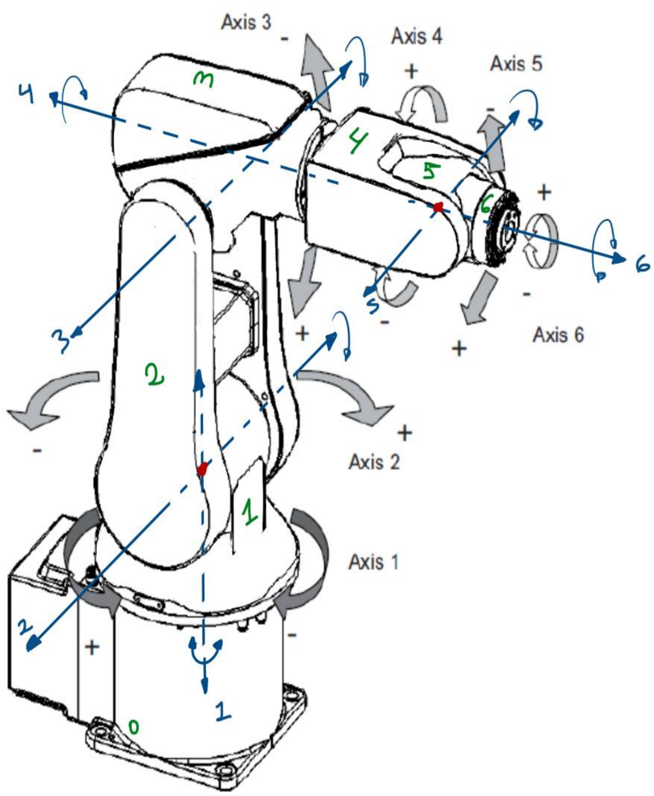
ROBÓTICA - SEGUNDO PARCIAL

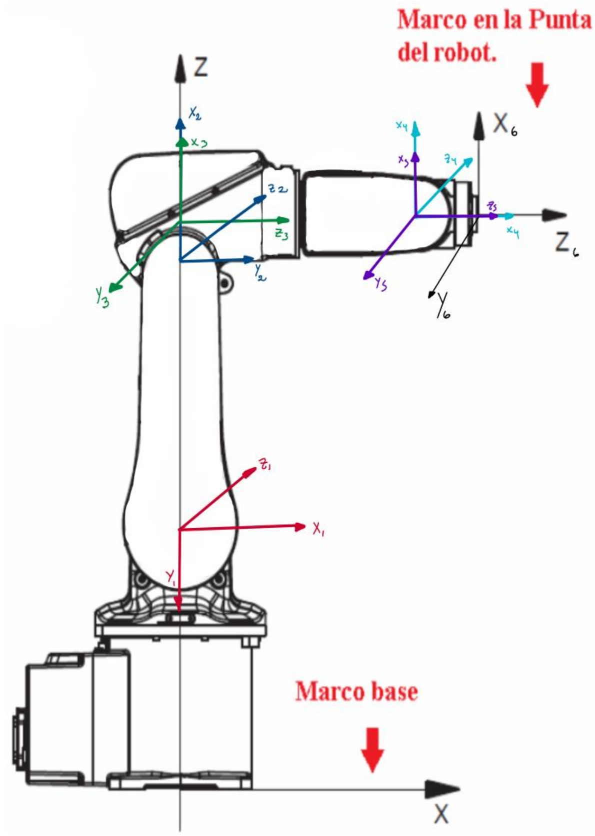
Nombre: Miguel Esteban Flores Sierra

Código: 2310949

1. Utilizando la información técnica suministrada del robot IRB120 de ABB:

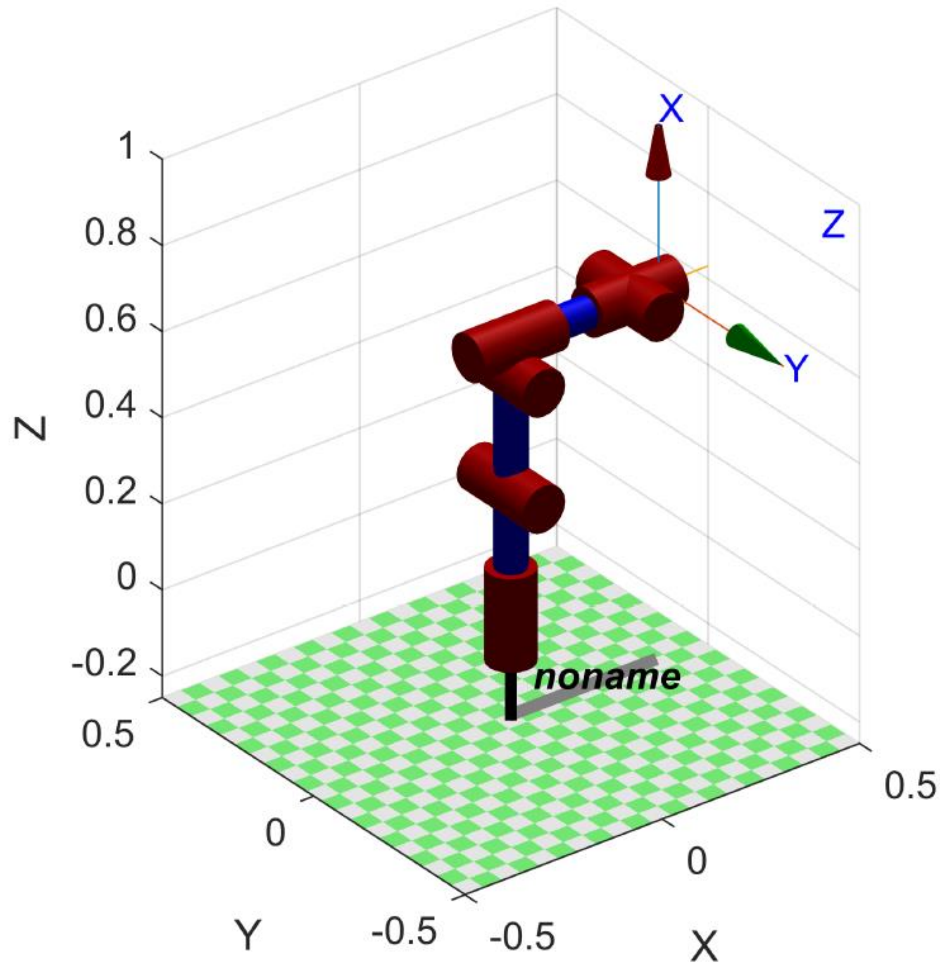
a. (1.0) Dibuje un esquema del robot donde se muestre la ubicación de los marcos anclados a cada eslabón, siguiendo paso a paso el algoritmo de Denavit-Hartenberg. Explique cómo la ubicación de esos marcos es consistente con la información técnica del robot. Corrobore lo anterior usando la librería "Robotic Toolbox" de Peter Corke, en MATLAB.



