. – Fuente , propia.	25
Figura 17	Detalles de la base fija del Robot paralelo tipo Delta. [9]	25
Figura 18	Detalles de la base móvil del Robot paralelo tipo Delta. [9].....	25
Figura 19	Dimensiones geométricas	26
Figura 20	Diagrama simplificado, eslabones del Robot paralelo tipo Delta. – Fuente , propia	27
Figura 21	Diagrama simplificado, articulaciones del Robot paralelo tipo Delta. – Fuente , propia.....	28
Figura 22	Analog Servo – 1501MG Tomado de , www.tdrobotica.co	29
Figura 23	Diagrama torque servomotor	29
Figura 24	Modo de conexión básico para tres servomotores.	30
Figura 25	Tipo de carga fuente, Mecánica de los materiales James M.....	31
Figura 26	Diseño y ensamble para los brazos superiores. - Fuente , software NX.	32
Figura 27	Tipo de carga fuente , Mecánica de los materiales James M.	33
Figura 28	Diseño y ensamble para los brazos inferiores. - Fuente , software NX.	34
Figura 29	Modelado base móvil - Fuente , software NX.	34
Figura 30	Modelado base fija. - Fuente , software NX.	36
Figura 31	Diseño de la estructura de soporte - Fuente , software NX.	36
Figura 32	Máquina prototipo de Robot paralelo tipo Delta.	38

Figura 33 Parámetros geométricos del Robot paralelo tipo Delta.	39
Figura 34 Esquema del Robot paralelo tipo Delta visto desde arriba.	41
Figura 35 Desarrollo de la cinemática directa - Fuente, software Matlab.	45
Figura 36 Validación No.1 cinemática directa - Fuente , Software NX.....	46
Figura 37 Validación No.2 cinemática directa - Fuente , Software NX.....	46
Figura 38 Validación No.3 cinemática directa - Fuente , Software NX.....	47
Figura 39 Validación No.4 cinemática directa - Fuente , Software NX.....	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Listado de requerimientos del cliente y requerimientos de diseño.	13
Tabla 2 Matriz casa de las calidades	14
Tabla 3 Motores ventajas y desventajas.	16
Tabla 4 Motores matriz de selección	16
Tabla 5 Controladores ventajas y desventajas.	17
Tabla 6 Matriz de Selección del Controlador	18
Tabla 7 Brazos de control ventajas y desventajas.	19
Tabla 8 Matriz de Selección brazos de control	20
Tabla 9 Matriz de Selección - Material para los brazos de control.....	20
Tabla 10 Matriz Selección sección transversal.	21
Tabla 11 Uniones o juntas ventajas y desventajas	22
Tabla 13 Matriz Selección sección transversal y material.....	23
Tabla 14 Matriz Selección - Forma estructural.....	24
Tabla 15 Resumen - Selección final	24
Tabla 16 Dimensiones geométricas para el Robot paralelo tipo Delta.....	26
Tabla 17 Análisis torque requerido	30
Tabla 18 Dimensión de sección para los brazos superiores.....	32
Tabla 19 Dimensión de sección para los brazos inferiores.....	33
Tabla 20 Ejemplos - coordenadas x, y, z, para la cinemática directa.	47

1 Introducción

El siguiente proyecto se realizó con el fin, de obtener el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por medio del diseño y construcción de un Robot paralelo tipo Delta que consiste en una máquina programable, así como versátil con la cual los estudiantes de ingeniería mecánica podrán realizar: el estudio, observación, manipulación y optimización de procesos industriales que involucren movimiento de piezas o herramientas, además de algunos tipos de mecanizado, según la necesidad requerida.

Así que se fijaron los objetivos que se debieron cumplir al culminar este proyecto teniendo presente el campo de aplicación académico del mismo.

El documento aquí propuesto reúne información correspondiente al Robot paralelo tipo Delta en que consiste y cuáles son sus aplicaciones, también reúne la metodología de diseño usada en la construcción de esta máquina, la cual pasa por cuatro fases: Comprensión de la necesidad, diseño conceptual, diseño de detalle y fabricación del prototipo físico del Robot paralelo tipo Delta.

Una vez se desarrolló la metodología de diseño con sus respectivas evaluaciones de alternativas, se procedió al modelado de: partes, elementos, ensamble del sistema y plasmado de planos para su paso a fabricación; con ayuda del software de diseño mecánico Siemens NX.

Con lo realizado en el presente proyecto los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad Distrital pueden interactuar con la tecnología que proporcionan los Robots paralelos tipo Delta, de estar en la capacidad de: diseñar, construir, simular y realizar análisis cinemáticos a una configuración estructural para un Robot paralelo tipo Delta.

Por lo tanto, el objetivo de este proyecto fue; diseñar y construir un prototipo mecánico para un Robot paralelo tipo Delta, para que el estudiante del proyecto curricular pueda programar y simular tareas reales presentes en la industria, además de encontrar en este documento una metodología de diseño con cálculos cinemáticos de tipo directa que pueda aplicar en futuros proyectos.

El desarrollo del proyecto se basó en usar elementos de bajo costo, así como disponibles en el mercado local, por lo tanto; el Robot paralelo tipo Delta estará equipado con una tarjeta Arduino UNO, tres servos motores, partes y accesorios de cómoda adquisición o fácil fabricación.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- Diseñar y construir un prototipo de Robot paralelo tipo Delta.

2.2 Objetivos Específicos

- Establecer una metodología para el diseño y construcción de un prototipo de Robot paralelo tipo Delta mediante el despliegue de la Función de Calidad (QFD)
- Desarrollar un modelo CAD del Robot paralelo tipo Delta en el software NX, para determinar el espacio de trabajo, longitud de eslabones, interferencia entre partes mecánicas.
- Realizar el análisis de la cinemática directa de Robot paralelo tipo Delta construido.

3 Alcance

El alcance del presente proyecto de grado consiste como primer desarrollo el diseño, construcción y ensamble de las partes mecánicas que hacen parte del Robot Tipo Delta, dejando para un próximo desarrollo por parte de los estudiantes de ingeniería la implementación de la programación avanzada de los movimientos necesarios para simular y ejecutar un proceso o actividad requerida.

4 Marco Teórico

4.1 Robot

El término Robot proviene de la palabra checa “Robota” y significa trabajo; existen varias definiciones para describir a un robot, entre ellas la que proporciona una mejor descripción es la adoptada por el *Robot Institute of America (RIA)*: Un robot es un manipulador multifuncional para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variedad de tareas.

Desde el punto de vista científico, los robots manipuladores como objetos de estudio ofrecen un amplio espectro en la formulación de problemas teórico prácticos debido a la naturaleza no lineal y multivariable de su comportamiento dinámico. Los robots han tenido gran aceptación en la industria, al grado de que se han convertido en elemento clave del proceso de automatización industrial, debido a los beneficios que traen consigo, tales como reducción de costos, incremento de la productividad, mejoramiento de la calidad del producto y reducción de problemas en ambientes peligrosos al ser humano como, por ejemplo; ambientes tóxicos, espacios de trabajo de altas temperaturas, zonas radioactivas entre otros. Una de las características principales de la robótica es la flexibilidad para automatizar y adaptarse a ambientes laborales. [1]

4.2 Manipulador Paralelo

Un manipulador paralelo es un mecanismo de cadena cinemática en lazo cerrado cuyo efector final está conectado a la base por varias cadenas cinemáticas independientes.

En un manipulador paralelo, se pueden distinguir una plataforma base, una plataforma móvil, y varios brazos, cada brazo es a su vez una cadena de tipo serie, cuyos eslabones finales son dos plataformas fija y móvil. Al contrario de los manipuladores en serie, cuyas articulaciones son accionadas.

En los manipuladores paralelos encontramos articulaciones sin accionar, lo que da como resultado una considerable diferencia entre ambos tipos de manipuladores. La presencia de articulaciones sin accionar hace el análisis de manipuladores paralelos, en general, más complejo que su contraparte serial. [2]

4.3 Robot paralelo tipo delta.

Un robot paralelo es aquel en que sus mecanismos funcionan mediante cadenas cinemáticas cerradas en paralelo. El mecanismo se compone de un elemento base y un elemento móvil conectado a la base mediante tres brazos de control **Figura 1**.

Sus características principales son: ligereza, rapidez, alta aceleración, mayor relación carga/peso, alta precisión, exactitud de posición y baja inercia móvil. Algunas de sus aplicaciones industriales son: manipulación de piezas, empaque de piezas, procesos de ensamble, máquinas de fresado, simulación de movimiento, entre otros. Igualmente presenta varias desventajas como: poseer un espacio de trabajo limitado, una cinemática más compleja es decir la definición de las posiciones singulares y la construcción del modelo dinámico son más complicados que para otros casos. La mayoría de las veces esto se resuelve de manera particular para cada configuración de robot, ya que no existen ecuaciones generales aplicables a todos ellos. [3]

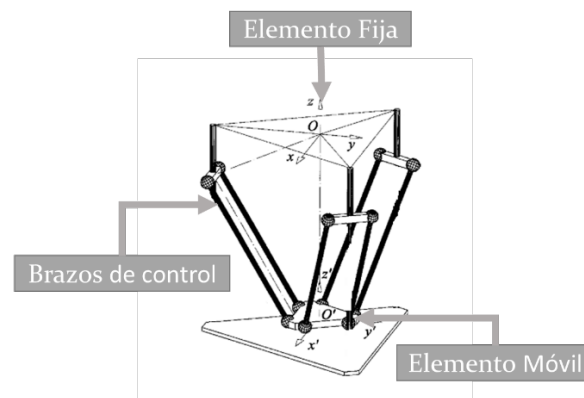


Figura 1 Esquema Robot Paralelo Tipo Delta [4].

4.4 Cinemática De Los Robots Paralelos

La cinemática estudia el movimiento de los robots respecto a un sistema de referencia, sin considerar las fuerzas que actúan sobre el sistema, sino únicamente la geometría estructural. La cinemática se divide en dos tipos: cinemática directa y cinemática inversa.

4.4.1 Cinemática Directa

Es una función vectorial que relaciona las coordenadas articulares con las coordenadas cartesianas (x,y,z) del robot, así como la orientación de la herramienta colocada en el extremo final, tomando en cuenta las propiedades geométricas del sistema mecánico del robot. **Figura 2** Ejemplo de solución para la cinemática Directa.

El propósito fundamental que juega la cinemática directa es computar la posición y orientación del extremo final del robot manipulador como una función de las variables articulares. [5]

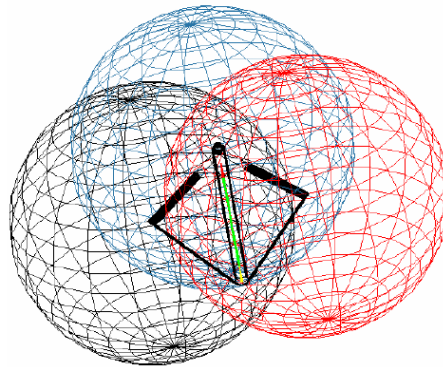


Figura 2 Ejemplo de solución para la cinemática Directa (software Matlab) [6]

4.4.2 Cinemática Inversa

La cinemática inversa relaciona las coordenadas articulares en función de las coordenadas cartesianas. Es la solución inversa a la cinemática directa mencionada con anterioridad; dada la posición cartesiana y la orientación de la herramienta colocada en el extremo final del robot, obtener los ángulos de las articulaciones. En la **Figura 3**. podemos observar las ocho posibles soluciones del problema cinemático inverso.

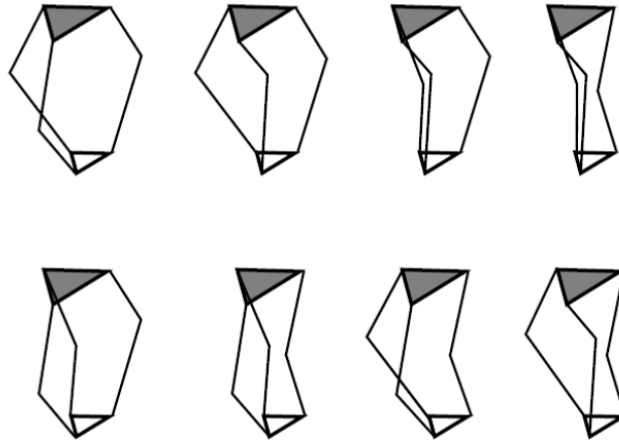


Figura 3 Ejemplo, de solución de cinemática inversa [6]

4.5 Espacio De Trabajo

El espacio de trabajo o campo de acción es el volumen espacial al que puede llegar el robot, es decir, la plataforma móvil del mecanismo paralelo tipo Delta. Este volumen está determinado por el tamaño, forma y tipo de eslabones que conforman el robot, así como las limitaciones de movimiento impuestas por el sistema de control. Entonces el robot debe diseñarse de modo que su espacio de trabajo le permita llegar a todos los puntos necesarios para llegar a cabo su tarea. [5]

El espacio de trabajo se puede subdividir en dos categorías:

- Espacio de trabajo alcanzable: Está compuesto por el conjunto de puntos alcanzables por el manipulador.
- Espacio de trabajo diestro: Está compuesto por el conjunto de puntos que el manipulador puede alcanzar con una orientación arbitraria de su efector final.

5 Metodología

La metodología de diseño para la elaboración de un Robot paralelo tipo Delta mediante el despliegue de la función de calidad (QFD), usada en el presente proyecto consiste en las siguientes fases (**Figura 4**):

- ❖ **Fase 1.:** Comprensión de la necesidad
- ❖ **Fase 2.:** Diseño conceptual.
- ❖ **Fase 3.:** Diseño de detalle.
- ❖ **Fase 4.:** Fabricación del prototipo físico del Robot paralelo tipo Delta.

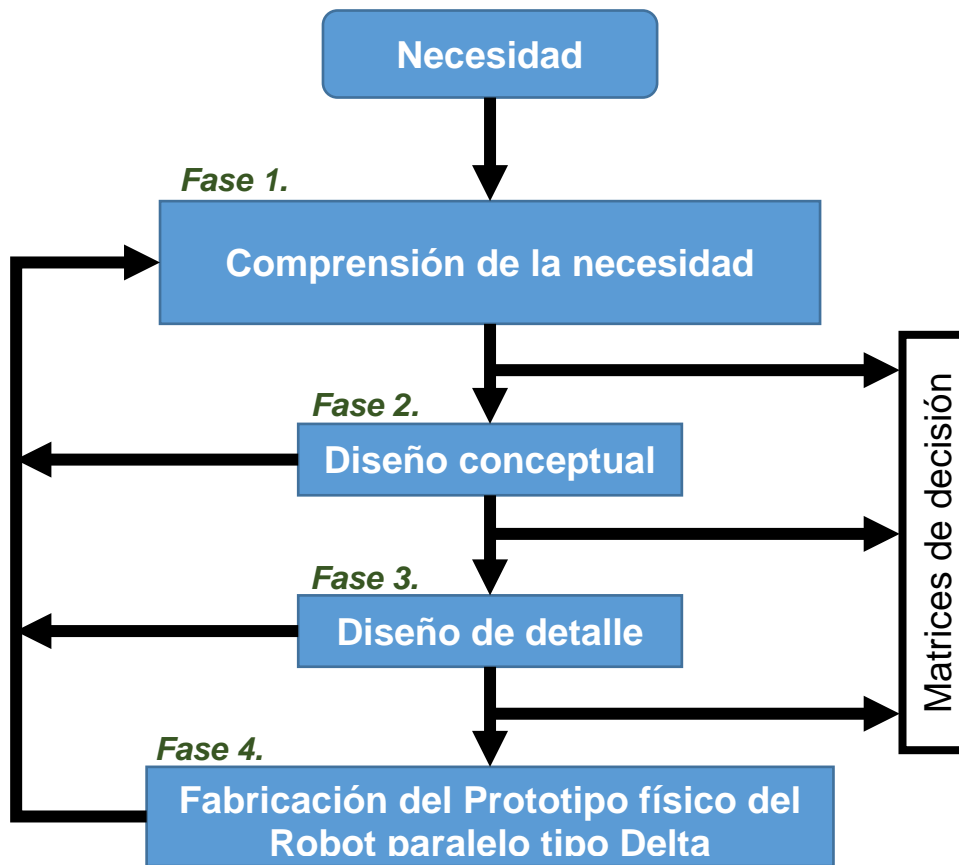


Figura 4 Diagrama de flujo para Metodología de Diseño

5.1 Fase 1. Comprensión de la necesidad.

La necesidad del presente proyecto consiste en; diseñar y construir un prototipo de Robot paralelo tipo Delta para estar al servicio de los estudiantes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Tecnológica proyecto curricular en Ingeniería Mecánica; en el cual se podrá acceder a una máquina prototipo de un robot paralelo tipo delta el cual ofrece la oportunidad de programar y simular actividades o tareas específicas presentes en la industria que beneficiará el óptimo aprendizaje así como la comprensión del papel que desempeñan los robot paralelos tipo delta en los procesos productivos .

