

BRAZO ROBOT DELTA

Práctica Profesionalizante III

Miguel Braidot (MB)

Revisión	Fecha	Redactó	Observaciones
A	25-11-2017	MB	

INDICE

0. Índice	Pág. 2
1. Resumen Ejecutivo	Pág. 3
2. Control de Cambios	Pág. 3
3. Objetivos	Pág. 3
4. Historia	Pág. 3
5. Diseño	Pág. 4
6. Cinemática	Pág. 5
7. D2	Pág. 10
8. Referencias	Pág. 16

1. RESUMEN EJECUTIVO

1.1 Introducción

1.1.1 El presente proyecto detalla los pasos tomados para el diseño y construcción de un brazo robot tipo Delta a escala, utilizando componentes electrónicos de fácil obtención e impresión 3D para sus partes mecánicas, así como programación en C++ sobre plataforma Arduino.

1.1.2 El mismo, compone la tesis y proyecto final para la materia Practica Profesionalizante III de la carrera de Técnico Superior en Automatización y Robótica.

2. CONTROL DE CAMBIOS

Revisión	Fecha	Párrafo	Observaciones
A	25-11-2017		Confección del Documento

3. OBJETIVOS

3.1 Los objetivos de este proyecto son: desarrollar una plataforma de ensayo de rutinas y código de programación de movimientos. Mantener los costos de materiales y electrónica, dentro de límites razonablemente bajos para facilitar su adopción e interés por parte de otros alumnos.

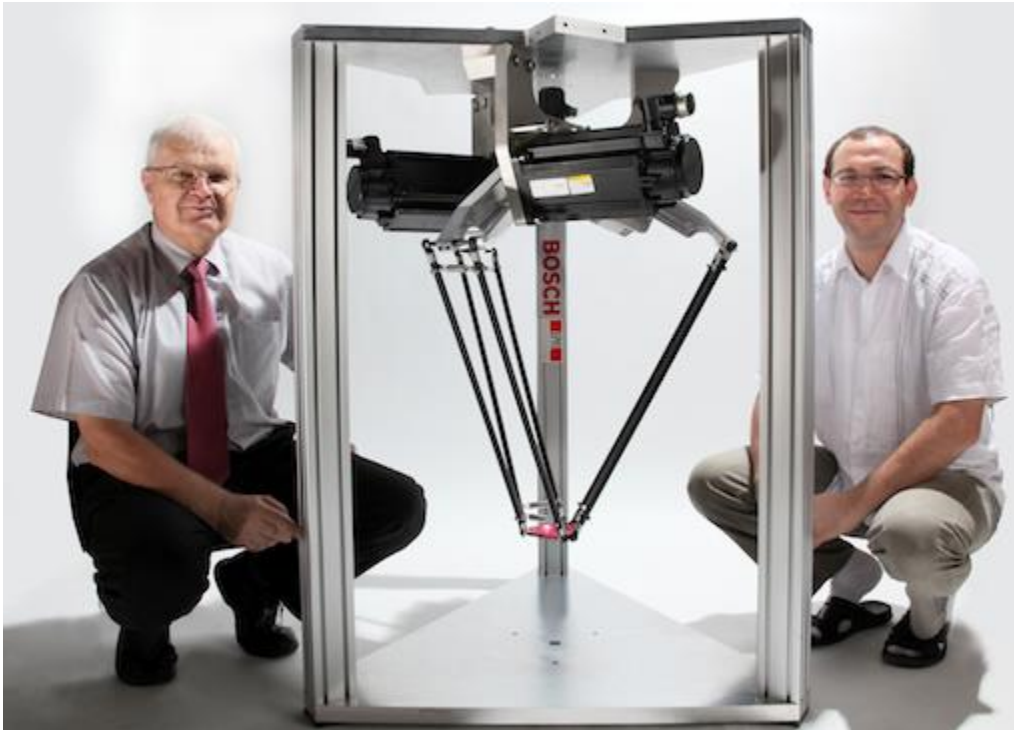
4. HISTORIA

4.1 El robot Delta fue inventado a principios de 1980 por Reymond Clavel [4] en Suiza, con el propósito de manipular objetos pequeños y livianos a altas velocidades.

4.2 La idea surgió luego de una visita a una fábrica de chocolates en 1984. Al ver que cientos de trabajadores en una línea de montaje, empaquetaban laboriosamente pequeñas piezas de chocolate en sus respectivas cajas a lo largo de toda la jornada laboral.

4.3 Al regresar al laboratorio, Clavel y sus asistentes pensaron que podían diseñar un dispositivo que haga ese trabajo. Este proceso de diseño duró aproximadamente

un año y para 1985, el brazo robot Delta había revolucionado el mundo del embalaje.



5. DISEÑO

5.1 La clave de su diseño es la forma de paralelogramo que forman cada uno de sus brazos, y que permiten que el efector final (end effector o plataforma móvil), mantenga su orientación paralela a la base sin importar su posición.