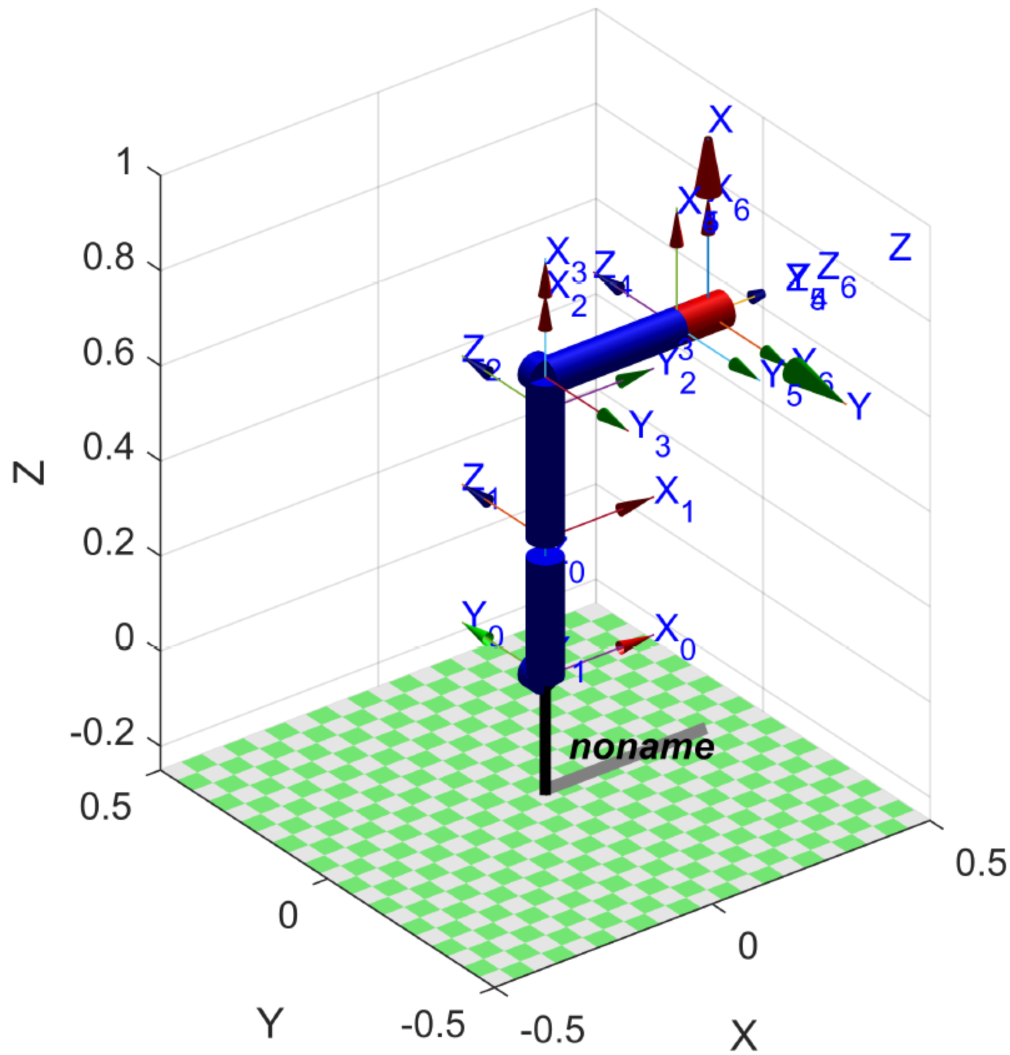


El marco 1 fue ubicado en el Axis 2 debido a que se puede simplificar el Axis 1 y 2 dentro del punto de corte. Para el marco 2, este fue ubicado en el Axis 3, para el marco 3, este no fue ubicado directamente en la articulación del eslabón, esto debido a que una de las características del algoritmo de Denavit-Hartenberg es que los marcos deben estar ubicados secuencialmente siguiendo alguna de las proyecciones de x_{n-i} y z_{n-i}; o en su defecto, ubicarlo en el punto de corte de z_{n-i} y z_n. Ahora, pareciera que por la forma de dibujarlo, tendríamos que ubicarlo en el punto de corte de ambos ejes, pero es solo una ilusión producto de la perspectiva del dibujo; por lo que, se ha ubicado el marco 3 a lo largo del x_2, de este modo podremos proyectar el giro de una manera análoga dentro de MATLAB. Y se tiene que tomar las consideraciones necesarias para ubicar los siguientes marcos (debido al desplazamiento del marco 3 fuera de la articulación). Para los últimos 3 marcos, notamos que sus 3 ejes de rotación se cortan en un mismo punto; por lo que procedemos a ubicar en ese punto los marcos 4 y 5 puesto que proporcionan dicho giro y el marco 6 se ubica en el end effector para producir las rotaciones dentro de las características especificadas.