5.2 Fase 2. Diseño conceptual

El prototipo de Robot paralelo tipo Delta fue desarrollado con un fin pedagógico, donado a las instalaciones de la Universidad Distrital sede tecnológica, donde se imparten conocimientos en el área de la robótica y control automatizado; debido a lo cual el prototipo obtenido va a apoyar este tipo de línea investigativa.

Por lo mencionado con anterioridad, fue consecuente que el prototipo de Robot paralelo tipo Delta no cumple con exigencias de índole industrial, fue construido con el propósito de ser una herramienta educativa y didáctica, por otra parte, los materiales utilizados son menos resistentes con respecto a los materiales que se utilizan para un Robot industria. A continuación, se observan los requerimientos del cliente y requerimientos de diseño propuestos por el cliente en esta ocasión puntual los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Distrital ver **Tabla 1**. Posteriormente se desarrolló la casa de las calidades QFD la cual arrojó la ponderación de varios atributos de los cuales se seleccionaron los más relevantes para el diseño del Robot paralelo tipo Delta.

CLASIFICACIÓN	REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE		REQUERIMIENTOS DE DISEÑO
Funcional	1	Fácil operación	Costo
	2	Fácil instalación	Precisión
	3	Fácil ensamble	Durable
	4	Fácil calibración	Robusto
Físico	5	Resistencia ante cargas requeridas	Facilidad de uso
	6	Resistencia al medio ambiente	Seguridad
	7	Área de trabajo amplia	Diseño estético
Ergonómicos	8	Fácil portabilidad	Facilidad de mantenimiento
	9	Robusto	Velocidad
Confiabilidad	10	Seguro	Peso
	11	Vida útil prolongada	Escalabilidad
	12	Fácil mantenimiento	Fácil ensamblaje
Económicos	13	Menor costo de fabricación	Fácil fabricación
	14	Repuestos económicos	Programable
	15	Bajo consumo de energía	Materiales

Tabla 1 Listado de requerimientos del cliente y requerimientos de diseño.

5.3 Casa de las calidades (QFD).

Ahora bien, con el listado de requerimientos del cliente y requerimientos de diseño **Tabla 1**, se procede a desarrollar la casa de las calidades o QFD (Quality Function Deployment) **Tabla 2**, a través del cual se puede hacer una evaluación que arroje como resultado un nivel de cumplimiento de las necesidades planteadas por el cliente con respecto a los requerimientos de diseño.

ITM	Max. valor de relación	Importancia relativa	Importancia	Requerimientos del cliente	Requerimientos de diseño	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	9	4,4	2,5	Fácil operación	Costo	▲	▲	▲		⊖	▲		⊖	▲	⊖	○	○	○	○	⊖
2	9	4,4	2,5	Fácil instalación	Precisión	▲	▲	▲	▲	⊖	○		○		⊖	○	○	⊖		⊖
3	9	13,2	7,5	Fácil ensamble	Durable	○		▲	○	⊖	○	▲	⊖		⊖	○	○	⊖		⊖
4	9	1,8	1,0	Fácil calibración	Robusto	○	⊖		▲				○	⊖			○	○	⊖	▲
5	9	3,5	2,0	Resistencia ante cargas requeridas	Facilidad de uso	⊖	▲	⊖	○		⊖		▲		⊖	⊖	○	○		⊖
6	9	17,5	10,0	Resistencia al medio ambiente	Seguridad	⊖		⊖	▲		○	⊖	○		○		○	○		⊖
7	9	4,4	2,5	Área de trabajo amplia	Diseño estético	⊖			▲	▲	▲				▲	○		○		▲
8	9	1,8	1,0	Fácil portabilidad	Facilidad de mantenimiento	⊖		○	⊖	○		▲			⊖	⊖	○	○	○	⊖
9	9	1,8	1,0	Robusto	Velocidad	○			⊖	○	▲	▲		▲	○			○		⊖
10	9	3,5	2,0	Seguro	Peso	○		▲		○	⊖		○	⊖	○	○	○	○	○	⊖
11	9	5,3	3,0	Vida útil prolongada	Escalabilidad	⊖		⊖	▲		▲	○	○	○	○	○		○		⊖
12	9	7,0	4,0	Fácil mantenimiento	Fácil ensamblaje	⊖		▲	▲	○	○		⊖	⊖			⊖	○	○	⊖
13	9	8,8	5,0	Menor costo de fabricación	Fácil fabricación	⊖	▲	▲	▲	○	▲	⊖	⊖	⊖	⊖		⊖	▲		⊖
14	9	10,5	6,0	Repuestos económicos	Programable	⊖			○	○	▲	▲	⊖	⊖	⊖			▲		⊖
15	9	12,3	7,0	Bajo consumo de energía	Materiales	⊖			▲	○			○	⊖	⊖		⊖	▲		⊖
					Dificultad (0=Fácil de lograr, 10=Extremadamente difícil)	5	9	3	4	6	6	7	6	9	6	7	5	3	9	4
					Max Valor de relación en columna	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
					Importancia	314,0	28,1	220,2	107,9	224,6	178,9	174,6	243,0	53,5	333,3	136,8	255,3	273,7	44,7	456,1
					Peso Relativo	10,3	0,9	7,2	3,5	7,4	5,9	5,7	8,0	1,8	10,9	4,5	8,4	9,0	1,5	15,1

Tabla 2 Matriz casa de las calidades

Con la matriz anterior, se evidencia la importancia de los requerimientos de diseño correspondientes a: los materiales, el peso, el costo y fácil fabricación. Variables de vital importancia para el diseño detallado del prototipo.

En la **Tabla 2** se puede apreciar la matriz de correlación que forma el techo de la casa de calidad, en donde se valoran los requerimientos de diseño con el objetivo de buscar contrariedades o implicaciones bien sea positivas o negativas que determinaron el diseño final del prototipo de Robot paralelo tipo Delta.

5.4 Generación de conceptos.

La generación de conceptos se realiza con el fin de establecer soluciones al proyecto, partiendo de la información obtenida con anterioridad (ver **Tabla 1** y **Tabla 2**), se procede a plantear las diferentes alternativas posibles, tales que cumplan con: la necesidad, los requerimientos del cliente y especificaciones de diseño planteadas. A continuación, se desglosan diferentes alternativas en la escogencia de accesorios, así como diseño de partes a fabricar que hacen parte de la constitución estructural del prototipo de robot paralelo tipo delta que servirán como base fundamental para la escogencia de la mejor solución de diseño y construcción de la máquina prototipo.

La máquina prototipo de un Robot paralelo tipo Delta, está estructurada por cuatro subsistemas que lo integran:

1. Subsistema movimiento y control.
2. Subsistema brazos de control.
3. Subsistema uniones o juntas.
4. Subsistema estructura soporte.

Para la escogencia de accesorios y diseño de componentes que conforman la máquina prototipo se utiliza el método matriz de selección, colocando a discusión las características de cada elemento, se toma una escala de 1 a 5, siendo 3 el valor medio de referencia para calificar cada característica proporcionando así el elemento más íntegro, que debe desarrollarse para que haga parte de la máquina prototipo de un robot paralelo tipo delta.

5.4.1 Subsistema movimiento y control

5.4.1.1 Motores

El movimiento del Robot paralelo tipo Delta está relacionado directamente a la buena selección de los motores. Se evalúan las siguientes tres opciones de motores comerciales (ver **Tabla 3** y **Tabla 4**) para seleccionar el tipo de motor más capacitado para satisfacer la necesidad del proyecto.

MOTORES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
 <p>Figura 5 Motor DC Tomado de, www.mechatronicstore</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Más precisión. • Más velocidad. • Movimiento más suave. • No hay pérdida de pasos. • Mejor rendimiento. • Asequible. 	<ul style="list-style-type: none"> • Complejidad del control. • Escobillas. • Emite chispas. • Vibraciones mecánicas.
 <p>Figura 6 Motor paso a paso Tomado de, BricoGeek.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> • No necesitan realimentación. • Asequible. • Fácil Control. • No necesitan escobillas. • Buen control de velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor consumo de energía. • Discontinuidad de velocidad. A bajas Velocidades. • Pérdida de pasos. • Resonancias mecánicas. • Rendimiento menor.
 <p>Figura 7 Servomotor Tomado de, www.chd.hk</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mucho torque. • Menor tamaño. • Requiere poco consumo de energía. • Mayor precisión. • Fácil de controlar. 	<ul style="list-style-type: none"> • No es posible cambiar las características eléctricas del motor. • No se puede cambiar la velocidad. • Está limitado por el circuito de control a únicamente variar de 0° a 180°. • Poco comercial.

Tabla 3 Motores ventajas y desventajas.

Motores Matriz de Selección							
		Concepto No. 1		Concepto No. 2		Concepto No. 3	
		Motor DC		Motor Paso a Paso		Servomotor	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Velocidad	15%	5	0,75	5	0,75	3	0,45
Control	30%	3	0,9	4	1,2	5	1,5
Fuerza	25%	2	0,5	3	0,75	5	1,25
Precisión	20%	2	0,4	3	0,6	5	1
Consumo	10%	3	0,3	2	0,2	4	0,4
Total		2,85		3,5		4,6	
Lugar		3		2		1	
Seleccionar		No		No		Si	

Tabla 4 Motores matriz de selección

5.4.1.1.1 Controlador

La forma básica de controlar el movimiento de los servomotores y el sistema empleado depende principalmente de la necesidad, así como la posibilidad de adquisición. Se expone a continuación **Tabla 5** tres tipos de controladores donde se seleccionó el más indicado.




CONTROLADORES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
 <p>Figura 8 Controlador específico JOYSTICK S310182</p> <p>Tomado de, www.superrobotica.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> • El controlador es una unidad muy compacta. • Permiten mover uno o dos servos de forma manual. • El circuito es capaz de controlar todo tipo de servos estándar. • La alimentación del circuito y los servos se puede realizar con cualquier fuente entre 4 y 6 Voltios. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se utilizan de forma concreta o para una aplicación específica. • Movimientos únicamente en X y Y con una palanca tipo joystick. • Únicamente se pueden manipular dos servomotores.
 <p>Figura 9 Microcontrolador Arduino Uno</p> <p>Tomado de, www.iescamp.es</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Simplifica el proceso de trabajar con microcontroladores. • Las placas Arduino son más accesibles comparadas con otras. • El entorno de programación de Arduino es fácil de usar para principiantes. • El software Arduino es de distribución de licencia libre. 	<ul style="list-style-type: none"> • El hecho de que la plataforma venga ya ensamblada les quita flexibilidad a los proyectos. • Se obliga a usar un espacio y forma acorde con el PCB del Arduino,
 <p>Figura 10 Microcontrolador OpenCm.</p> <p>Tomado de, www.superrobotica.com</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Programación similar al Arduino. • Es un producto económico. • Alta velocidad de comunicación puede alcanzar los 4Mbps. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es robusto. • Es un producto exclusivo para el control de motores de la misma marca.

Tabla 5 Controladores ventajas y desventajas.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas **Tabla 5** para cada opción, se estableció cinco criterios a través de los cuales se realizó una evaluación de la selección del tipo de controlador usado.

Matriz de Selección del Controlador							
		Concepto No. 1		Concepto No. 2		Concepto No. 3	
		Controlador específico JOYSTICK S310182		Microcontrolador Arduino Uno		Microcontrolador OpenCm.	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Costo	25%	2	0,5	3	0,75	3	0,75
Consumo	10%	4	0,4	4	0,4	4	0,4
Programación	25%	3	0,75	4	1	4	1
Cantidad control servomotores	35%	2	0,7	4	1,4	3	1,05
Robusto	5%	3	0,15	4	0,2	4	0,2
Total		2,5		3,8		3,4	
Lugar		3		1		2	
Seleccionar		No		Si		No	

Tabla 6 Matriz de Selección del Controlador

5.4.1.2 Subsistema brazos de control.

El mecanismo de brazos de control para el Robot paralelo tipo Delta se evalúa en dos opciones (ver **Tabla 7 y Tabla 8**) de configuración que corresponden a un sistema con desplazamiento lineal y un sistema con actuadores rotacionales.

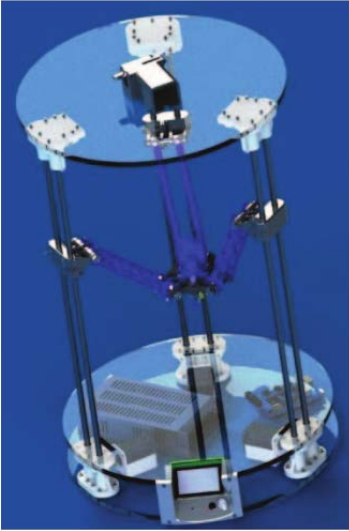

BRAZOS DE CONTROL	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Sistema con desplazamiento lineal</p>  <p>Figura 11 Prototipo de una impresora 3D implementado mediante un Robot Delta [7]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Buena trayectoria de precisión. • Ensamble simple. • Movimientos suaves. • Mayor volumen de trabajo. • Operación en eje Z limitado por la longitud de los actuadores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta inercia • El sistema de movimiento está compuesto por una gran cantidad de partes. • Estructura de gran altura. • Mayor costo.
<p>Sistema con actuadores rotacionales</p>  <p>Figura 12 Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB) [6]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Los enlaces son accionados directamente. • Baja inercia. • Ocupa menos espacio. • Puede ser instalado sobre pedestales en su zona superior. • Mucho más veloz. • Mayor facilidad en el mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pobre trayectoria de precisión. • Requiere motores de mayor resolución. • Cinemática compleja.

Tabla 7 Brazos de control ventajas y desventajas.

Matriz Selección brazos de control					
		Concepto No. 1		Concepto No. 2	
		Sistema con desplazamiento lineal		Sistema con actuadores rotacionales	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Costo	25%	2	0.5	4	1
Preciso	15%	4	0.6	3	0.45
Robusto	20%	2	0.4	4	0.8
Seguro	10%	4	0.4	3	0.3
Velocidad	15%	3	0.45	4	0.6
Flexibilidad	15%	3	0.45	4	0.6
Total		2,3		2,8	
Lugar		2		1	
Seleccionar		No		Si	

Tabla 8 Matriz de Selección brazos de control

5.4.1.3 Selección de materia para los brazos de control.

El proceso de selección de material para los enlaces mecánicos que conectan la base fija a la base móvil tendrán solo tres opciones básicas comunes en el mercado local: el acero al carbón, el acero inoxidable y el aluminio (ver **Tabla 9**). Además de si usar sección transversal sólida o hueca **Tabla 10**.

Matriz de Selección - Material para los brazos de control							
		Concepto No. 1		Concepto No. 2		Concepto No. 3	
		Acero al carbón		Acero Inoxidable		Aluminio 6063	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Peso	20%	3	0.6	5	1	3	0.6
Resistencia	15%	4	0.6	3	0.45	5	0.75
Maquinabilidad	20%	4	0.8	4	0.8	3	0.6
Corrosión	25%	1	0.25	5	1.25	5	1.25
Costo	20%	5	1	2	0.4	4	0.8
Total		3.25		3.9		4	
Lugar		3		2		1	
Seleccionar		No		No		Si	

Tabla 9 Matriz de Selección - Material para los brazos de control.