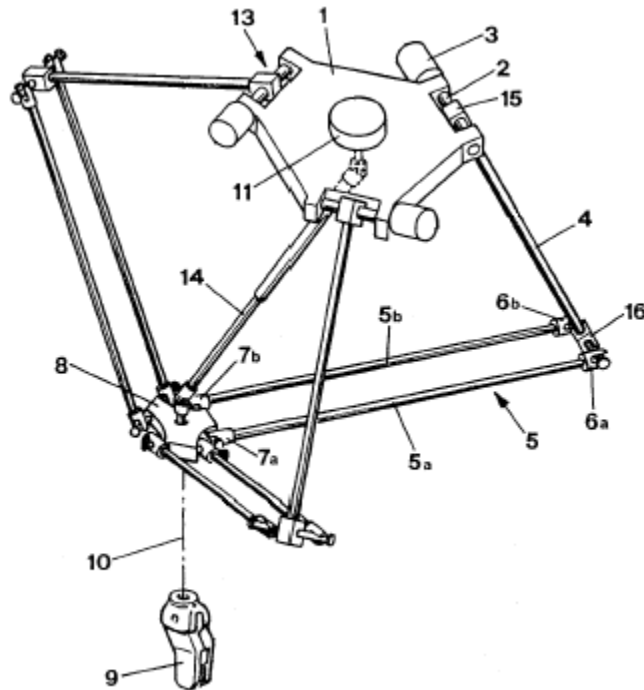
Un paralelogramo permite que una junta de salida permanezca en una orientación fija respecto a una junta de entrada.

5.2 El uso de tres paralelogramos restringe completamente la orientación de la plataforma móvil, la cual permanece con solo tres grados de libertad puramente de traslación.

5.3 Las juntas de entrada de los tres paralelogramos se montan sobre palancas de rotación a la base, éstas a su vez son rotadas mediante actuadores formados por servomotores de AC o DC.

Finalmente se puede incorporar un cuarto grado de libertad mediante un actuador rotativo en la base móvil, lo que permite cambiar su orientación.

5.4 El uso de actuadores montados en la base reduciendo la masa en movimiento de los brazos, permite alcanzar aceleraciones de hasta 50 G en ambientes experimentales o 12 G en aplicaciones industriales. Esto hace que el robot Delta sea el candidato perfecto para operaciones de pick and place de objetos livianos (desde 10 gr hasta 1 kg), con una circunferencia de alcance de aproximadamente 1 m de diámetro [3].



6. CINEMÁTICA

6.1 En la construcción de un robot se deben resolver dos problemas principalmente: Primero, si conocemos la posición deseada para el efector final (por ejemplo, si deseamos alcanzar una pieza) en un punto del espacio tridimensional con coordenadas X, Y y Z, necesitamos determinar los ángulos correspondientes de cada uno de los brazos para mover los motores hacia esa posición. El proceso de determinar tales ángulos se denomina Cinemática inversa [5].

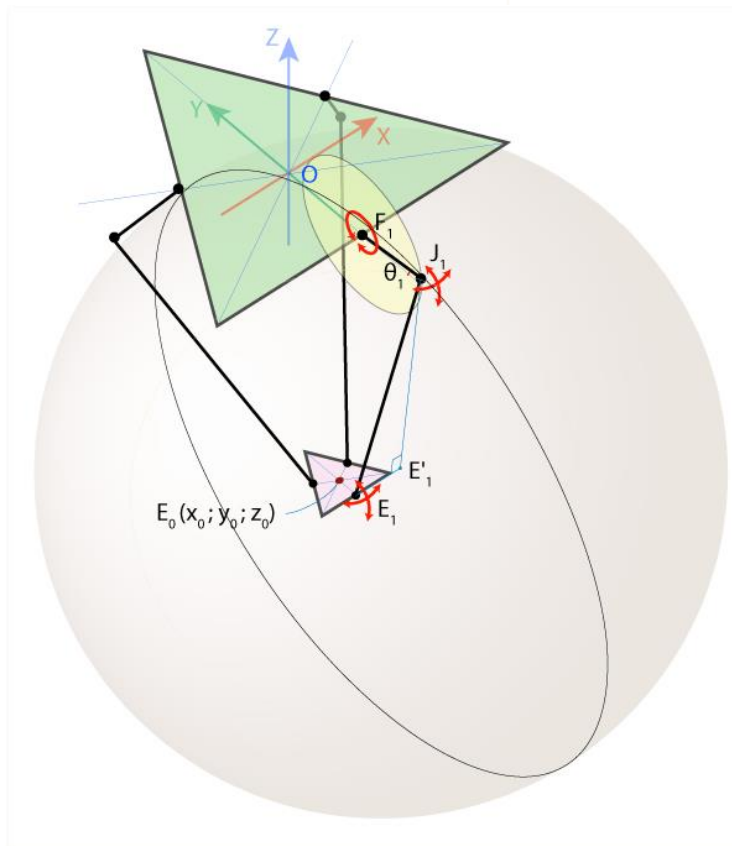
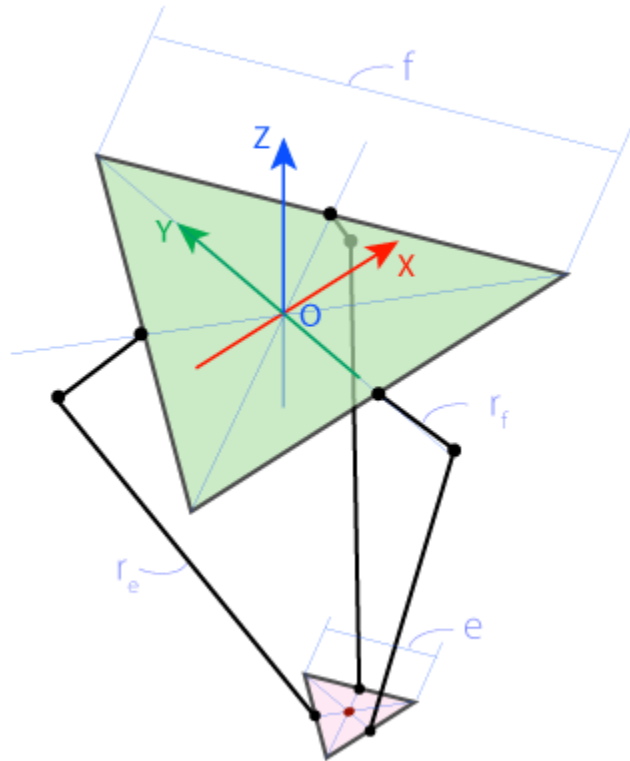
6.2 En segundo lugar, si lo que conocemos son los ángulos (por ejemplo, luego de haber leído la posición angular del brazo por medio de un encoder y queremos realizar ajustes de posición). El proceso de determinar el punto X, Y y Z que tendrá el efector final luego del movimiento se denomina Cinemática directa [5].