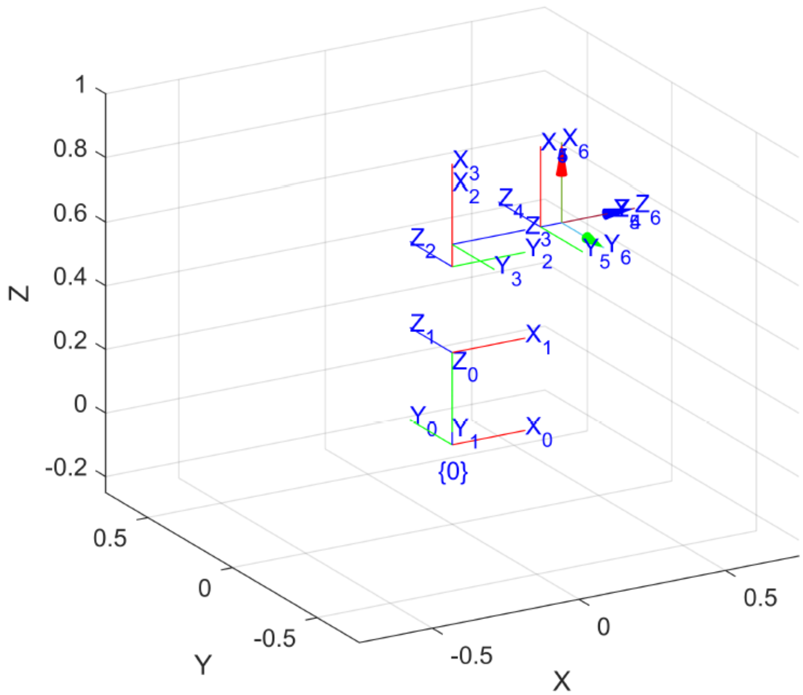
```
clc; clear all; close all
clear imports
import ETS3.*

%======= TABLA DENAVIT - HARTENBERG =======
%                 ESTANDAR
%           _________________________________
%           |-------Z-------|-------X-------|
%           | theta |   d   |   a   | alpha |
%=========================================
%  0_M_1 = |   q1  |  290  |   0   | -pi/2 |
%  1_M_2 = |q2-pi/2|   0   |  270  |   0   |
%  2_M_3 = |   q3  |   0   |  +70  | -pi/2 |
%  3_M_4 = |   q4  |  302  |   0   |  pi/2 |
%  4_M_5 = |   q5  |   0   |   0   | -pi/2 |
%  5_M_6 = |   q6  |  +72  |   0   |   0   |

% DECLARANDO LÍMITES DE CADA ESLABÓN
q1 = [-165 165]*pi/180;
q2 = [-110 110]*pi/180;
q3 = [-110 70]*pi/180;
q4 = [-160 160]*pi/180;
q5 = [-120 120]*pi/180;
q6 = [-400 400]*(pi/180); %*217.8 % (Para Obtener las ±242 revoluciones quitar el
comentario al factor de multiplicación)

% CREANDO ESLABONES A PARTIR DE LA TABLA
%                |----------Z---------|---------X--------------|
%                |  theta   |    d    |    a    |     alpha    |
link_1=Revolute('qlim',  q1, 'd', 0.290, 'a',     0, 'alpha',-pi/2, 'offset',     0);
link_2=Revolute('qlim',  q2, 'd',     0, 'a', 0.270, 'alpha',    0, 'offset', -pi/2);
link_3=Revolute('qlim',  q3, 'd',     0, 'a', 0.070, 'alpha',-pi/2, 'offset',     0);
link_4=Revolute('qlim',  q4, 'd', 0.302, 'a',     0, 'alpha', pi/2, 'offset',     0);
link_5=Revolute('qlim',  q5, 'd',     0, 'a',     0, 'alpha',-pi/2, 'offset',     0);
link_6=Revolute('qlim',  q6, 'd', 0.072, 'a',     0, 'alpha',    0, 'offset',     0);

% ENLAZANDO ESLABONES 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6
links=[link_1;link_2;link_3;link_4;link_5;link_6];

% CREACIÓN DE ROBOT
IRB120=SerialLink(links,'plotopt',{'workspace',[-0.5 0.5 -0.5 0.5 -0.25 1]});
figure(1)
IRB120.teach
figure(2)
IRB120.plot([0 0 0 0 0 0], 'nojoints')
```




```
% UBICACIÓN DE MARCOS EN CADA ARTICULACIÓN
t = 0.25;
M0 = eye(4,4); T(:,:,1) = transl(0,0,0.290)*trotx(270);
M1 = M0*T(:,:,1); T(:,:,2) = trotz(-90)*transl(0.270,0,0);