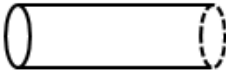
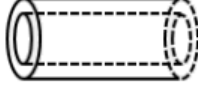

Matriz Selección sección transversal					
		Concepto No. 1		Concepto No. 2	
		Sección maciza 		Sección hueca 	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Peso	30%	3	0.9	5	1.5
Resistencia	20%	4	0.8	2	0.4
Rigidez	20%	4	0.8	2	0.4
Costo	30%	4	1.2	3	0.9
Total		2,8		1,7	
Lugar		1		2	
Seleccionar		Si		No	

Tabla 10 Matriz Selección sección transversal.

Se seleccionan varillas en aluminio 6063 para los enlaces mecánicos. Las barras sólidas son superiores a tubos huecos en términos de resistencia y rigidez debido a su área de sección transversal alta.

5.4.1.4 Subsistema uniones o juntas.

Los uniones o juntas para la máquina prototipo deben ser rótulas esféricas o articulaciones las cuales permite un relativo movimiento dentro de cierto ángulo para los brazos de control. A continuación, examinaremos tres tipos de juntas compatibles con la necesidad del proyecto.

UNIONES O JUNTAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Junta universal  Figura 13 Junta universal Tomado de, CCS Máquinas	<ul style="list-style-type: none"> • Posee dos grados de libertad. • Capacidad para operar con un grado alto grado de desalineación. • Larga vida útil. • Necesita un mínimo de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran cantidad de piezas móviles. • Causan reacciones violentas, cuando experimentan cambios en la dirección. • Presenta oscilación en la velocidad de salida

 <p>Figura 14 Rótula esférica Tomado de, Industrial – Cotanet</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene tres grados de libertad. • Las articulaciones esféricas son más precisas que las juntas universales • Tienen menos partes móviles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Son propensas al desgaste por fricción. • Rango de movimiento limitado.
 <p>Figura 15 Junta de bola magnética Tomado de, Hilan [8]</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene tres grados de libertad. • Las juntas esféricas magnéticas son superiores a las tradicionales articulaciones esféricas en términos de precisión, desgaste y rango de movimiento, 	<ul style="list-style-type: none"> • Son costosas y poco comerciales.

Tabla 11 Uniones o juntas ventajas y desventajas

Matriz Selección - Uniones o juntas							
		Concepto No. 1		Concepto No. 2		Concepto No. 3	
		Junta universal		Rótula esférica		Junta de bola magnética	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Precisión	20%	2	0.4	4	0.8	5	1
Costo	30%	5	1.5	5	1.5	2	0.6
Rango de movimiento	25%	2	0.5	4	1	5	1.25
Fácil ensamble	15%	4	0.6	4	0.6	3	0.45
Durabilidad	10%	4	0.4	4	0.4	4	0.4
Total		3.4		4.3		3,7	
Lugar		3		1		2	
Seleccionar		No		Si		No	


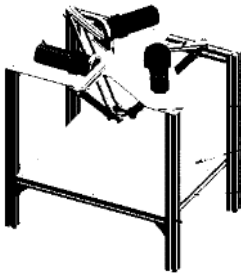
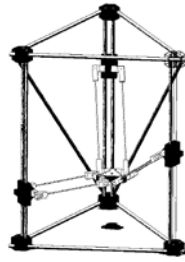
Tabla 12 Matriz selección - Uniones o juntas

Matriz Selección sección transversal y material											
		Concepto No. 1		Concepto No. 2		Concepto No. 3		Concepto No. 4		Concepto No. 5	
		Tubo cuadrado acero al carbón		Tubo redondo acero al carbón		Tubo cuadrado acero inoxidable		Tubo redondo acero inoxidable		Aluminio T-slot extruido	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Costo	30%	5	1,5	5	1,5	3	0,9	3	0,9	1	0,3
Rigidez	20%	4	0,8	4	0,8	4	0,8	4	0,8	4	0,8
Soldabilidad	20%	5	1	5	1	3	0,6	3	0,6	1	0,2
Ajustabilidad	20%	4	0,8	3	0,6	3	0,6	3	0,6	5	1
Resistencia a corrosión	10%	2	0,2	2	0,2	5	0,5	5	0,5	5	0,5
Total		4,3		4,1		3,4		3,4		2,8	
Lugar		1		2		3		4		5	
Seleccionar		Si		No		No		No		No	

Tabla 12 Matriz Selección sección transversal y material.

5.4.1.5 Subsistema estructura de soporte.

La Máquina prototipo de un Robot paralelo tipo Delta requiere de una estructura soporte adecuada para la ubicación de motores, accesorios y partes a continuación se seleccionará material **Tabla 13** además de la forma estructural **Tabla 14**.

Matriz Selección - Forma estructural							
		Concepto No. 1		Concepto No. 2		Concepto No. 3	
		 Tomado de, www.electronics-lab.com		 Tomado de, www.ieeeexplore.ieee.org		 Tomado de, www.marginallyclever.com	
Criterio de selección	Peso	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada	Valor	Evaluación ponderada
Fácil Construcción	20%	5	1	3	0,6	3	0,6
Estructura estable	20%	5	1	5	1	5	1
Peso	20%	5	1	2	0,4	3	0,6
Robustez	20%	4	0,8	5	1	4	0,8

Costo	20%	4	0,8	2	0,4	2	0,4
Total		4,6		3,4		3,4	
Lugar		3		2		1	
Seleccionar		Si		No		No	

Tabla 13 Matriz Selección - Forma estructural

A continuación, se resumen los diversos conceptos seleccionados gracias a las anteriores matrices de selección para las necesidades requeridas para cada subsistema que conforma a la máquina prototipo de un Robot paralelo tipo Delta.

Resumen - Selección final	
Subestima	Concepto Seleccionado
<i>Subsistema movimiento y control.</i>	El movimiento de la máquina prototipo será proporcionada por tres servomotores y controlados por una placa Arduino UNO.
<i>Subsistema brazos de control.</i>	Los brazos de control serán fabricados en barra maciza de acero Inoxidable.
<i>Subsistema uniones o juntas.</i>	Las uniones de transmisión de movimiento se harán por medio de Rótulas esféricas.
<i>Subsistema estructura de soporte.</i>	La estructura de soporte deberá ser construida en tubo cuadrado de acero al carbón con un recubrimiento anticorrosivo y pintura en esmalte.

Tabla 14 Resumen - Selección final

5.5 Fase 3: Diseño de detalle.

5.5.1 Modelo general para el prototipo de robot paralelo tipo delta

Partiendo de la metodología de diseño realizada con anterioridad, se procede a modelar cada parte o pieza del Robot paralelo tipo Delta, obteniendo así las variables generales que serán base fundamental para el desarrollo de la cinemática directa como lo ilustra la **Figura 16**. Las longitudes de los eslabones fueron determinadas por medio valores acordes a satisfacer el volumen de trabajo para un cilindro seleccionado de un diámetro de $\varnothing 150$ mm y una altura de 300 mm.

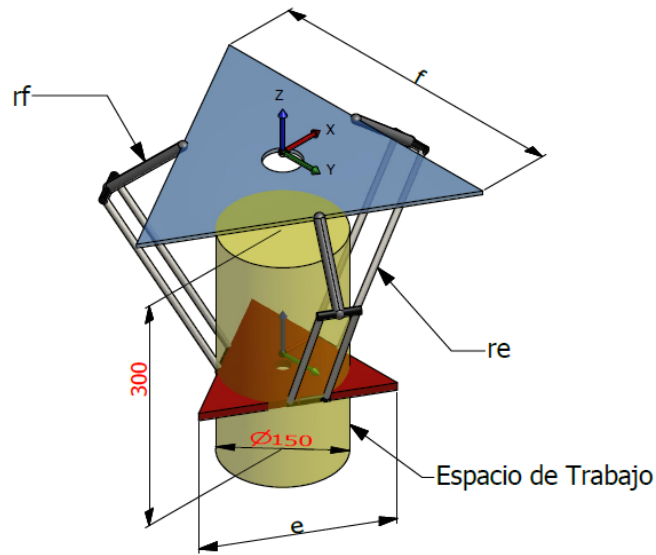


Figura 16 Diagrama general del Robot paralelo tipo Delta. – **Fuente**, propia.

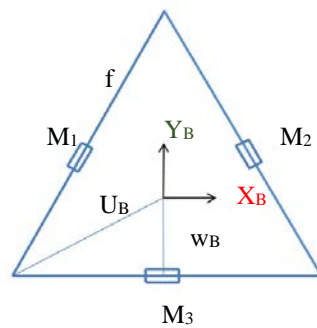


Figura 17 Detalles de la base fija del Robot paralelo tipo Delta. [9]

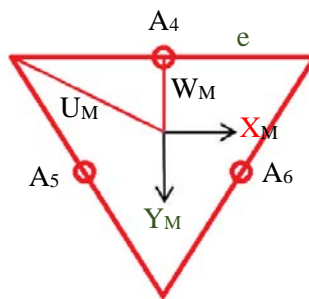


Figura 18 Detalles de la base móvil del Robot paralelo tipo Delta. [9]

Las dimensiones propuestas para el diseño estructural del Robot paralelo tipo Delta son calculadas por medio un análisis geométrico **Figura 19**:

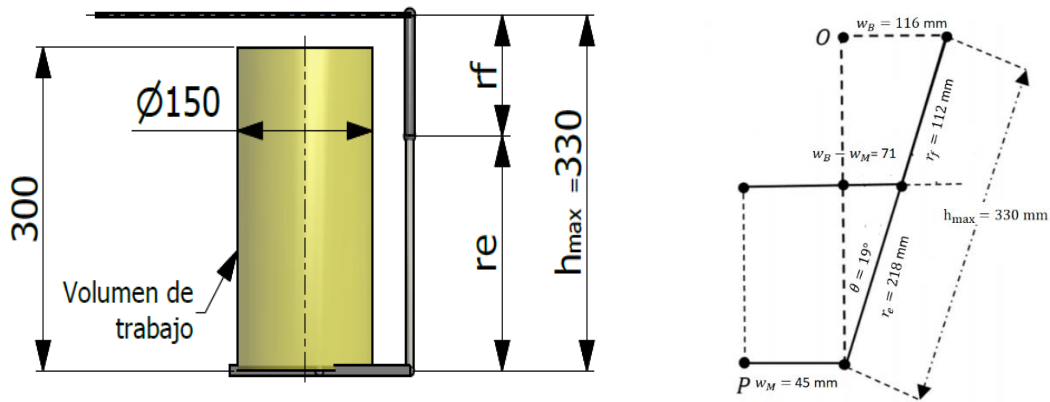


Figura 19 Dimensiones geométricas

Descripción	Justificación	Valor
Altura máxima propuesta	$h_{max} = r_f + r_e$	330 mm
Dimensiones de los brazos	$\frac{1}{2}r_f \leq r_e \leq \frac{3}{4}r_f$	rf 112 mm
		re 218 mm
Dimensión propuesta para la base fija	$w_B = 75 \text{ mm} \leq r_e \leq 150 \text{ mm}$	116 mm
Dimensión mínima para base móvil	$\theta = \tan^{-1}(w_B/h_{max}) = 19^\circ$	66 mm
	$w_B - w_M = \left(\frac{r_e}{\sin 90}\right) \sin \theta = 71 \text{ mm}$	
	$w_M = w_B - 71 = 45 \text{ mm}$	
	Por criterios de fabricación el valor de w_M aumenta a 66 mm	
f	$f = \left(\frac{w_B}{\frac{\sqrt{3}}{6}}\right)$	402 mm
e	$e = \left(\frac{w_M}{\frac{\sqrt{3}}{6}}\right)$	229 mm
U_B	$w_B = \frac{\sqrt{3}}{3} f$	232 mm
U_M	$w_B = \frac{\sqrt{3}}{3} e$	133 mm

Tabla 15 Dimensiones geométricas para el Robot paralelo tipo Delta.

5.5.1.1 Movilidad

Para calcular la movilidad del Robot paralelo tipo Delta y determinar el número de grados de libertad, se recurre a la **Ecuación 1** de movilidad espacial de Kutzbach-Gruebler. [9]

$$M = 6(N - 1) - 5J_1 - 4J_2 - 3J_3C$$

Ecuación 1

Siendo:

- **M**, Movilidad (Número de grados de libertad GDL).
- **N**, Número total de eslabones.
- **J₁**, Número de articulaciones de 1 grado de libertad.
- **J₂**, Número de articulaciones de 2 grados de libertad.
- **J₃**, Número de articulaciones de 3 grados de libertad.

Eslabones, Debido a que el diseño de Robot paralelo tipo Delta seleccionado para ser desarrollado en el presente proyecto, tienen tres mecanismos de seis barras paralelas, al quitar una barra en cada mecanismo, la cinemática del robot funcionaría de manera idéntica, y se produce una simplificación del concepto como se muestra la **Figura 20**.

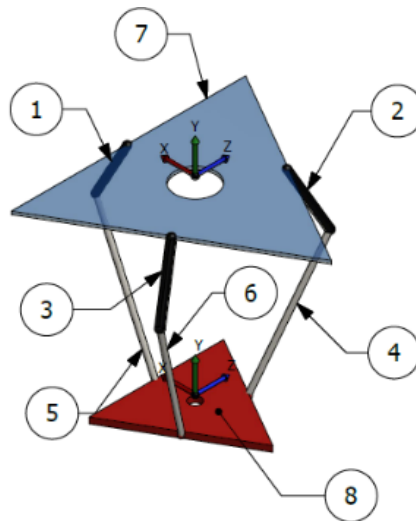


Figura 20 Diagrama simplificado, eslabones del Robot paralelo tipo Delta. –
Fuente, propia

Articulaciones, M1, M2 y M3 son los puntos donde se articulan los brazos superiores mediante tres servomotores. Los brazos inferiores se conectan a los brazos superiores mediante articulaciones tipo rótula cilíndrica a si mismo los brazos inferiores con la base móvil (ver **figura 21**). Las rótulas cilíndricas poseen 3GDL pero en este caso en específico solo podrá tener movilidad en los ejes X, Y la rotación

radial está restringida por la ubicación de los brazos de control; por lo tanto las articulaciones quedan con una movilidad de 2 GDL.

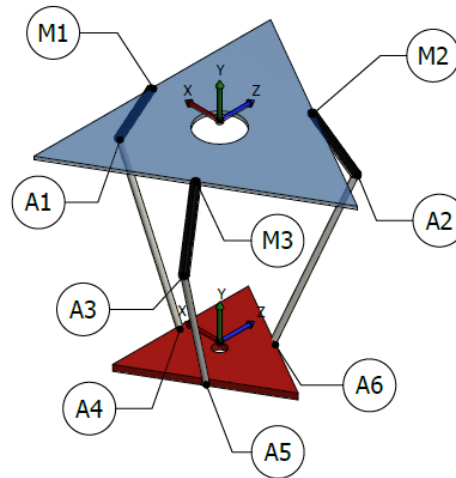


Figura 21 Diagrama simplificado, articulaciones del Robot paralelo tipo Delta. –
Fuente, propia.

Con los anteriores datos se remplaza en la **Ecuación 1** para obtener los grados de libertad del Robot paralelo tipo Delta.

- **M**, Movilidad (Número de grados de libertad GDL)
- **N** = 8
- **J₁** = 3
- **J₂** = 6
- **J₃** = 0

Ecuación 1

$$M = 6(8 - 1) - 5(3) - 4(6) - 3(0)$$

$$M = 3 \text{ Grados de libertad}$$

Fuente: Elaboración propia.

5.5.2 Diseño de subsistema movimiento y control

5.5.2.1 Selección de motores.

Teniendo en cuenta la matriz de selección **Tabla 3** y **Tabla 4**, se descartaron los motores DC y motores paso a paso, pero se escoge el motor de tipo Servomotor el cual es un dispositivo pequeño que tiene un eje de giro controlado. Este puede ser girado a posiciones angulares específicas, al enviar una señal codificada. Al no existir una señal codificada de entrada el servomotor mantendrá su posición angular sin tener una reacción en el engranaje.