6.3 Cinemática inversa

6.3.1 Al observar la figura esquemática del robot Delta, vemos que las plataformas son dos triángulos equiláteros: el verde, fijo con los motores, y el móvil en rosa con el efector final. Los ángulos de junta son θ_1 , θ_2 y θ_3 , y el punto E0 es la posición del efector final con coordenadas (x_0, y_0, z_0) .

6.3.2 Para resolver el problema de la cinemática inversa, debemos crear una función que tome como parámetro el punto E0 con coordenadas (x_0, y_0, z_0) , y retorne θ_1 , θ_2 y θ_3 .

6.3.3 Primero determinamos algunos parámetros clave sobre la geometría del robot.



Designamos el lado del triángulo fijo como f , el lado del triángulo del efector final como e , el largo de la junta superior como r_f , y el largo de la junta del paralelogramo como r_e . El marco de referencia se selecciona con el origen en el centro de simetría del triángulo fijo, de manera que la coordenada Z del efector final, siempre será negativa.

6.3.4 Debido al diseño del robot, la junta F_1J_1 solo puede rotar en el plano XZ , formando un círculo con centro en el punto F_1 y radio r_f . De manera análoga, E_1J_1 puede rotar libremente en

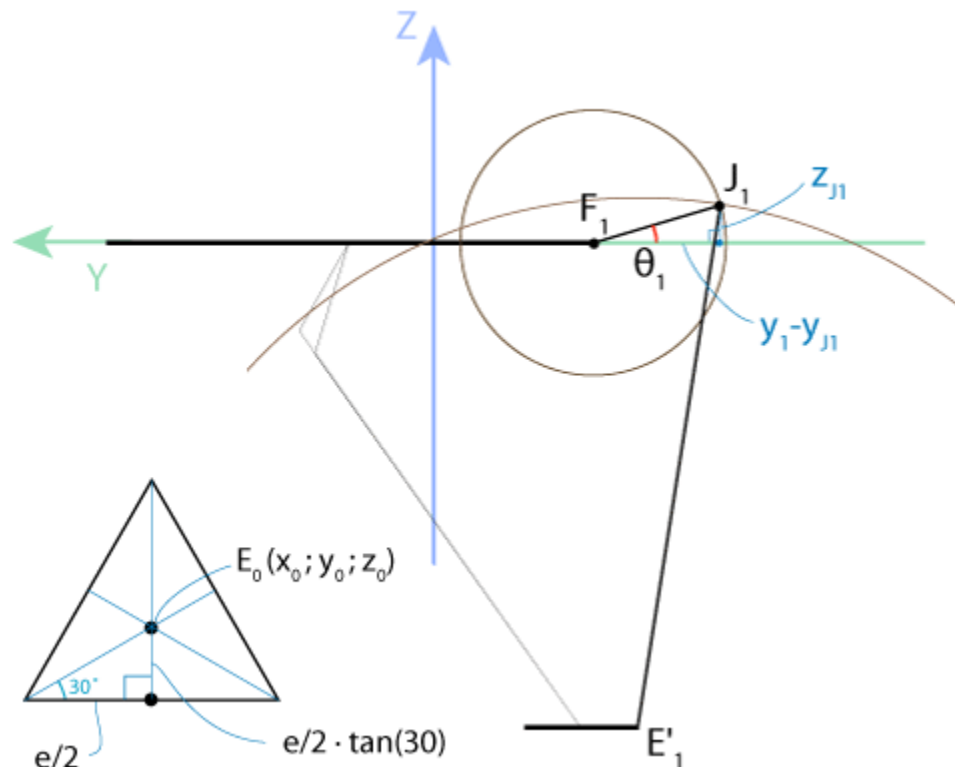
relación a E_1 , formando una esfera con centro en E_1 y radio re .

6.3.5 La intersección de esta esfera con el plano XZ , es un círculo con centro en E'_1 y radio E'_1J_1 , donde E'_1 es la proyección del punto E_1 en el plano XZ .

El punto J_1 se puede encontrar ahora como la intersección de dos círculos de radio conocido y centro en E'_1 y F_1 . Y si conocemos J_1 , podemos calcular el ángulo θ_1 .

6.3.6 Para encontrar el resto de los ángulos, hacemos uso de la simetría del robot. Primero rotamos 120° en sentido antihorario, el sistema de coordenadas en el plano XY alrededor del eje Z .