M2 = M1*T(:,:,2); T(:,:,3) = trotx(-90)*transl(0.070,0,0);
M3 = M2*T(:,:,3); T(:,:,4) = trotx(90)*transl(0,0.302,0);
M4 = M3*T(:,:,4); T(:,:,5) = trotx(-90);
M5 = M4*T(:,:,5); T(:,:,6) = transl(0,0,0.072);
M6 = M5*T(:,:,6);

hold on
trplot(M0, 'rgb','frame','0', 'length', t, 'arrow')
trplot(M1, 'rgb','frame','1', 'length', t, 'arrow')
trplot(M2, 'rgb','frame','2', 'length', t, 'arrow')
trplot(M3, 'rgb','frame','3', 'length', t, 'arrow')
trplot(M4, 'rgb','frame','4', 'length', t, 'arrow')
trplot(M5, 'rgb','frame','5', 'length', t, 'arrow')
trplot(M6, 'rgb','frame','6', 'length', t, 'arrow')
```




```
% UBICACIÓN DE MARCOS EN EL ESPACIO
figure(3)
lmin = -0.75;
lmax = 0.75;
plotvol([lmin lmax lmin lmax -0.25 1])

trplot(M0, 'rgb','frame','0', 'length', t, 'view', [330 20])
trplot(M1, 'rgb','frame','1', 'length', t)
trplot(M2, 'rgb','frame','2', 'length', t)
trplot(M3, 'rgb','frame','3', 'length', t)
trplot(M4, 'rgb','frame','4', 'length', t)
trplot(M5, 'rgb','frame','5', 'length', t)
trplot(M6, 'rgb','frame','6', 'length', t, 'arrow')
```




```matlab
% MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN 0 -> 6
syms q1 q2 q3 q4 q5 q6 theta d a alpha

theta(1)=q1;        d(1)=0.290;     a(1)=0;        alpha(1)= -pi/2;
theta(2)=q2-pi/2;   d(2)=0;         a(2)=0.270;    alpha(2)=  0;
theta(3)=q3;        d(3)=0;         a(3)=0.070;    alpha(3)= -pi/2;
theta(4)=q4;        d(4)=0.302;     a(4)=0;        alpha(4)=  pi/2;
theta(5)=q5;        d(5)=0;         a(5)=0;        alpha(5)= -pi/2;
theta(6)=q6;        d(6)=0.072;     a(6)=0;        alpha(6)=  0;

for i=1:1:6
A(:,:,i)=[cos(theta(i)) -cos(alpha(i))*sin(theta(i)) sin(alpha(i))*sin(theta(i))
a(i)*cos(theta(i));...
          sin(theta(i)) cos(alpha(i))*cos(theta(i)) -sin(alpha(i))*cos(theta(i))
a(i)*sin(theta(i));...
          0 sin(alpha(i)) cos(alpha(i)) d(i);...
          0 0 0 1];
end
for i=1:1:6
    disp(['Matriz de transformación: ',num2str(i-1),'A',num2str(i)])
    A(:,:,i)
end
```

```
Matriz de transformación: 0A1
ans =
```