El servomotor adquirido es el Analog Servo – 1501MG marca Power HD, que es el disponible en el mercado local y se ajusta al presupuesto **Figura 22**.



Figura 22 Analog Servo – 1501MG Tomado de, www.tdrobotica.co

Características:

- **Rango de operación DC:** 4.8 ~ 6.0 V
- **Torque (4.8V):** 1.52 Nm
- **Torque (6.0V):** 1.66 Nm
- **Velocidad (4.8V):** 0.16 s
- **Velocidad (6.0V):** 0.14 s
- **Intensidad eléctrica:** 500 mA
- **Peso:** 63.0 g
- **Tipo de rodamiento:** Rodamiento de bola
- **Tipo de Motor:** Motor DC
- **Tipo de engranaje:** Metálico
- **Temperatura de operación:** -20 °C~60 °C
- **Frecuencia de trabajo:** 1520 μ Hz / 50 Hz

Análisis para determinar el torque requerido para mover los elementos que conforma el sistema de robot paralelo tipo delta **Tabla 17**.

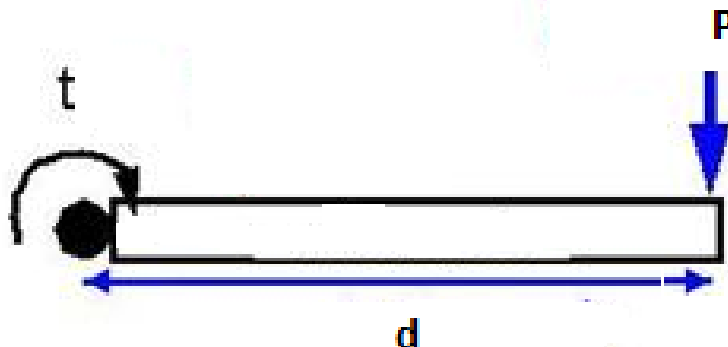


Figura 23 Diagrama torque servomotor

Descripción	Ecuación	Valor
d: Distancia	N/A	0.112 m
m: masa del sistema	N/A	1.5 kg
P: Fuerza	$P = m * a$ $P = 1.5 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2$ $= 14.7 \text{ N}$	14.7 N
τ : Torque	$\tau = P * r$ $\tau = 14.7 \text{ N} * 0.112 \text{ m} =$	1.64 Nm
Observación: El torque calculado es 1.64 Nm, como se usó tres servomotores el torque se reparte en cada servomotor de marca 1501MG .		

Tabla 16 Análisis torque requerido

5.5.2.2 Control

El sistema de control escogido para los tres servomotores es la placa Arduino UNO. Es una placa electrónica basada en el microcontrolador ATmega328. El cual cuenta con:

- 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM (Modulación por ancho de pulsos) y otras 6 son entradas analógicas.
- Incluye un resonador cerámico de 16 MHz.
- Un conector USB.
- Un conector de alimentación.
- Una cabecera ICSP.
- Un botón de reseteo.

Basta conectarla a un ordenador con un cable USB o a la corriente eléctrica a través de un transformador a 5V para energizar. En la **Figura 24** se observa el modo de conexión básico para tres servomotores a la placa Arduino UNO con fuente externa.

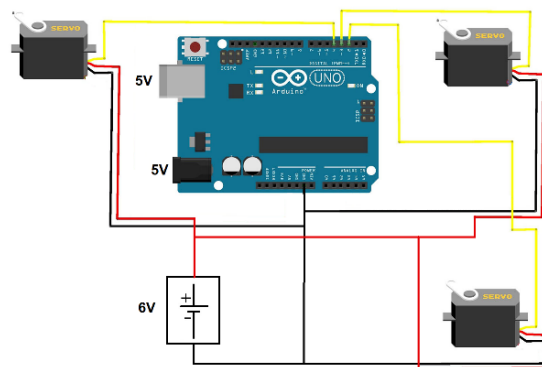


Figura 24 Modo de conexión básico para tres servomotores.

Fuente, androminarobot.blogspot.com

5.5.3 Diseño subsistema brazos de control.

En primer lugar, se detalla el diseño de los brazos superiores (ver **Figura 26**), quienes se conectan al servo motor, por medio de un acople mecánico especial. La longitud de los brazos superiores se determinó en la **Tabla 16** donde se puede apreciar que la longitud para el eslabón.

Análisis de esfuerzo y deformación para determinar dimensión de sección para los brazos superiores **Tabla 18**, material seleccionado aluminio 606 (ver **Tabla 9** y **Tabla 10**).

Nombre del material: Aluminio 6063
 Densidad: 2700 kg/m³
 Módulo de Young: 68.9 GPa
 Proporción de Poisson: 0.33
 Tensión de fluencia: 48.3 MPa
 Tensión de rotura: 89.6 MPa

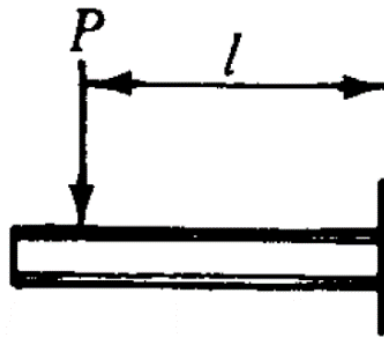


Figura 25 Tipo de carga fuente, Mecánica de los materiales James M.

Donde:

Descripción	Ecuación	Valor
L: Longitud del eslabón	N/A	112 mm
m: Masa requerida a soportar	N/A	1 kg
P: Fuerza	$P = m * a$ $P = 1 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 = 9.8 \text{ N}$	9.8 N
M: Momento	$M = P * L$ $M = 9.8 \text{ N} * 0.112 \text{ m} = 1.09 \text{ Nm}$	1.09 Nm
S: Tensión de fluencia para el aluminio 6063	$S = \frac{M}{Z} = 48.3 \text{ MPa}$	48.3 MPa

Z: Modulo de sección	$Z = \frac{M}{S}$ $Z = \frac{1.09 \text{ Nm}}{48.3 \text{ MPa}} = 0.022e^{-6} \text{ m}^3$	0.022e ⁻⁶ m ³
a: lado de una sección cuadrada	$a = \sqrt[3]{6 * 0.022e^{-6} \text{ m}^3}$ $= 5.09e^{-3} \text{ m}$	5.09 mm
Observación: se analizó el brazo superior como una viga en voladizo a flexión arrojando una sección cuadrada que es más fácil de mecanizar para lo requerido en esta ocasión. La dimensión seleccionada es 12.7 mm la cual es la mediada comercial más asequible.		12.7 mm

Tabla 17 Dimensión de sección para los brazos superiores

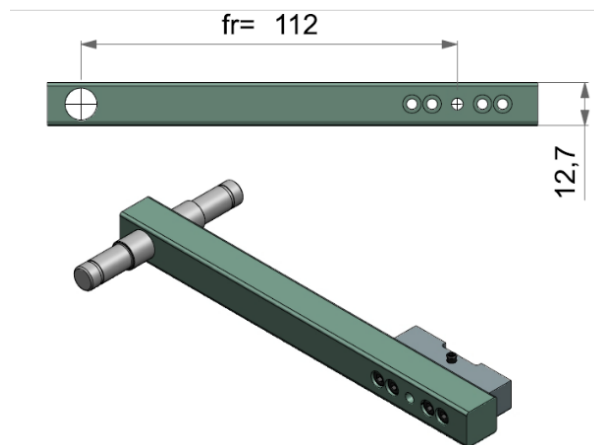


Figura 26 Diseño y ensamble para los brazos superiores. - **Fuente**, software NX.

Los brazos inferiores, corresponden a seis barras paralelas separadas en tres pares. Mecanizadas en aluminio 6063 como se determinó en las matrices de sección (ver **Tabla 9** y **Tabla 10**).

Los brazos inferiores se han diseñado bajo la concepción de articular cada extremo mediante rótulas esféricas como lo solicita la **Tabla 12**. Su adaptación a los brazos superiores y el efector final o base móvil es por medio de ejes transversales para conjunto de brazos, **Figura 28**.

Análisis de esfuerzo y deformación para determinar dimensión de sección para los brazos Inferiores.

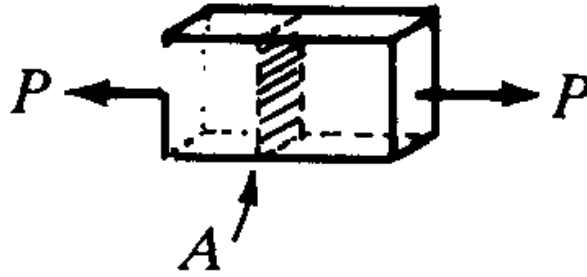


Figura 27 Tipo de carga **fuerza**, Mecánica de los materiales James M.

Nombre del material: Aluminio 6063
 Densidad: 2700 kg/m³
 Módulo de Young: 68.9 GPa
 Proporción de Poisson: 0.33
 Tensión de fluencia: 48.3 MPa
 Tensión de rotura: 89.6 MPa

Descripción	Ecuación	Valor
P: Fuerza	$P = m * a$ $P = 1 \text{ kg} * 9.8 \text{ m/s}^2 = 9.8 \text{ N}$	9.8 N
S: Tensión de fluencia para el aluminio 6063	$S = \frac{P}{A} = 48.3 \text{ MPa}$	48.3 MPa
A: Área de sección transversal	$A = \frac{P}{S}$ $A = \frac{9.8 \text{ N}}{48.3 \text{ MPa}} = 0.202 \text{ e}^{-6} \text{ m}^2$	0.202 e ⁻⁶ m ²
d: Diámetro	$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$ $d = \sqrt{\frac{4 * 0.202 \text{ e}^{-6} \text{ m}^2}{\pi}} = 0.508 \text{ e}^{-3} \text{ m}$	0.508 mm
Observación: se analizó el brazo inferior como una barra maciza a tensión la sección debió ser circular porque es más fácil de mecanizar para lo requerido en esta ocasión La dimensión seleccionada Ø9.5 mm la cual es la mediada comercial más asequible.		Ø9.5 mm

Tabla 18 Dimensión de sección para los brazos inferiores

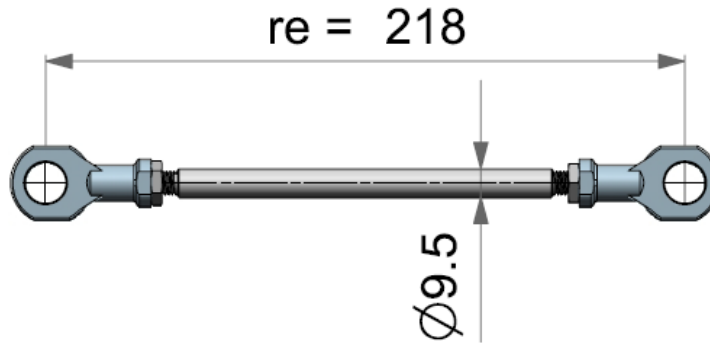


Figura 28 Diseño y ensamble para los brazos inferiores. - **Fuente**, software NX.

5.5.4 Diseño base móvil.

La base móvil **Figura 29** es el elemento que se ubica en la posición deseada en la cual se pueden instalar gran variedad de herramientas para realizar tareas específicas. La base móvil se diseñó con las dimensiones requeridas, ver **Tabla 16**. El proceso de mecanizado fue por corte laser para poder figurar la base móvil con el menor peso posible en Acero ASTM A36.

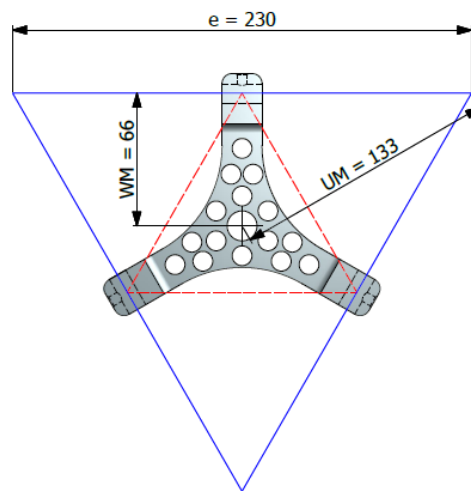


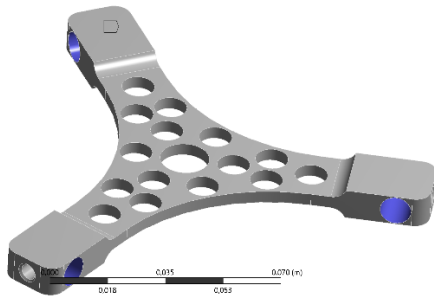
Figura 29 Modelado base móvil - **Fuente**, software NX.

Para verificar que la geometría dada al elemento base móvil es adecuado, para soportar la carga de trabajo se realizó al modelo CAD un análisis por elementos finitos con el software ANSYS donde no presento deformaciones significativas.

Nombre del material:	ASTM A36
Densidad:	7800 kg m ³
Módulo de Young:	200 GPa
Proporción de Poisson:	0.26
Tensión de fluencia:	250 MPa
Tensión de rotura:	400 MPa

Restricción

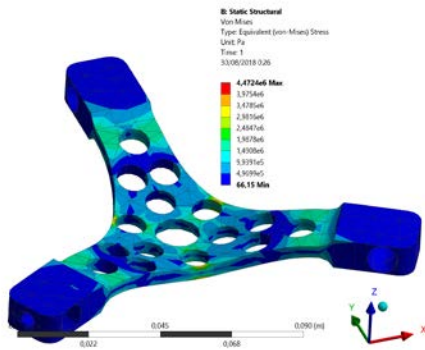
Se ubicaron tres restricciones fijas cilíndricas en la ubicación de los pasadores de conexión



Fuente, software ANSYS

Tensión Von Mises

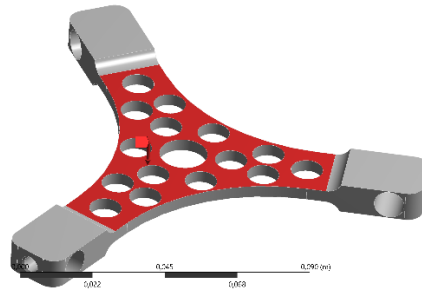
Valor mínimo 66.15 e-0.6 MPa
Valor máximo 4.4724 MPa



Fuente, software ANSYS

Carga

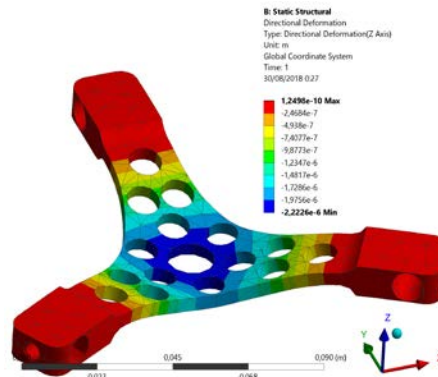
Fuerza vertical: 19.6 N



Fuente, software ANSYS

Desplazamiento Total

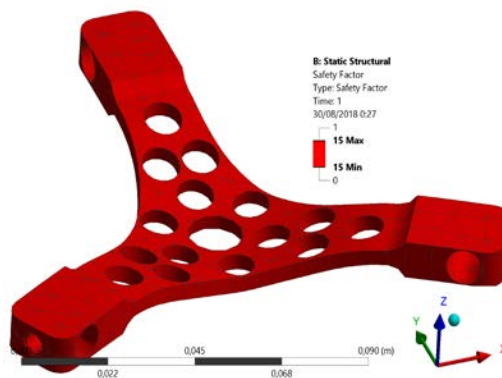
Valor mínimo 0 mm
Valor máximo 0.00222 mm



Fuente, software ANSYS

Factor de seguridad

Valor mínimo 10
Valor máximo 15



Fuente, software ANSYS

5.5.5 Diseño de subsistema estructura de soporte.

El subsistema estructura de soporte del Robot paralelo tipo Delta, está compuesto por una base fija, unida a una estructura que soporta: los motores, brazos superiores, brazos inferiores y la base móvil.