Ahora tenemos un nuevo marco de referencia $X'Y'Z'$, donde podemos encontrar θ_2 usando el mismo algoritmo. El único cambio es que tenemos que determinar nuevas coordenadas x'_0 y y'_0 para el punto E_0 , Usando una matriz de rotación.



6.3.7 Para encontrar el ángulo θ_3 , tenemos que rotar el marco de referencia en sentido horario.

$$E(x_0, y_0, z_0)$$

$$EE_1 = \frac{e}{2} \tan 30^\circ = \frac{e}{2\sqrt{3}}$$

$$E_1(x_0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0) \Rightarrow E'_1(0, y_0 - \frac{e}{2\sqrt{3}}, z_0)$$

$$E_1E'_1 = x_0 \Rightarrow E'_1J_1 = \sqrt{E_1J_1^2 - E_1E'_1^2} = \sqrt{r_e^2 - x_0^2}$$

$$F_1(0, -\frac{f}{2\sqrt{3}}, 0)$$

$$\begin{cases} (y_{J1} - y_{F1})^2 + (z_{J1} - z_{F1})^2 = r_f^2 \\ (y_{J1} - y_{F1})^2 + (z_{J1} - z_{F1})^2 = r_e^2 - x_0^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (y_{J1} + \frac{f}{2\sqrt{3}})^2 + z_{J1}^2 = r_f^2 \\ (y_{J1} - y_0 + \frac{e}{2\sqrt{3}})^2 + (z_{J1} - z_0)^2 = r_e^2 - x_0^2 \end{cases} \Rightarrow J_1(0, y_{J1}, z_{J1})$$

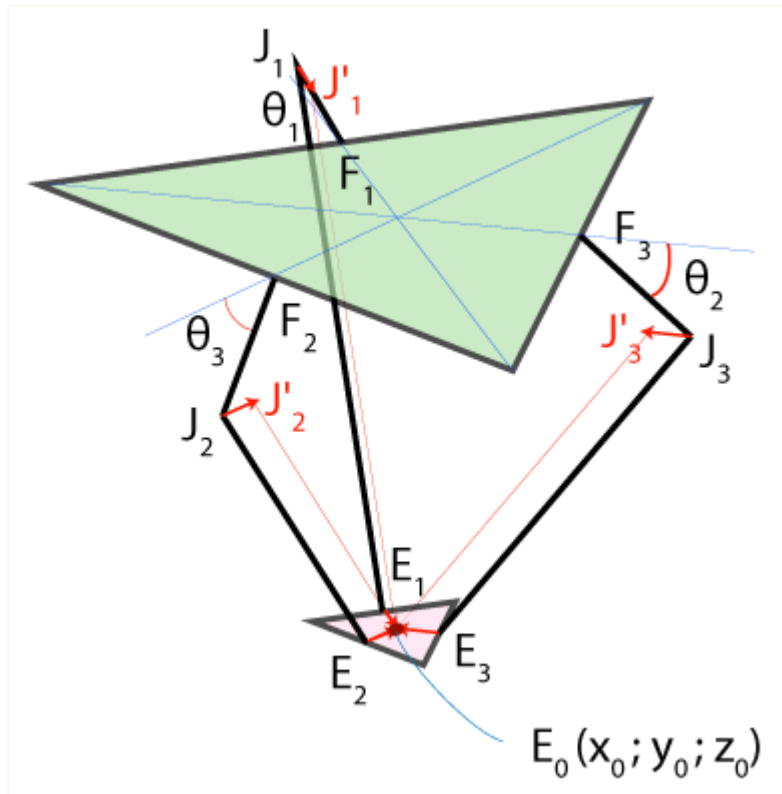
$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_{J1}}{y_{F1} - y_{J1}}\right)$$

6.4 Cinemática directa

6.4.1 En este caso se conocen los ángulos theta1, theta2 y theta3, y necesitamos encontrar las coordenadas (x0, y0, z0) del punto E1 del efector final.

Como conocemos el ángulo theta1, podemos encontrar fácilmente los puntos de coordenada J1, J2 y J3. Las juntas J1E1, J2E2 y J3E3 puede rotar libremente alrededor de los puntos J1, J2 y J3 respectivamente, formando tres esferas de radio re.