$$\begin{pmatrix} \cos(q_1) & 0 & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & 0 & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \frac{29}{100} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Matriz de transformación: 1A2
ans =
```

$$\begin{pmatrix} \cos\left(q_2-\frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(q_2-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \frac{27\cos\left(q_2-\frac{\pi}{2}\right)}{100} \\ \sin\left(q_2-\frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(q_2-\frac{\pi}{2}\right) & 0 & \frac{27\sin\left(q_2-\frac{\pi}{2}\right)}{100} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Matriz de transformación: 2A3
ans =
```

$$\begin{pmatrix} \cos(q_3) & 0 & -\sin(q_3) & \frac{7\cos(q_3)}{100} \\ \sin(q_3) & 0 & \cos(q_3) & \frac{7\sin(q_3)}{100} \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Matriz de transformación: 3A4
ans =
```

$$\begin{pmatrix} \cos(q_4) & 0 & \sin(q_4) & 0 \\ \sin(q_4) & 0 & -\cos(q_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{151}{500} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Matriz de transformación: 4A5
ans =
```

$$\begin{pmatrix} \cos(q_5) & 0 & -\sin(q_5) & 0 \\ \sin(q_5) & 0 & \cos(q_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Matriz de transformación: 5A6
ans =
```

$$\begin{pmatrix} \cos(q_6) & -\sin(q_6) & 0 & 0 \\ \sin(q_6) & \cos(q_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{9}{125} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
Tx = T(:,:,1)*T(:,:,2)*T(:,:,3)*T(:,:,4)*T(:,:,5)*T(:,:,6);

Ax = simplify(A(:,:,1)*A(:,:,2)*A(:,:,3)*A(:,:,4)*A(:,:,5)*A(:,:,6));

syms S1 C1 S2 C2 S3 C3 S4 C4 S5 C5 S6 C6 S23 C23

for f=1:1:4
    for c=1:1:4
        Ax_S(f,c)=subs(Ax(f,c),[sin(q1), cos(q1), sin(q2), cos(q2), sin(q3), cos(q3),
sin(q4), cos(q4), sin(q5), cos(q5), sin(q6), cos(q6), sin(q2+q3), cos(q2+q3)],[S1, C1, S2,
C2, S3, C3, S4, C4, S5, C5, S6, C6, S23, C23]);
    end
end
Ax_S
```

Ax_S =

$$\begin{pmatrix} C_6\sigma_2 - S_6\sigma_4 & -C_6\sigma_4 - S_6\sigma_2 & C_1 C_5 C_{23} - S_5\,(S_1 S_4 + C_1 C_2 C_4 S_3 + C_1 C_3 C_4 S_2) & \frac{27 C_1 S_2}{100} + \frac{151 C_1 C_2 C_3}{500} + \frac{7 C_1 C_2 S_3}{100} + \frac{7 C_1 C_3 S_2}{100} - \frac{151 C_1 S_2 S_3}{500} - \frac{9 S_1 S_4 S_5}{125} + \frac{9 C_1 C_2 C_3 C_5}{125} - \frac{9 C_1 C_5 S_2 S_3}{125} - \frac{9 C_1 C_2 C_4 S_3 S_5}{125} - \frac{9 C_1 C_3 C_4 S_2 S_5}{125} \\ C_6\sigma_1 - S_6\sigma_3 & -C_6\sigma_3 - S_6\sigma_1 & C_5 C_{23} S_1 - S_5\,(C_2 C_4 S_1 S_3 - C_1 S_4 + C_3 C_4 S_1 S_2) & \frac{27 S_1 S_2}{100} + \frac{151 C_2 C_3 S_1}{500} + \frac{7 C_2 S_1 S_3}{100} + \frac{7 C_3 S_1 S_2}{100} + \frac{9 C_1 S_4 S_5}{125} - \frac{151 S_1 S_2 S_3}{500} + \frac{9 C_2 C_3 C_5 S_1}{125} - \frac{9 C_5 S_1 S_2 S_3}{125} - \frac{9 C_2 C_4 S_1 S_3 S_5}{125} - \frac{9 C_3 C_4 S_1 S_2 S_5}{125} \\ -C_6\sigma_5 - C_{23} S_4 S_6 & S_6\sigma_5 - C_6 C_{23} S_4 & -C_5 S_{23} - C_4 C_{23} S_5 & \frac{27 C_2}{100} - \frac{7 S_2 S_3}{100} + \frac{7 C_2 C_3}{100} - \frac{151 C_2 S_3}{500} - \frac{151 C_3 S_2}{500} - \frac{9 C_2 C_5 S_3}{125} - \frac{9 C_3 C_5 S_2}{125} - \frac{9 C_2 C_3 C_4 S_5}{125} + \frac{9 C_4 S_2 S_3 S_5}{125} + \frac{29}{100} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