La base fija **Figura 30** es el elemento de apoyo fijo superior de la máquina. La cual esta diseñada en función de los motores seleccionados en esta ocasión los servomotores de referencia 1501MG - Power HD; por tanto, se ha buscado adaptar su forma con respecto al modo de sujeción y funcionamiento de los servomotores, así como las dimensiones propuestas para esta, (ver **Tabla 16**).

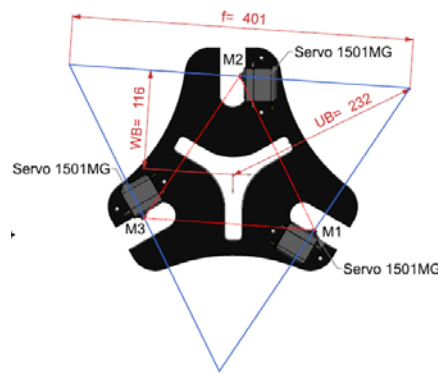


Figura 30 Modelado base fija. - Fuente, software NX.

El diseño de la estructura de soporte para el Robot paralelo tipo Delta, el cual fue previamente seleccionado (ver **Tabla 13** y **Tabla 14**), será construido con tres extremos que asemejan las patas de una araña, en tubo de acero al carbón cuadrado de 25.4 x 25.4 mm y soldadas a la base fija como muestra la **Figura 31**. Además de requerir una protección con anticorrosivo y pintura en esmalte.



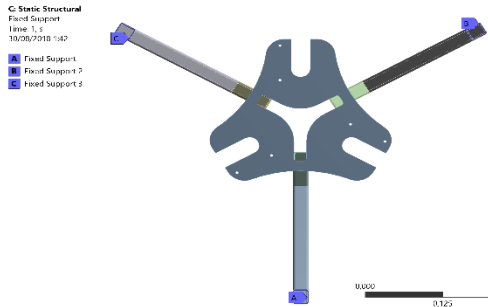
Figura 31 Diseño de la estructura de soporte - Fuente, software NX.

Para verificar el diseño de la estructura de soporte se empleó un análisis por elementos finitos con el software ANSYS; donde se observó que la estructura no presenta deformaciones significativas y un aceptable factor de seguridad.

Nombre del material: ASTM A36
 Densidad: 7800 kg m^3
 Módulo de Young: 200 GPa
 Proporción de Poisson: 0.26
 Tensión de fluencia: 250 MPa
 Tensión de rotura: 400 MPa

Restricción

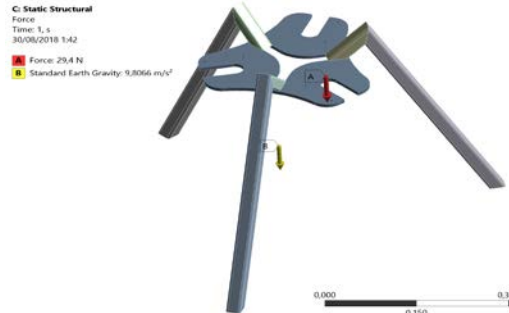
Se ubicaron tres restricciones fijas en cada apoyo inferior de la estructura soporte



Fuente, software ANSYS

Carga

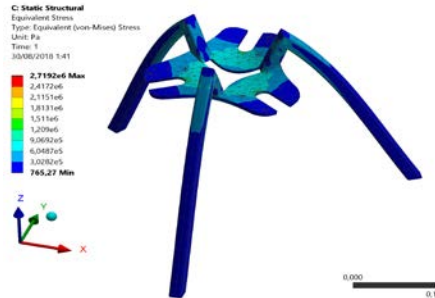
Fuerza vertical: 29.4 N



Fuente, software ANSYS

Tensión Von Mises

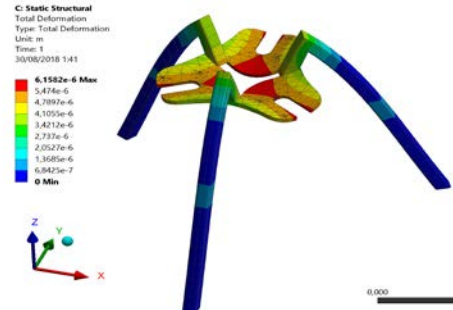
Valor mínimo 0.765 e-3 MPa
 Valor máximo 2.719 MPa



Fuente, software ANSYS

Desplazamiento Total

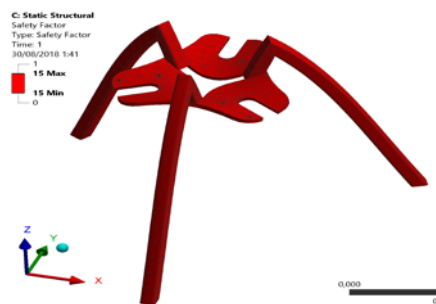
Valor mínimo 0 mm
 Valor máximo 6.15 e-6 mm



Fuente, software ANSYS

Factor de seguridad

Valor mínimo 10
 Valor máximo 15



Fuente, software ANSYS

5.6 Fase 4: Fabricación del prototipo físico del Robot paralelo tipo Delta.

La fabricación de partes de la máquina prototipo de Robot paralelo tipo Delta se realiza en talleres de mecanizado locales, en los cuales se utilizaron procesos de corte, torneado, fresado y soldadura consecuente a los planos de fabricación realizados en el software- Fuente, software NX. **Anexo A.** En **Figura 32** se observar la máquina prototipo terminado y ensamblada.



Figura 32 Máquina prototipo de Robot paralelo tipo Delta.

6 Cinemática Directa

Para la construcción del prototipo de Robot paralelo tipo Delta se debe resolver la cinemática directa y la cinemática indirecta en el caso del presente proyecto solo se llevará a cabo la cinemática directa con ayuda del software Matlab, el cual determina la posición y orientación de la base móvil o efector final del Robot paralelo tipo Delta, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, conocidos los ángulos de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos de la máquina (ver **Tabla 16**).

Para el caso de la cinemática directa la solución se basará en un el método geométrico de usar tres esferas con centro en los puntos (M_1 , M_2 , M_3) de ubicación de los servomotores y radio r_e obteniendo polinomios de múltiples soluciones.

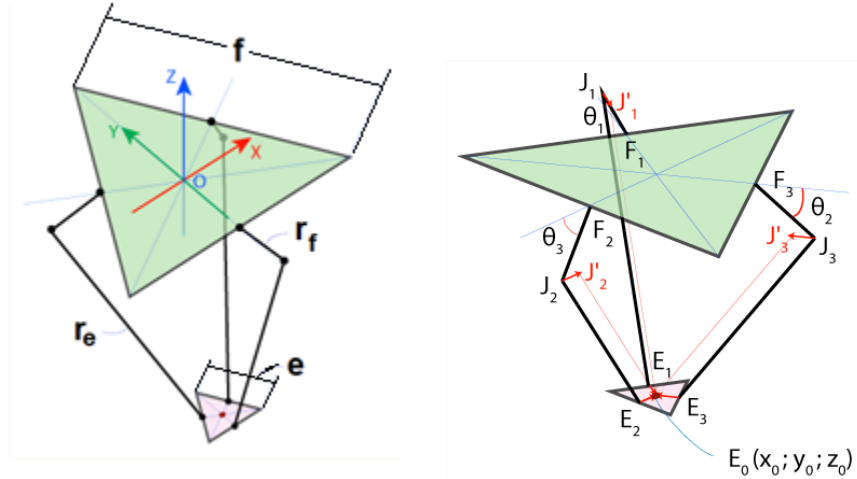


Figura 33 Parámetros geométricos del Robot paralelo tipo Delta.

Variables y parámetros usados

- f Longitud lado de base fija.
- r_f Longitud de brazo superior.
- e Longitud lado de base móvil.
- r_e Longitud de brazo inferior.
- U_B Longitud del centro de la base a el vértice – base fija.
- W_B Longitud del centro de la base a los motores.
- U_M Longitud del centro de la base a el vértice – base móvil.
- W_M Longitud del centro de la base móvil al punto de articulación.
- α_1 Rotación alrededor del eje vertical para brazo unido al motor 1
- α_2 Rotación alrededor del eje vertical para brazo unido al motor 2
- α_3 Rotación alrededor del eje vertical para brazo unido al motor 3

Como la cinemática directa consiste en determinar las coordenadas del punto $E_0(x_0; y_0; z_0)$, ubicado en el centro de la base móvil, a partir de conocer los ángulos de las rotulas cilíndricas $\theta_1; \theta_2; \theta_3$. Lo que se simplifica para un brazo en:

$$j_i = \begin{bmatrix} 0 \\ r_f \sin(\theta_1) \\ R + r_f \cos(\theta_1) \end{bmatrix}$$

Ecuación 2 [10]

Donde $R = W_B - W_M$,

- W_B es la distancia entre el servomotor y el origen de la base fija.
- W_M es la distancia entre la junta o rotula y el origen de la base móvil

La **Ecuación 2** es válida para un único brazo para los brazos restantes tenemos;

$$j_i = {}^R_y R_i c_i$$

Ecuación 3 [10]

Donde

$${}^R_y R_i = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & 0 & \sin(\alpha_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_i) & 0 & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$$

Ecuación 4 [10]

La siguiente matriz describe los tres puntos de articulaciones:

$$j = [j_1 \ j_2 \ j_3] = \begin{bmatrix} {}^R_y R_1 j_1 & {}^R_y R_2 j_2 & {}^R_y R_3 j_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix}^T$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -z_2 / \tan(\frac{\pi}{6}) & z_3 / \tan(\frac{\pi}{6}) \\ -r_f \sin(\theta_1) & -r_f \sin(\theta_2) & -r_f \sin(\theta_3) \\ \cos(\alpha_1) (R + r_f \cos(\theta_1)) & \cos(\alpha_2) (R + r_f \cos(\theta_2)) & \cos(\alpha_2) (R + r_f \cos(\theta_2)) \end{bmatrix}$$

Ecuación 5 [10]

Para los valores en X y Z , depende de que el ángulo de rotación alrededor de eje Y este entre el primero y segundo brazo, es decir; $\alpha_2 = \frac{2\pi}{3}$ y de este modo $\frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{6}$. Para el segundo brazo el eje X es positivo, el ángulo desde el tercer brazo en el eje Z es negativo $-\pi/6$ [10].

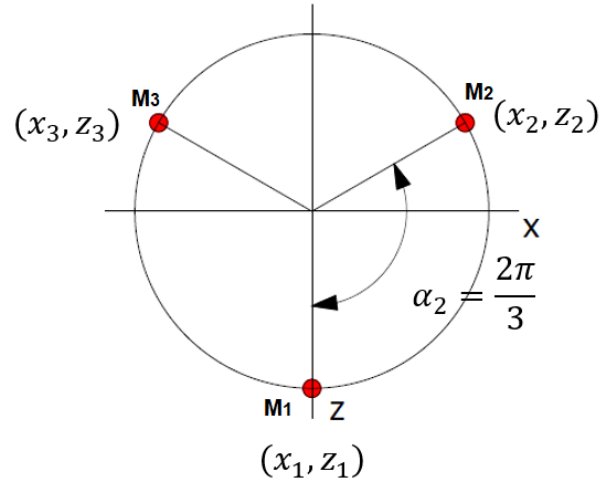


Figura 34 Esquema del Robot paralelo tipo Delta visto desde arriba.

A partir de estos tres puntos (servomotores) **Figura 34**, se pueden trazar tres esferas con los puntos como centro y radio r_e . Estas esferas tendrán dos puntos de intersección donde el punto con la coordenada en **Y** negativo es la posición de la base móvil y, por lo tanto, la solución para la cinemática directa. [10]

Para la ecuación de las esferas:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2$$

Ecuación 6 [10]

Las tres ecuaciones de restricción que necesitan ser resueltas son:

$$x^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_e^2$$

Ecuación 7 [10]

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_e^2$$

Ecuación 8 [10]

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_e^2$$

Ecuación 9 [10]

Por lo tanto:

$$w_i = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2$$

Ecuación 10 [10]

Se restan las **Ecuaciones 7 y 8**. Luego se describen en la **Ecuación 10**.

$$x_2x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z = \frac{w_1 - w_2}{2}$$

Ecuación 11 [10]

Y se resta las **Ecuaciones 7 y 9**. Luego se describen en la **Ecuación 10**.

$$x_3x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z = \frac{w_1 - w_3}{2}$$

Ecuación 12 [10]

Al usar las **Ecuaciones 11 y 12**, x y z pueden eliminarse para obtener:

$$x = a_1z + b_1$$

Ecuación 13 [10]

$$y = a_2z + b_2$$

Ecuación 14 [10]

Con:

$$a_1 = 1/d * [(z_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1)]$$

$$b_1 = -1/(2d) * [(w_2 - w_1)(y_3 - y_1) - (w_3 - w_1)(y_2 - y_1)]$$

$$b_2 = 1/(2d) * [(w_2 - w_1)x_3 - (w_3 - w_1)x_2]$$

$$d = (y_2 - y_1)x_3 - (y_3 - y_1)x_2$$

Sustituyendo la **Ecuaciones 13 y 14** en **7** se forma una ecuación de segundo orden:

$$(a_1^2 + a_2^2 + 1)z^2 + 2(a_1 + a_2(b_2 - y_1) - z_1)z + (b_1^2 + (b_2 - y_1)^2) - z_1^2 - r_e^2 = 0$$

Ecuación 15 [10]

6.1 Implementación en el software Matlab:

A continuación, se puede observar el código utilizado en la implementación de la cinemática directa para el Robot paralelo tipo Delta. **Fuente**; Applied Engineering <http://www.mediafire.com/file/bgj6cbyqscwz13g/Delta.rar>

```
%% Desarrollo Cinemática Directa
function [ r ] = ForwardKinematics(t1,t2,t3,param)
%% Parametros
```

```

% longitud de Brazos
r_f=112; %en mm
r_e=250; %en mm

%longitud de lado de triangulo
f=401; % en mm
e=230; % en mm

%Efector final
z=param(5);

%% init
%Posiciones para la primera articulación la que está
directamente conectada al motor
k=(f-e)/(2*sqrt(3));
J1=[0;-k-r_f*cos(t1);-r_f*sin(t1)]; %x1=0->projection en y z
plane
J2=[(k+r_f*cos(t2))*cos(30*pi/180);...
    (k+r_f*cos(t2))*sin(30*pi/180);...
    -r_f*sin(t2)];
J3=[(-k-r_f*cos(t3))*cos(30*pi/180);...
    (k+r_f*cos(t3))*sin(30*pi/180);...
    -r_f*sin(t3)];
    %constantes proporcionales para la posición de la base móvil
w1=J1(1)^2 + J1(2)^2 + J1(3)^2;
w2=J2(1)^2 + J2(2)^2 + J2(3)^2;
w3=J3(1)^2 + J3(2)^2 + J3(3)^2;

%calculo Ji posiciones
x1=J1(1); x2=J2(1); x3=J3(1);
y1=J1(2); y2=J2(2); y3=J3(2);
z1=J1(3); z2=J2(3); z3=J3(3);

d=(y2-y1)*x3-(y3-y1)*x2;
a1=(1/d)*((z2-z1)*(y3-y1)-(z3-z1)*(y2-y1));
b1=(-1/(2*d))*((w2-w1)*(y3-y1)-(w3-w1)*(y2-y1));
a2=(-1/d)*((z2-z1)*x3-(z3-z1)*x2);
b2=(1/(2*d))*((w2-w1)*x3-(w3-w1)*x2);

%%
%ecuación cuadrática para resolver el valor negativo más
pequeño
a=(a1^2+a2^2+1);
b=2*(a1*b1+a2*(b2-y1)-z1);
c=(b1^2+(b2-y1)^2 +z1^2-r_e^2);
z=(min(solve(a*z^2+b*z+c==0,z)));
% eje z

```

```

x=@( z ) a1*z+b1;
y=@( z ) a2*z+b2;
    %posicion de retorno vector
r=eval([x(z),y(z),z]');
end

```

6.2 Código Arduino

Código Arduino para implementar la cinemática Directa del Robot paralelo tipo Delta