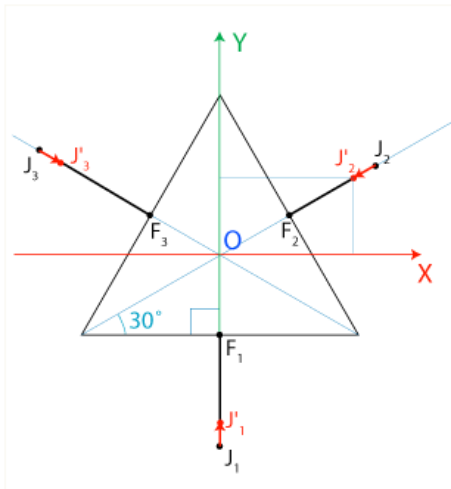
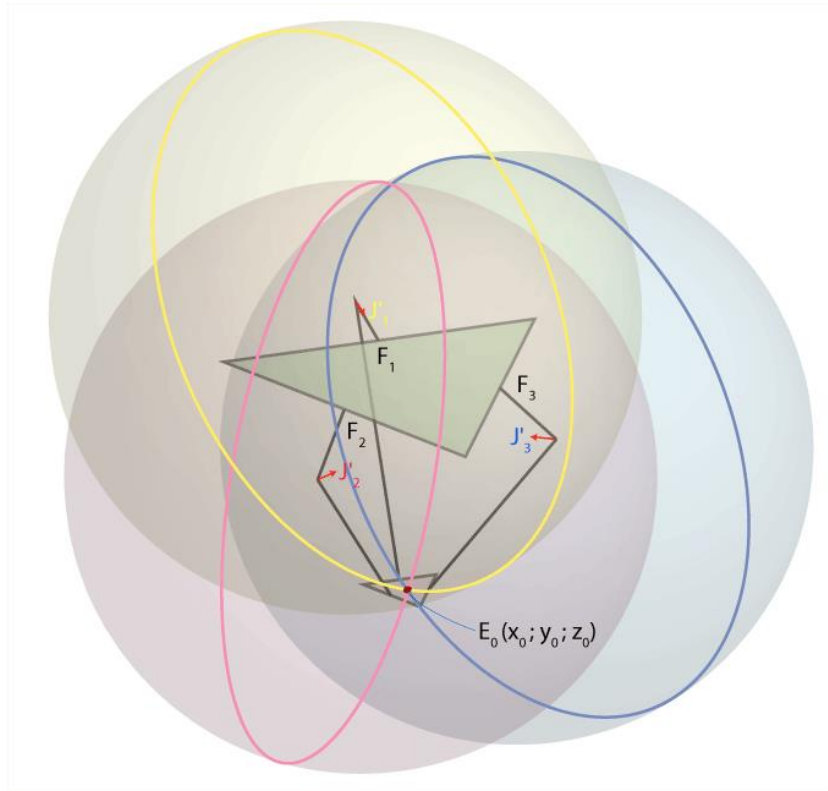
6.4.2 Movemos los centros de las esferas, desde las juntas J1, J2 y J3 hasta los puntos J'1, J'2 y J'3 usando los vectores de transición E1E0, E2E0 y



E3E0 respectivamente. Después de esto, las tres esferas tendrán un punto de intersección en E0.

6.4.3 Entonces, para encontrar las coordenadas (x_0, y_0, z_0) del punto E_0 , tenemos que resolver tres ecuaciones de la forma $(x-x_j)^2+(y-y_j)^2+(z-z_j)^2 = r^2$, donde las coordenadas (x_j, y_j, z_j) de los centros de las esferas y los radios r se conocen.

6.4.4 Primero encontramos las coordenadas de los puntos J'1, J'2 y J'3:



$$\begin{aligned} OF_1 &= OF_2 = OF_3 = f/2 \tan(30) = f/2\sqrt{3} \\ J_1'J_1' &= J_2'J_2' = J_3'J_3' = e/2 \tan(30) = e/2\sqrt{3} \\ F_{J_1J_1} &= r_f \cos(\theta_1), \quad F_{J_2J_2} = r_f \cos(\theta_1), \quad F_{J_3J_3} = r_f \cos(\theta_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J'_1 & (0; -(f-e)/2\sqrt{3} - r_1 \cos(\theta_1); -r_1 \sin(\theta_1)) \\ J'_2 & ([(f-e)/2\sqrt{3} + r_1 \cos(\theta_2)] \cos(30); [(f-e)/2\sqrt{3} + r_1 \cos(\theta_2)] \sin(30); -r_1 \sin(\theta_2)) \\ J'_3 & ([(f-e)/2\sqrt{3} + r_1 \cos(\theta_3)] \cos(30); [(f-e)/2\sqrt{3} + r_1 \cos(\theta_3)] \sin(30); -r_1 \sin(\theta_3)) \end{aligned}$$

6.4.5 En las ecuaciones siguientes, designamos las coordenadas de los puntos J1, J2 y J3 como (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) y (x_3, y_3, z_3) . Hay que notar que $x_0 = 0$:

$$\begin{cases} x^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_e^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_e^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_e^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 - 2y_1y - 2z_1z = r_e^2 - y_1^2 - z_1^2 & (1) \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2x_2x - 2y_2y - 2z_2z = r_e^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 & (2) \\ x^2 + y^2 + z^2 - 2x_3x - 2y_3y - 2z_3z = r_e^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 & (3) \end{cases}$$

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

$$x_2x + (y_1 - y_2)y + (z_1 - z_2)z = (w_1 - w_2)/2 \quad (4) = (1) - (2)$$

$$x_3x + (y_1 - y_3)y + (z_1 - z_3)z = (w_1 - w_3)/2 \quad (5) = (1) - (3)$$

$$(x_2 - x_3)x + (y_2 - y_3)y + (z_2 - z_3)z = (w_2 - w_3)/2 \quad (6) = (2) - (3)$$

From (4)-(5):

$$x = a_1z + b_1 \quad (7)$$

$$y = a_2z + b_2 \quad (8)$$

$$a_1 = \frac{1}{d}[(z_2 - z_1)(y_3 - y_1) - (z_3 - z_1)(y_2 - y_1)] \quad a_2 = -\frac{1}{d}[(z_2 - z_1)x_3 - (z_3 - z_1)x_2]$$

$$b_1 = -\frac{1}{2d}[(w_2 - w_1)(y_3 - y_1) - (w_3 - w_1)(y_2 - y_1)] \quad b_2 = \frac{1}{2d}[(w_2 - w_1)x_3 - (w_3 - w_1)x_2]$$

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

Now we can substitute (7) and (8) in (1):

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

6.4.6 Finalmente, resolvemos la ecuación cuadrática y encontramos z_0 , y luego calculamos x_0 y y_0 de la ecuación (7) y (8).

7. D2

7.1 El objetivo perseguido en el diseño y construcción de este brazo es, que el mismo sirva como plataforma de ensayo de rutinas y código de programación de movimientos.

Al ser una herramienta educativa, no intenta tener la firmeza estructural, precisión y repetibilidad que tiene su contraparte industrial.

7.2 La mayoría de sus partes componentes han sido impresas en 3D utilizando plásticos PLA [1].

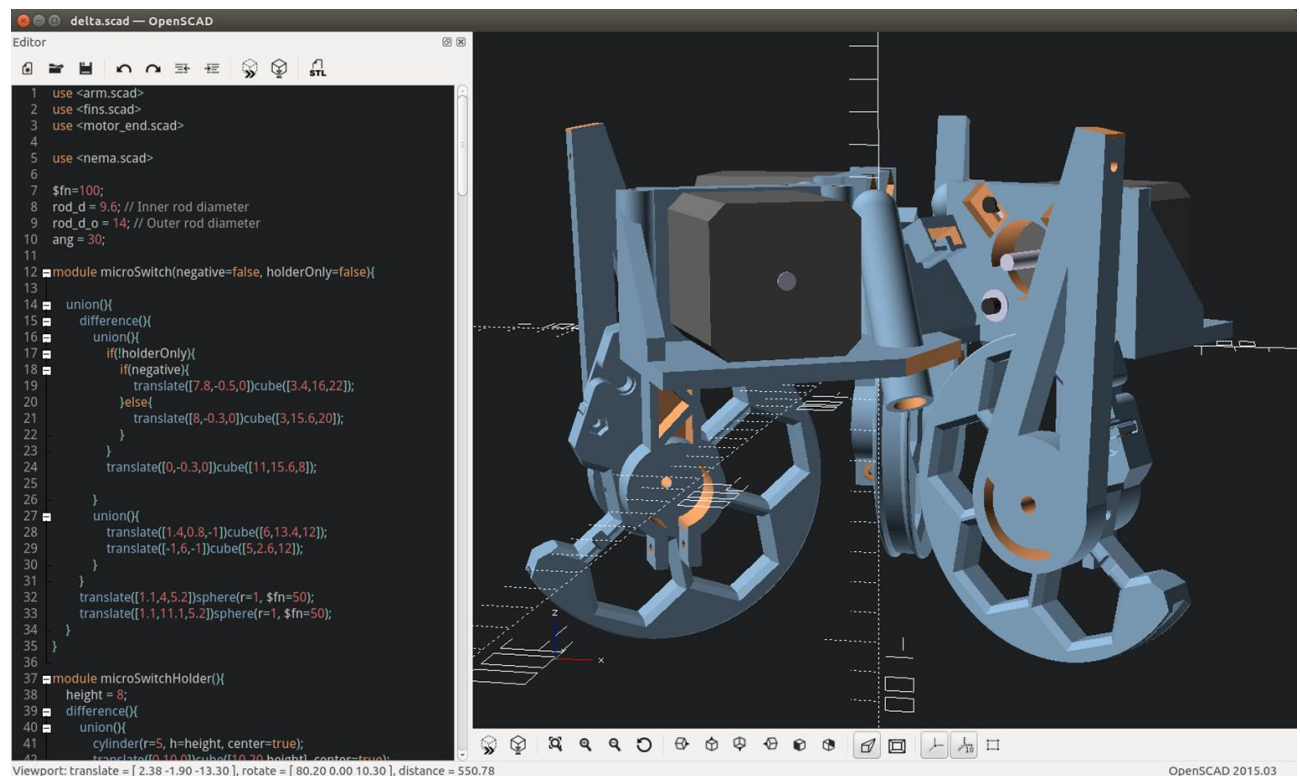
Para la electrónica se eligió la plataforma Arduino y diferentes shields populares en la fabricación de impresoras 3D, debido a su simpleza en la programación y facilidad para adquirir las plaquetas integradas en los comercios locales.