Fuente; <https://sites.google.com/site/proyectosroboticos/cinemática-brazo-delta>.

```

const float e = 230;    // mm
const float f = 401;    // mm

const float re = 250;    // mm
const float rf = 112;    // mm

// trigonometric constants
const float sqrt3 = sqrt(3.0);
const float pi = 3.141592653;    // PI
const float sin120 = sqrt3/2.0;
const float cos120 = -0.5;
const float tan60 = sqrt3;
const float sin30 = 0.5;
const float tan30 = 1/sqrt3;

// cinematica directa: (theta1, theta2, theta3) -> (x0, y0, z0)
// returned status: 0=OK, -1=non-existing position
int delta_calcForward(float theta1, float theta2, float theta3, float &x0, float &y0, float
&z0) {
    float t = (f-e)*tan30/2;
    float dtr = pi/(float)180.0;

    theta1 *= dtr;
    theta2 *= dtr;
    theta3 *= dtr;

    float y1 = -(t + rf*cos(theta1));
    float z1 = -rf*sin(theta1);

    float y2 = (t + rf*cos(theta2))*sin30;
    float x2 = y2*tan60;
    float z2 = -rf*sin(theta2);

    float y3 = (t + rf*cos(theta3))*sin30;
    float x3 = -y3*tan60;
    float z3 = -rf*sin(theta3);

```

```

float dnm = (y2-y1)*x3-(y3-y1)*x2;
float w1 = y1*y1 + z1*z1;
float w2 = x2*x2 + y2*y2 + z2*z2;
float w3 = x3*x3 + y3*y3 + z3*z3;
// x = (a1*z + b1)/dnm
float a1 = (z2-z1)*(y3-y1)-(z3-z1)*(y2-y1);
float b1 = -((w2-w1)*(y3-y1)-(w3-w1)*(y2-y1))/2.0;
// y = (a2*z + b2)/dnm;
float a2 = -(z2-z1)*x3+(z3-z1)*x2;
float b2 = ((w2-w1)*x3 - (w3-w1)*x2)/2.0;
// a*z^2 + b*z + c = 0
float a = a1*a1 + a2*a2 + dnm*dnm;
float b = 2*(a1*b1 + a2*(b2-y1*dnm) - z1*dnm*dnm);
float c = (b2-y1*dnm)*(b2-y1*dnm) + b1*b1 + dnm*dnm*(z1*z1 - re*re);

// discriminación
float d = b*b - (float)4.0*a*c;
if (d < 0) return -1; // non-existing point

z0 = -(float)0.5*(b+sqrt(d))/a;
x0 = (a1*z0 + b1)/dnm;
y0 = (a2*z0 + b2)/dnm;
return 0;
}

```

6.3 Resultados

El espacio de trabajo para la base móvil y los límites de ángulo para los servomotores se obtuvieron por medio de análisis cinemáticos que se encuentran en la página web (www.marginallyclever.com/other/samples/fk-ik-test.html).

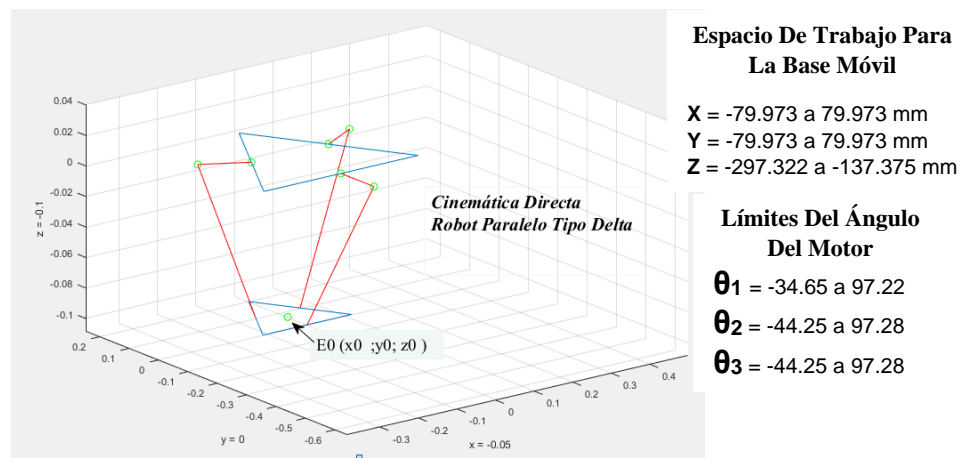


Figura 35 Desarrollo de la cinemática directa - Fuente, software Matlab.

Para calcular la cinemática directa se requiere conocer los ángulos de posición de los tres servomotores a continuación se observa tres ejemplos donde se calcula las coordenadas en el punto $E_0(x_0; y_0; z_0)$, para la base móvil, **Tabla 20**. Por medio del software Matlab usando el código antes visto, con la validación en el modelo 3D del Robot paralelo tipo Delta, desarrollado en el software NX.

Ejemplo No. 1		Ángulo	Cinemática Directa Modelo Software – NX (mm)		
Servomotor No. 1		70°	x_0	y_0	z_0
Servomotor No. 2		70°	0.00	0.00	-329.42
Servomotor No. 3		70°			
Cinemática Directa Matlab (mm)					
x_0	y_0	z_0			
0.00	0.00	-339,37			
Diferencia (mm)					
x_0	y_0	z_0			
0.00	0.00	9.95			
Ejemplo No. 2		Ángulo	Cinemática Directa Modelo Software – NX (mm)		
Servomotor No. 1		27	x_0	y_0	z_0
Servomotor No. 2		0	83.166	-1.368	-220.89
Servomotor No. 3		47			
Cinemática Directa Matlab (mm)					
x_0	y_0	z_0			
82,874	3,297	-230,819			
Diferencia (mm)					
x_0	y_0	z_0			
0.292	1.929	9.992			

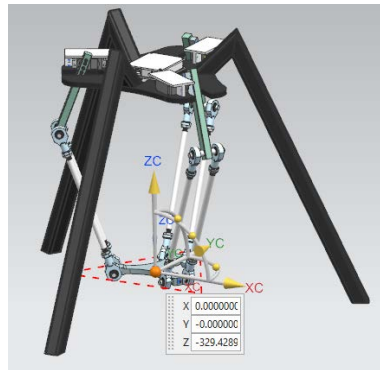


Figura 36 Validación No.1 cinemática directa - Fuente, Software NX.

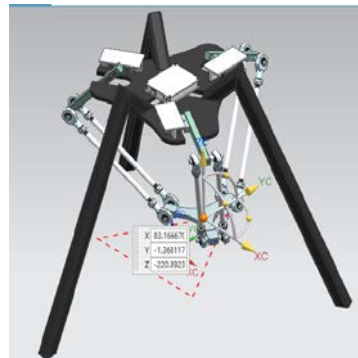


Figura 37 Validación No.2 cinemática directa - Fuente, Software NX.

Ejemplo No. 3		Ángulo	Cinemática Directa Modelo Software – NX (mm)		
Servomotor No. 1		20	x_0	y_0	z_0
Servomotor No. 2		40	-90.730	-15.462	-189.630
Servomotor No. 3		-20			
Cinemática Directa Matlab (mm)					
x_0	y_0	z_0			
-91,014	-13,373	-199,547			
Diferencia (mm)					
x_0	y_0	z_0			
0.284	2.089	9.917			
Ejemplo No. 4		Ángulo	Cinemática Directa Modelo Software – NX (mm)		
Servomotor No. 1		0	x_0	y_0	z_0
Servomotor No. 2		0	0.00	0.00	-181.109
Servomotor No. 3		0			
Cinemática Directa Matlab (mm)					
x_0	y_0	z_0			
0.00	0.00	-190.95			
Diferencia (mm)					
x_0	y_0	z_0			
0.00	0.00	9.841			

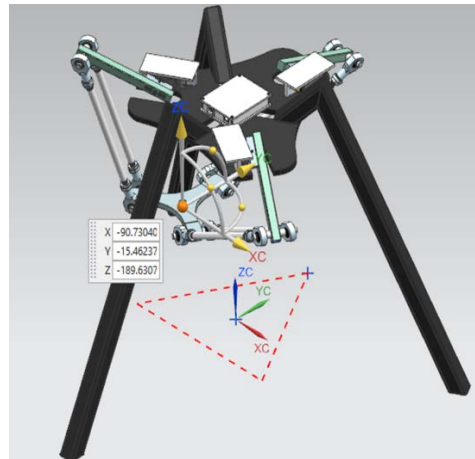


Figura 38 Validación No.3 cinemática directa - Fuente, Software NX.

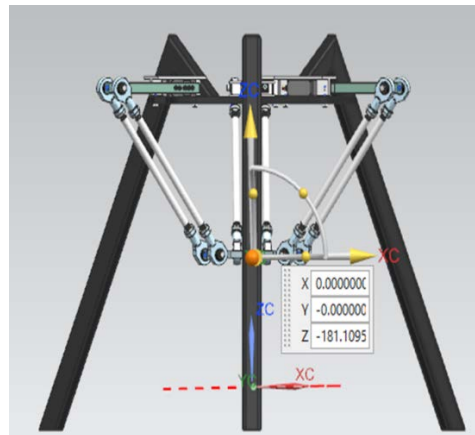


Figura 39 Validación No.4 cinemática directa - Fuente, Software NX.

Tabla 19 Ejemplos - coordenadas x, y, z, para la cinemática directa.

7 Conclusiones

- El presente proyecto expuso el diseño y construcción de un Robot paralelo tipo Delta capaz de permitir que un efector final pueda realizar movimientos o actividades específicas, previamente programadas y descargadas a la placa Arduino UNO.
- El diseño y construcción del Robot paralelo tipo Delta, fue guiado por una metodología de diseño basada en el despliegue de la función de calidad (QFD). La cual consta de implementar la matriz casa de la calidad; obteniendo resultados mayormente ponderados en requerimientos de diseño como: los materiales, el peso, el costo y la fácil fabricación. Así como la utilización de tablas comparativas donde se precisan las ventajas y desventajas de cada elemento o sistema a implementar, además de matrices de selección que arrojaron para cada subsistema el elemento viable a conseguir o fabricar. Ver **Tabla 15** Resumen - Selección final.
- El modelo CAD del Robot paralelo tipo Delta se realizó en el software NX, donde se determinó: longitud de eslabones, posición de servomotores, forma de base fija y base móvil, espacio de trabajo, interferencia entre partes mecánicas, dibujo y ensamble de cada elemento que constituyen al Robot paralelo tipo Delta.
- Se realizó el análisis matemático, de la cinemática directa del Robot paralelo tipo Delta, utilizando para los cálculos matemáticos complejos el software Matlab. Donde se determinó la posición de la base móvil en los ejes X, Y y Z para cada ángulo programado entre 0° y 180° que son las restricciones de los servomotores obtenido.