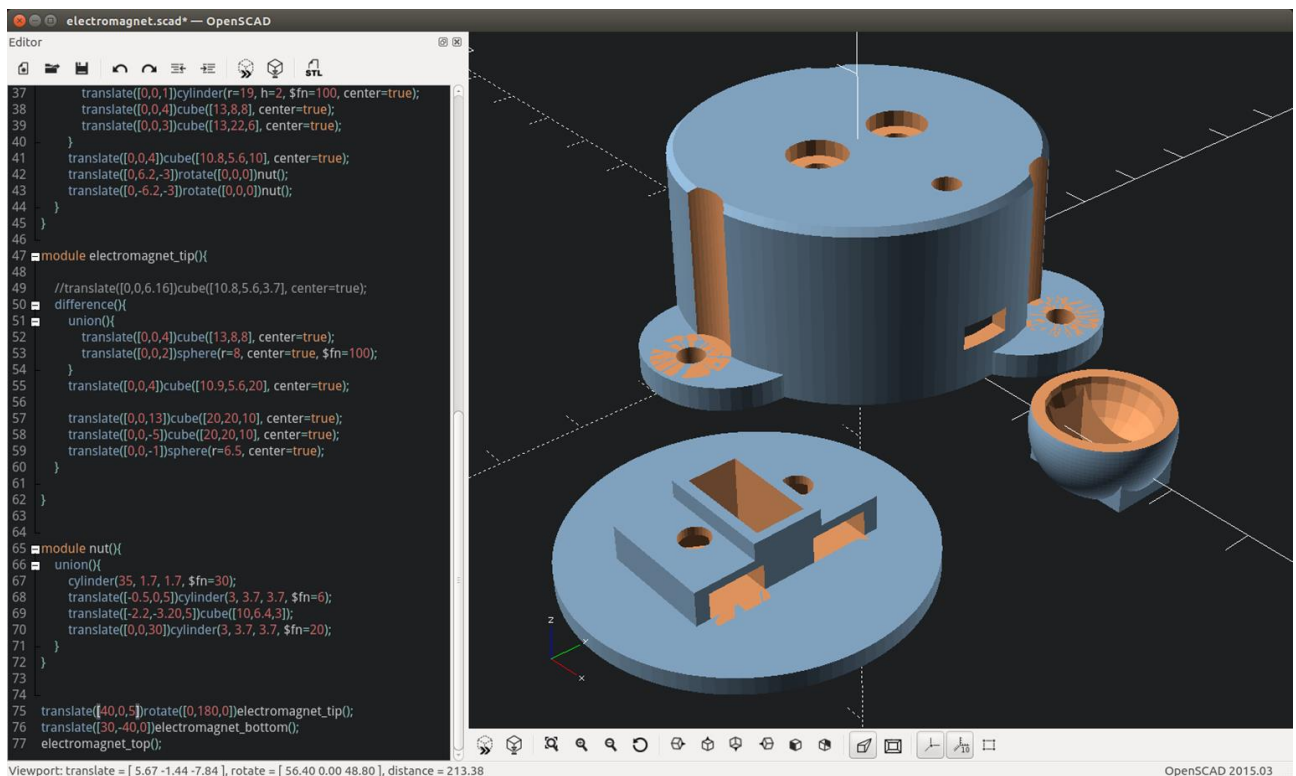
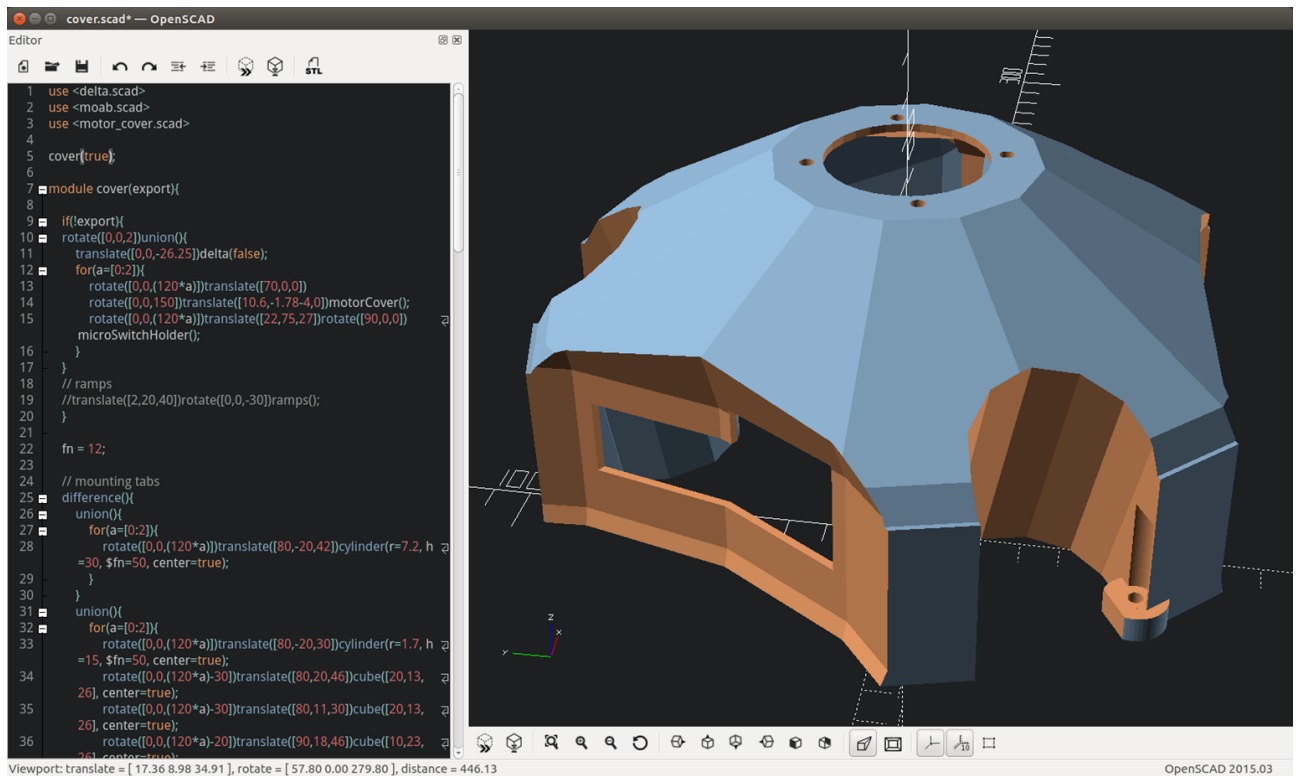
La parte mecánica y de actuadores se resolvió utilizando motores paso a paso del tipo nema 17, debido a que cuentan con el torque suficiente para estas aplicaciones y a la disponibilidad local.