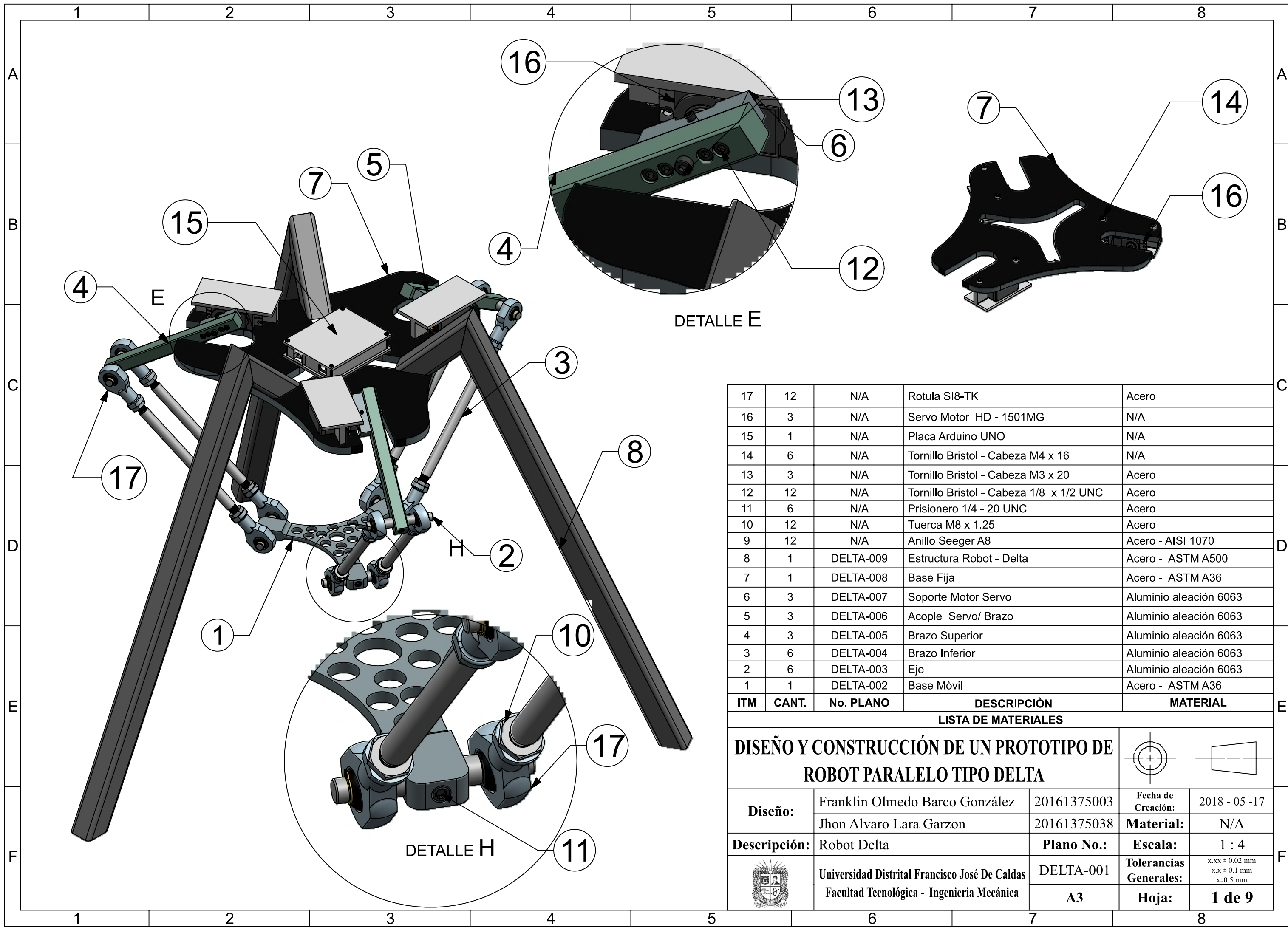
8 Recomendaciones

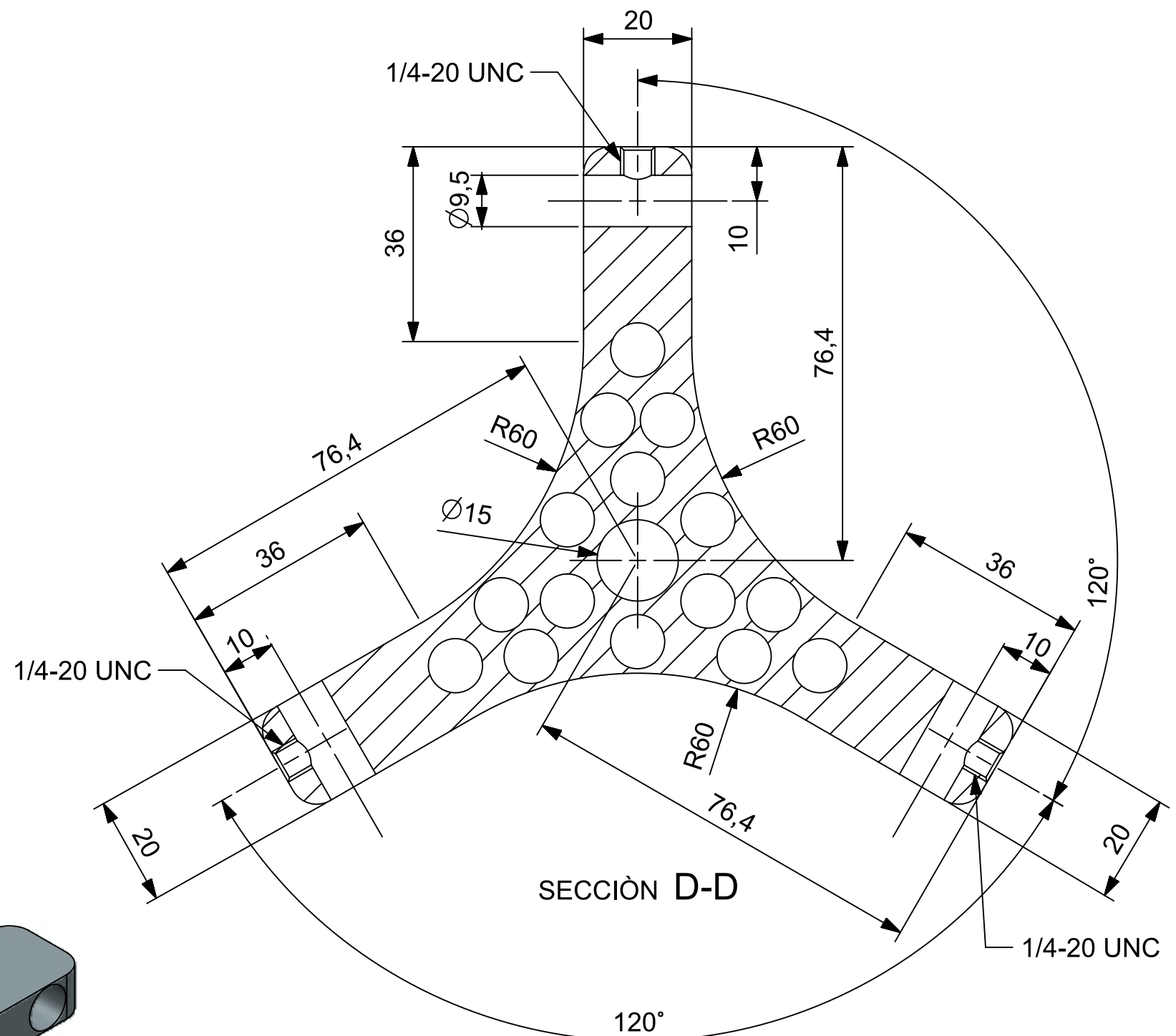
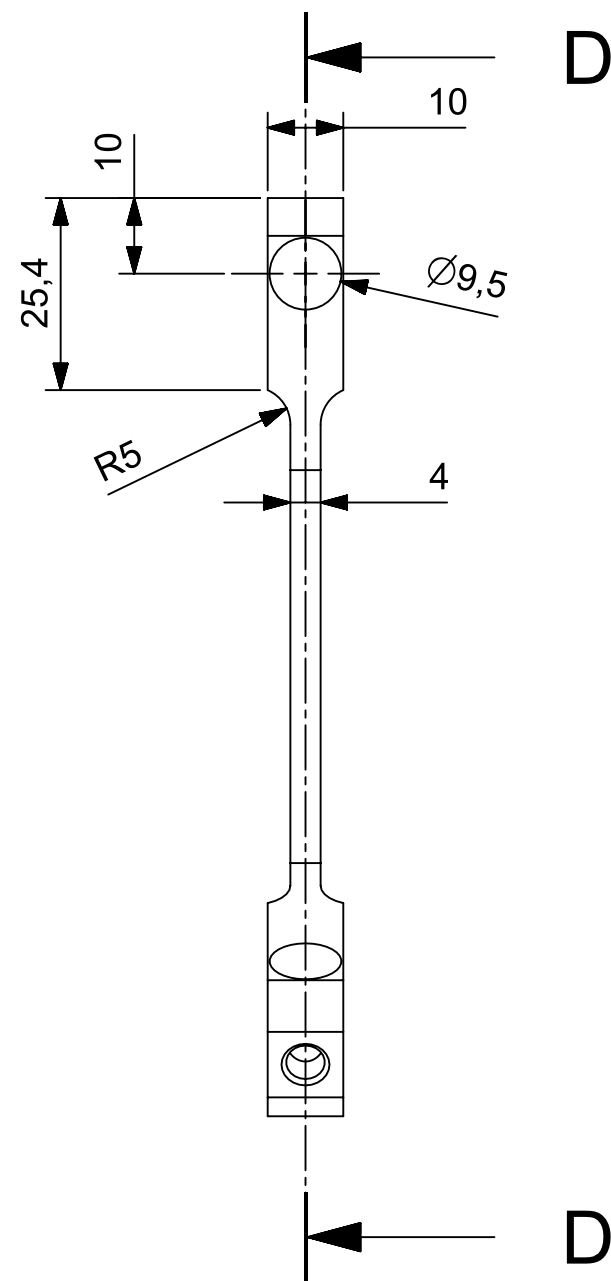
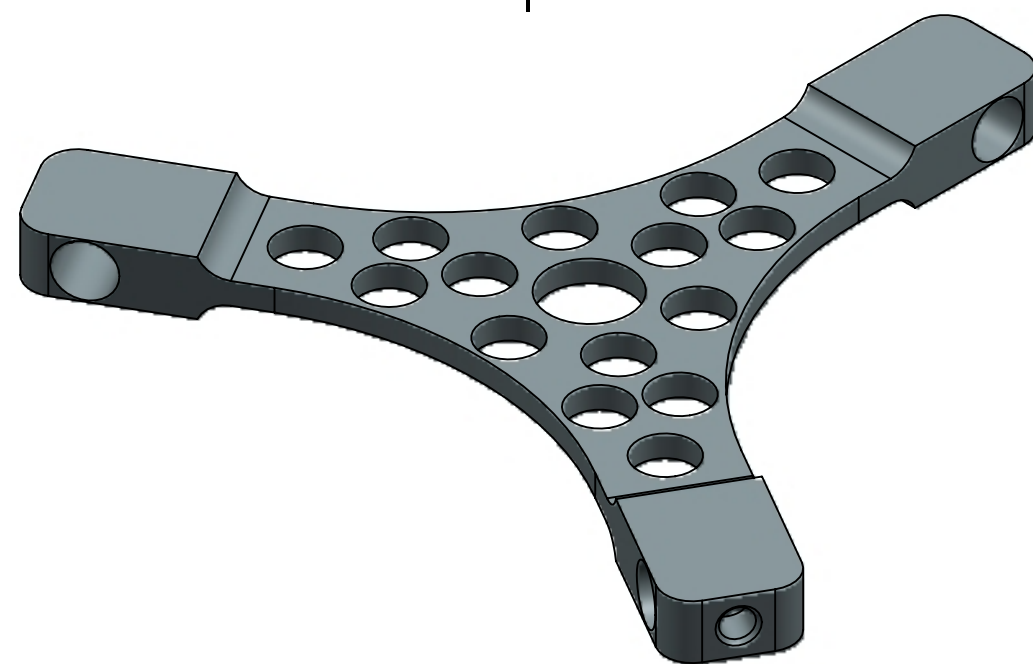
- Se podría considerar un cambio de los servomotores donde se aumente: el torque, la precisión, resolución, y velocidad. Para realizar tareas que requieran mayor exigencia, como, por ejemplo: traslado de piezas o actividades de mecanizado de material.
- Instalar herramientas en la base móvil o efector final del Robot paralelo tipo Delta para aumentar en un grado de libertad (GDL) la máquina prototipo.
- Programar tareas o movimientos en el prototipo de Robot paralelo tipo Delta con la colaboración de estudiantes con habilidades en el área de programación, electrónica y automatización.

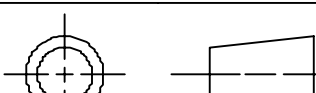

9 Bibliografía

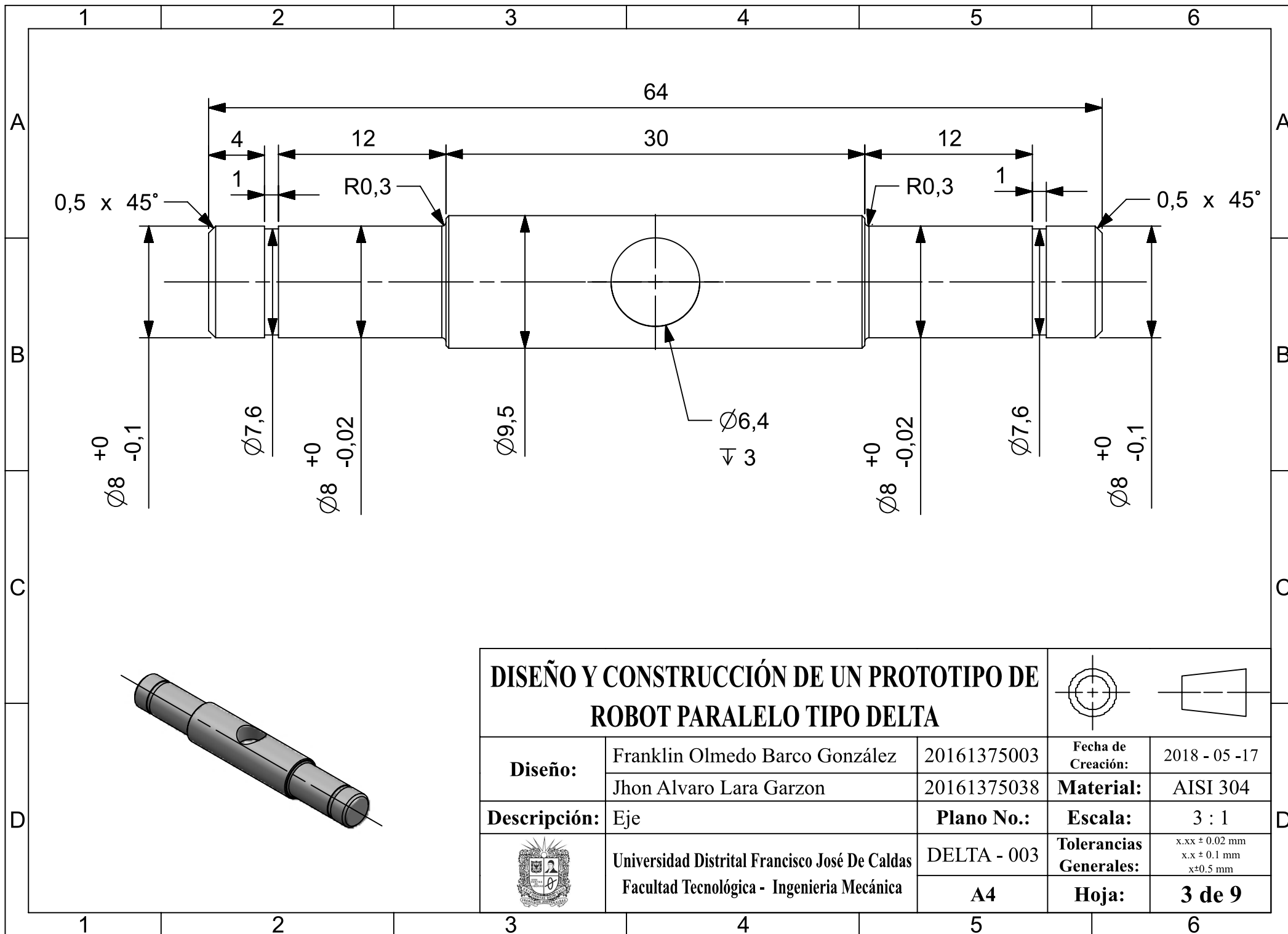
- [1] F. Reyes Cortes, *Robotica Control de Robots Manipuladores*, Mexico: Alfaomega, 2011.
- [2] D. Tolosa, «Scribd,» 27 Octubre 2010. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/40202098/Manipuladores-Paralelos>. [Último acceso: 15 Mayo 2017].
- [3] V. Andres, «Robótica Paralela: Aplicaciones Industriales, Modelado y Control,» Universidad del Cauca, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Popayán, Colombia.
- [4] Xin-Jun, J. Wang y K.-K. OH, «A New Approach to the Design of a DELTA Robot,» *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, P.R. of China, 2004.
- [5] N. X. Gonzalez Alvarez y P. Reinoso Mendoza, «www.dspace.ups.edu.ec,» 2011. [En línea]. Available: <http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1921/14/UPS-CT002354.pdf>. [Último acceso: 20 Abril 2017].
- [6] J. D. Rueda Florez, «Metodologia para el diseño de un robot paralelo industrial tipo Delta,» Universidad Pontificia Bolivariana- Ingenieria Mecanica, Bucaramanga, 2008.
- [7] R. Celi, A. Sempértegui y D. Morocho, «Study, Design and Construction of a 3D printer,» IEEE.
- [8] R. Santos y J. Justin , «Delta 3D Printer,» *Deltronic Solutions*, 2015.
- [9] R. L. Williams II,, «The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions,» Mechanical Engineering, Ohio University, October 2016.
- [10] K. Rosquist, «Modelling and Control of,» LUND UNIVERSITY, Lund - Europa, 2013.
- [11] T. Chi-Sheng , A. Yao y N. Radakovic, «Design and Simulation of a Delta type Robot,» Department of Automation Engineering, Chienkuo Technology University, Taiwan, 2016.
- [12] L. Angel, S. Jose Maria y S. Roque, «RoboTenis: Diseño y construccion del robot paralelo,» Universidad Politécnica de Madrid UPM, Madrid- España, 2006.
- [13] A. Jaramillo Botero, «Cinemática de Manipuladores Robóticos,» [En línea]. Available: http://www.wag.caltech.edu/home/ajaramil/libro_robotica/cinematica.pdf.