7.3 El proceso de diseño

7.3.1 Para el modelado 3D de las partes, se utilizó el software OpenSCAD [2]. OpenSCAD es una herramienta gratuita y open source que lee un script y lo renderiza, permitiendo una gran flexibilidad a la hora de diseñar piezas de precisión mecánica, ya que se asemeja a un lenguaje de programación. Los diseños luego se exportaron al formato STL para ser impresos en 3D.

7.3.2 A continuación, se muestran algunas capturas de pantalla del software:



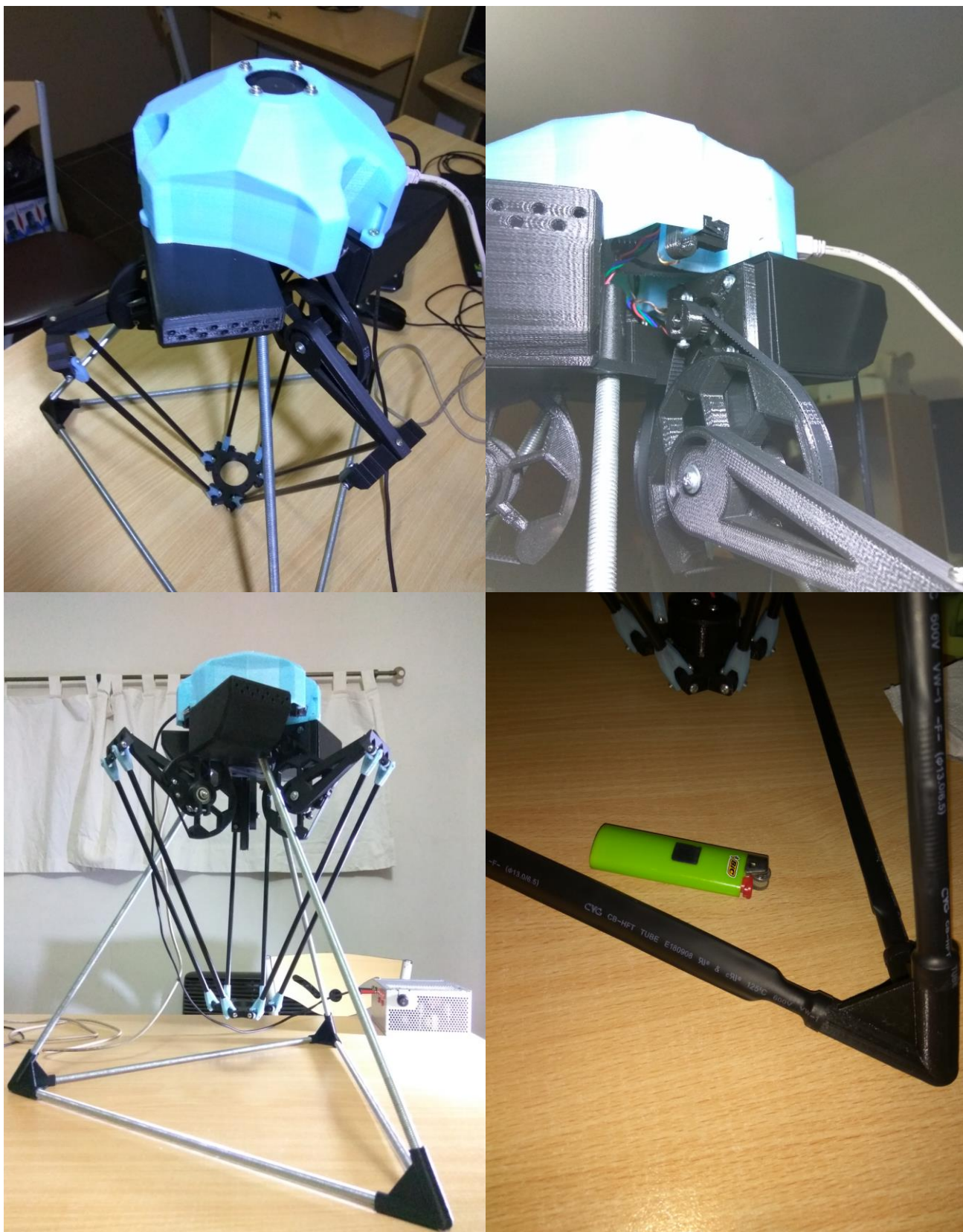


7.3.3 Luego de generadas las diferentes partes en formato STL, se imprimieron en una impresora 3D cartesiana tipo Prusa i3 [1].

Por su topología, este brazo debe ser sostenido “sobre” el área de trabajo. Se confeccionó un soporte tipo tetraedro con barras de hierro roscado de 10 mm unidas en sus extremos entre si, con piezas de plástico impresas en 3D.

7.3.4 A continuación, se muestran fotos del desarrollo del brazo:





8. REFERENCIAS

- [1]. **Impresión 3D**: <http://reprap.org/>
- [2]. **OpenSCAD**: <http://www.openscad.org/>
- [3]. **Delta Robot**: https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_Delta
- [4]. **Reymond Clavel**: https://en.wikipedia.org/wiki/Reymond_Clavel
- [5]. **Cinemática Delta**: <http://forums.trossenrobotics.com/tutorials/introduction-129/delta-robot-kinematics-3276/>
- [6]. **GitHub Proyecto**: <http://github.com/mabraidot>