10 Anexo A - Planos de fabricación

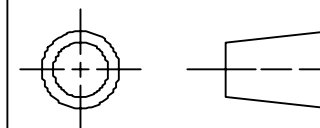





<h1 style="text-align: center;">DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT PARALELO TIPO DELTA</h1>				
Diseño:	Franklin Olmedo Barco González	20161375003	Fecha de Creación:	2018 - 05 -17
	Jhon Alvaro Lara Garzon	20161375038	Material:	ASTM A36
Descripción:	Base Móvil	Plano No.:	Escala:	1 : 1
	Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad Tecnológica - Ingeniería Mecánica	DELTA - 002	Tolerancias Generales:	$x.xx \pm 0.02 \text{ mm}$ $x.x \pm 0.1 \text{ mm}$ $x \pm 0.5 \text{ mm}$
		A3	Hoja:	2 de 9



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT PARALELO TIPO DELTA



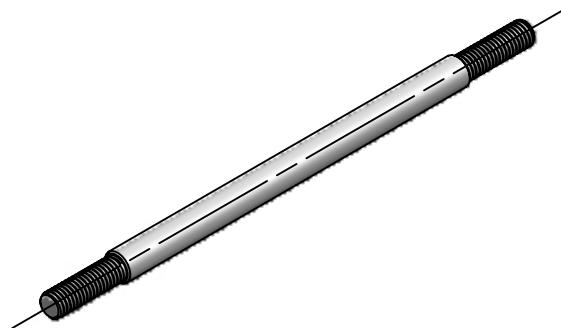
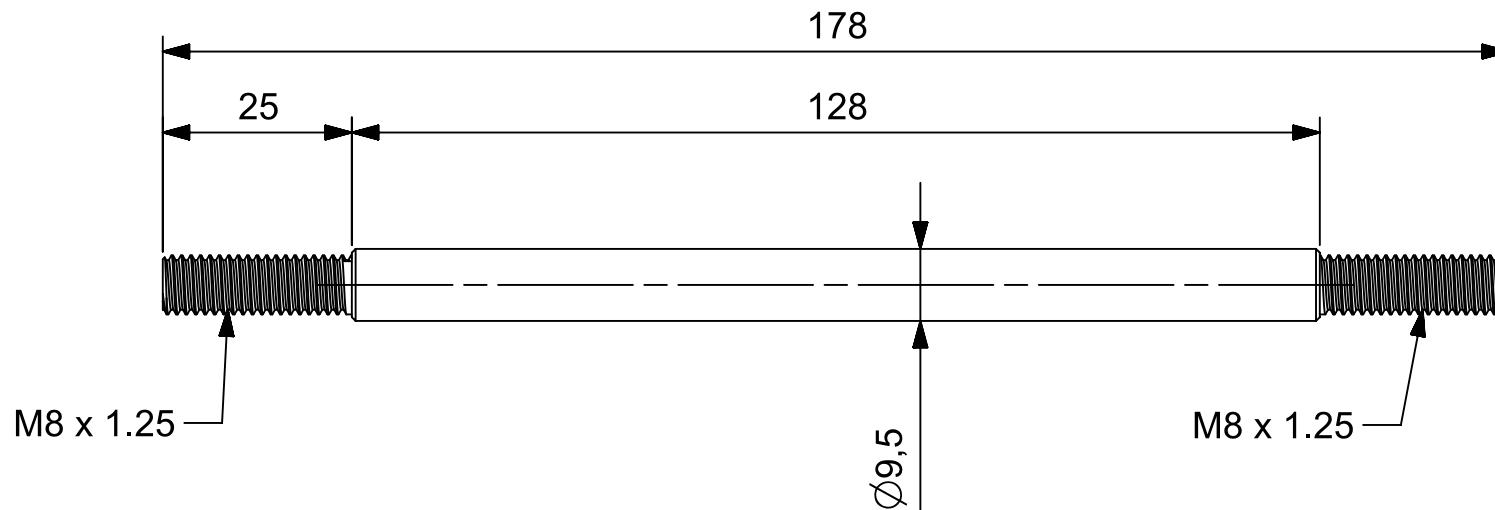
Diseño:	Franklin Olmedo Barco González	20161375003	Fecha de Creación:	2018 - 05 - 17
	Jhon Alvaro Lara Garzon	20161375038	Material:	AISI 304
Descripción:	Eje	Plano No.:	Escala:	3 : 1
	Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad Tecnológica - Ingeniería Mecánica	DELTA - 003	Tolerancias Generales:	x.xx ± 0.02 mm x.x ± 0.1 mm x±0.5 mm
		A4	Hoja:	3 de 9

A

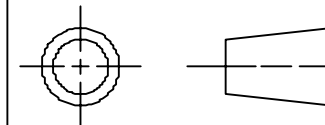
B


C

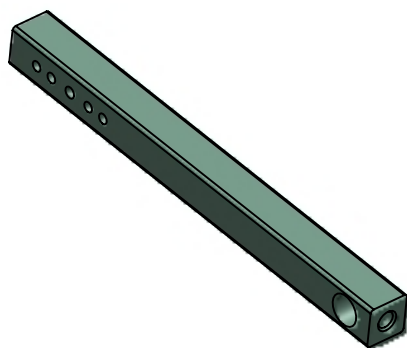
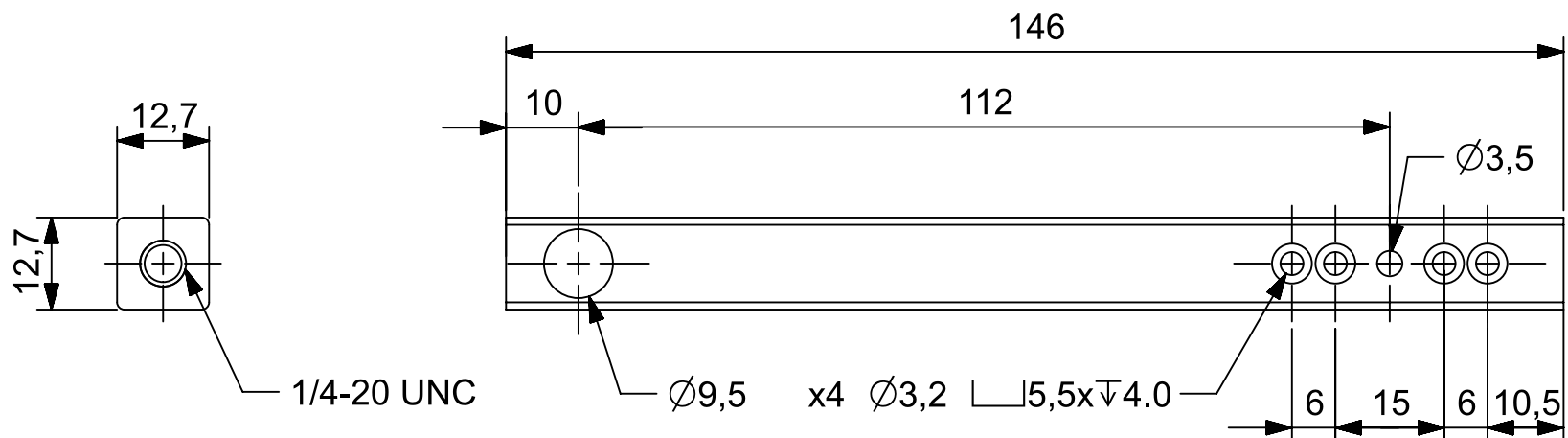
D



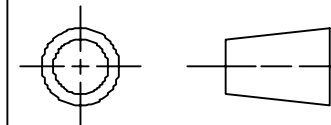
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT PARALELO TIPO DELTA




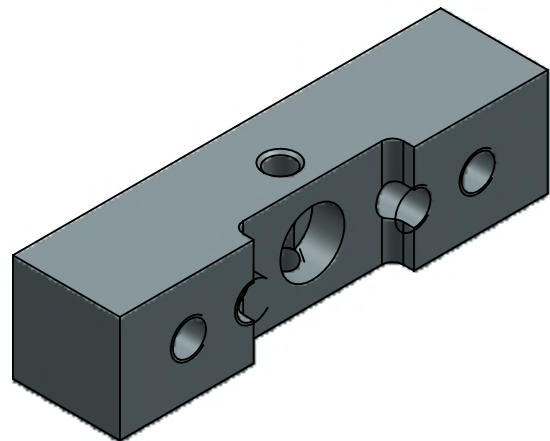
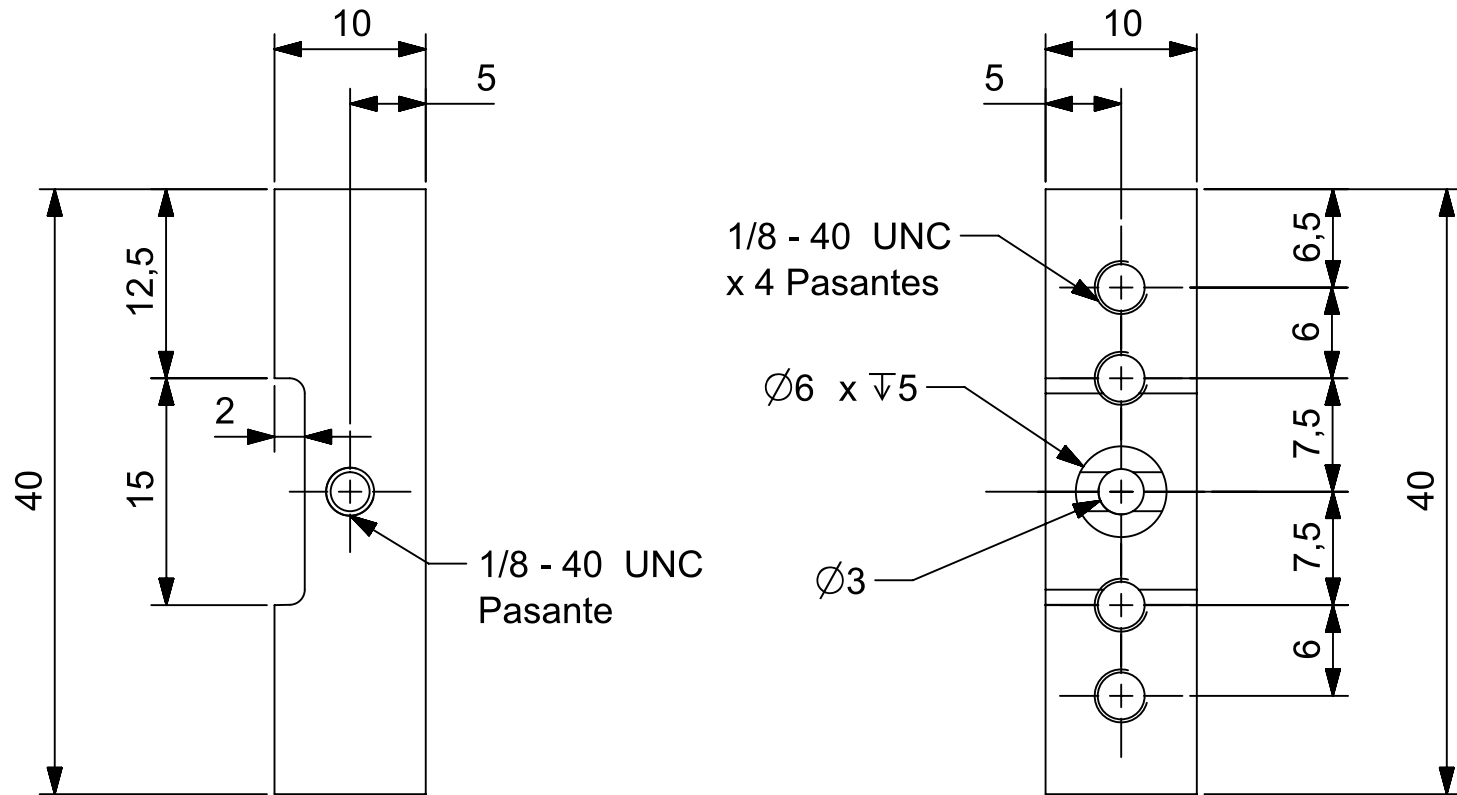
Diseño:	Franklin Olmedo Barco González	20161375003	Fecha de Creación:	2018 - 05 -17
	Jhon Alvaro Lara Garzon	20161375038	Material:	Aluminio 6063
Descripción:	Brazo Inferior	Plano No.:	Escala:	1 : 1
	Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad Tecnológica - Ingeniería Mecánica	DELTA -004	Tolerancias Generales:	$x.xx \pm 0.02 \text{ mm}$ $x.x \pm 0.1 \text{ mm}$ $x \pm 0.5 \text{ mm}$
		A4	Hoja:	4 de 9



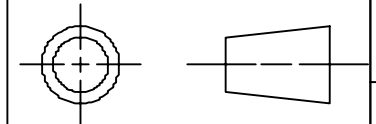
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT PARALELO TIPO DELTA




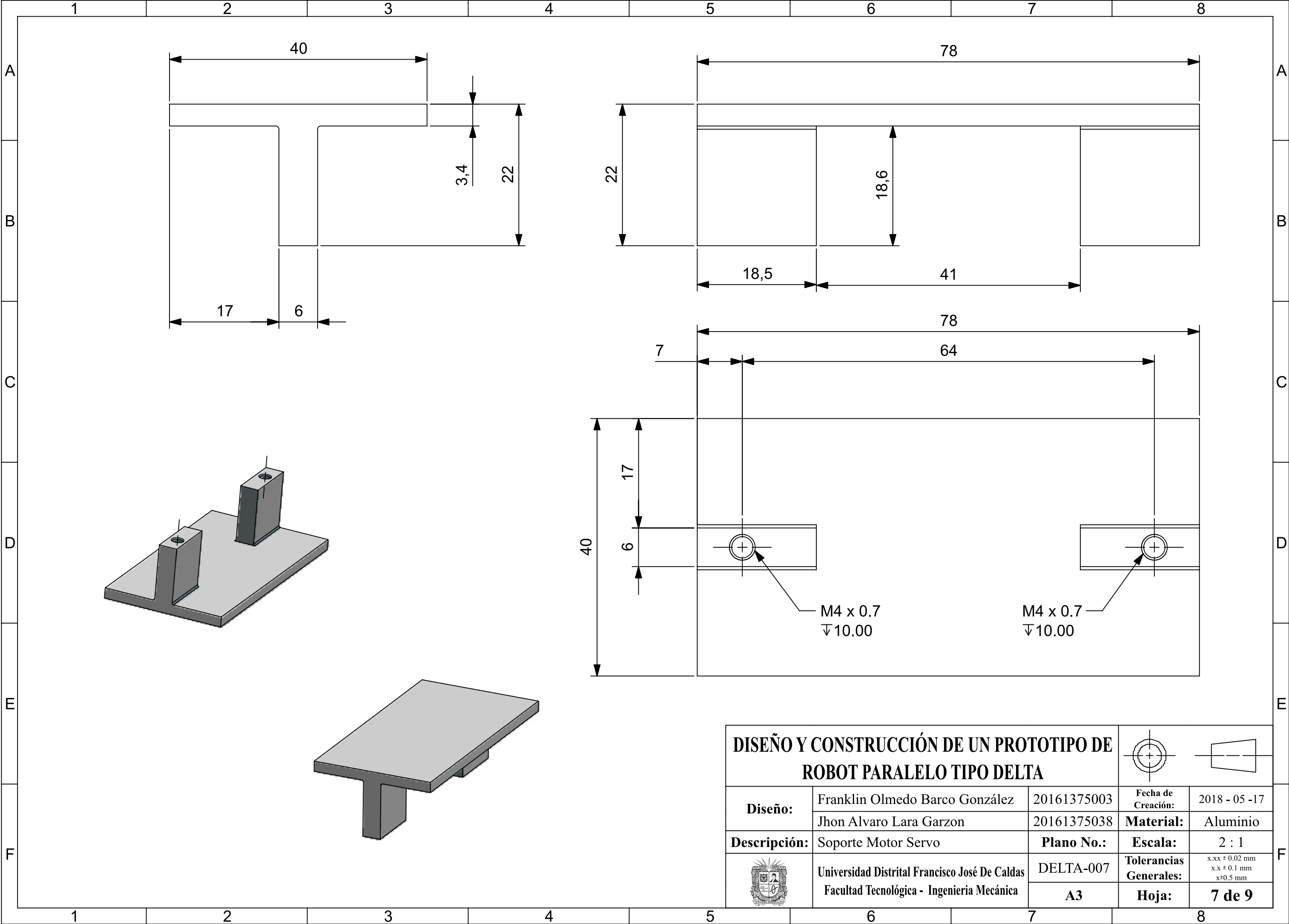
Diseño:	Franklin Olmedo Barco González	20161375003	Fecha de Creación:	2018 - 05 -17
	Jhon Alvaro Lara Garzon	20161375038	Material:	Aluminio 6063
Descripción:	Brazo Superior	Plano No.:	Escala:	1 : 1
	Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad Tecnológica - Ingeniería Mecánica	DELTA - 005	Tolerancias Generales:	$x.xx \pm 0.02 \text{ mm}$ $x.x \pm 0.1 \text{ mm}$ $x \pm 0.5 \text{ mm}$
		A4	Hoja:	5 de 9



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT PARALELO TIPO DELTA



Diseño:	Franklin Olmedo Barco González	20161375003	Fecha de Creación:	2018 - 05 - 17
	Jhon Alvaro Lara Garzon	20161375038	Material:	Aluminio
Descripción:	Acople Servo/Brazo	Plano No.:	Escala:	2 : 1
	Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad Tecnológica - Ingeniería Mecánica	DELTA-006	Tolerancias Generales:	x.xx ± 0.02 mm x.x ± 0.1 mm x±0.5 mm
		A4	Hoja:	6 de 9



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT PARALELO TIPO DELTA			 	
Diseño:	Franklin Olmedo Barco González	20161375003	Fecha de Creación:	2018 - 05 -17
	Jhon Alvaro Lara Garzon	20161375038	Material:	Aluminio
Descripción:	Soporte Motor Servo	Plano No.:	Escala:	2 : 1
	Universidad Distrital Francisco José De Caldas Facultad Tecnológica - Ingeniería Mecánica	DELTA-007	Tolerancias Generales:	x.xx ± 0.02 mm x.x ± 0.1 mm x±0.5 mm
		A3	Hoja:	7 de 9