where

$$\sigma_1 = C_{23} S_1 S_5 - C_1 C_5 S_4 + C_2 C_4 C_5 S_1 S_3 + C_3 C_4 C_5 S_1 S_2$$

$$\sigma_2 = C_1 C_{23} S_5 + C_5 S_1 S_4 + C_1 C_2 C_4 C_5 S_3 + C_1 C_3 C_4 C_5 S_2$$

$$\sigma_3 = C_1 C_4 + C_2 S_1 S_3 S_4 + C_3 S_1 S_2 S_4$$

$$\sigma_4 = C_1 C_2 S_3 S_4 - C_4 S_1 + C_1 C_3 S_2 S_4$$

$$\sigma_5 = S_5 S_{23} - C_4 C_5 C_{23}$$

b. (2.5) Obtenga y Compruebe la cinemática inversa del robot. Explique en detalle el proceso que siguió para conseguir y probar las ecuaciones de q1, q2, q3, q4, q5 y q6. Debe corroborar la cinemática inversa, sin verificación no es válido el punto.

Desacoplo cinemático

El método de desacoplo cinemático es aplicable a aquellos robots cuyos 3 últimos DoF se cortan en un solo punto. Gracias a esto podemos separar el problema en 2 modelos; modelo cinemático inverso de posición, y modelo cinemático inverso de orientación.

Debido a la alta complejidad para calcular por un solo método, se ha optado por resolver el problema en 2 partes, la primera parte se realiza el análisis por el método geométrico a los 3 primeros eslabones, y la segunda parte se realiza el análisis por el método de la matriz de transformación homogénea a los 3 últimos eslabones.

A nuestra matriz final para cual deseamos obtener los ángulos para cada articulación la llamaremos FDLOM (Final Desired Location Orientation Matrix). Ésta nos proveerá de la matriz de rotación final de 3x3 y nuestra posición en el espacio 3x1.

- **MÉTODO GEOMÉTRICO PARA LOS 3 PRIMEROS DoF**

Lo primero a analizar es la siguiente figura puesto representa la geometría de los 3 primeros eslabones con relación a sus articulaciones. Nos damos cuenta de que tiene la característica requerida que los 3 ejes se corten en un punto siendo estos ($\vec{z_3}, \vec{z_4}, \vec{z_5}$), podemos observar además que los últimos 3 grados de libertad (z_4, z_5, z_6) no afectan ni modifican la posición del punto central de la muñeca del robot, que dicho punto central de la muñeca está determinado por los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3.

Por lo que podemos representar el vector del origen del marco de referencia de la base hacia el origen de la muñeca como $\overrightarrow{\mathrm{pm}}$ y el vector del origen del marco de referencia de la base hacia el origen del extremo del robot como $\overrightarrow{\mathrm{pr}}$, entonces la relación entre el marco de la muñeca y el marco del punto final del robot viene estando dada por:

$$\overrightarrow{\mathrm{pm}} = \overrightarrow{\mathrm{pr}} - 0.072 * \vec{z_6}$$

Siendo $\overrightarrow{\mathrm{pr}}$: $[\mathrm{px\ py\ pz}]$

$\overrightarrow{\mathrm{pm}}$: $[\mathrm{pmx\ pmy\ pmz}]$

Vamos a calcular el θ_1 en función de los vectores de posición final y la orientación z en el marco 6:

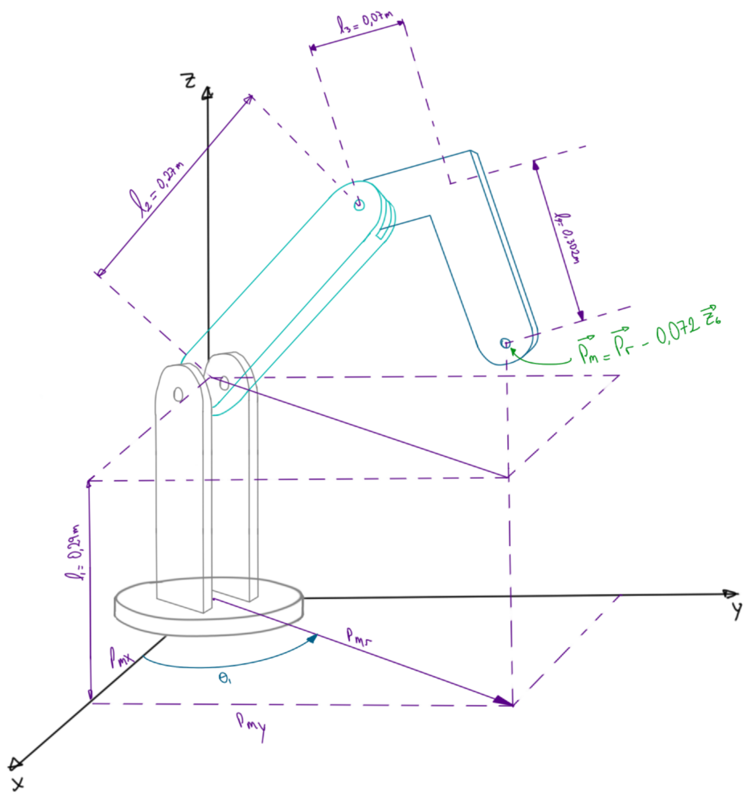
$$\theta_1 = \mathrm{atan}\left(\frac{\mathrm{pmy}}{\mathrm{pmx}}\right)$$

Siendo $\mathrm{pmx} = \mathrm{px}$ - 0.072*ax

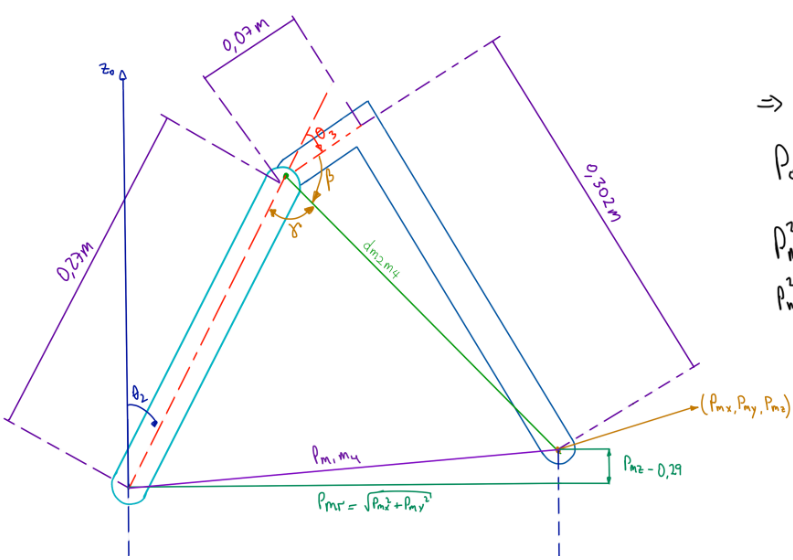
$\mathrm{pmy} = \mathrm{py}$ - 0.072*ay

$\mathrm{pmz} = \mathrm{pz}$ - 0.072*az

```
syms nx ox ax px ny oy ay py nz oz az pz
FDLOM = [nx, ox, ax, px;...
         ny, oy, ay, py;...
         nz, oz, az, pz;...
          0,  0,  0,  1];
pmx= FDLOM(1,4) - 0.072*FDLOM(1,3);
pmy= FDLOM(2,4) - 0.072*FDLOM(2,3);
pmz= FDLOM(3,4) - 0.072*FDLOM(3,3);
```




```
theta1 = atan2(pmy,pmx);
```



$$\Rightarrow \beta = tg^{-1}(0{,}302/0{,}07)$$

Por ley de cosenos

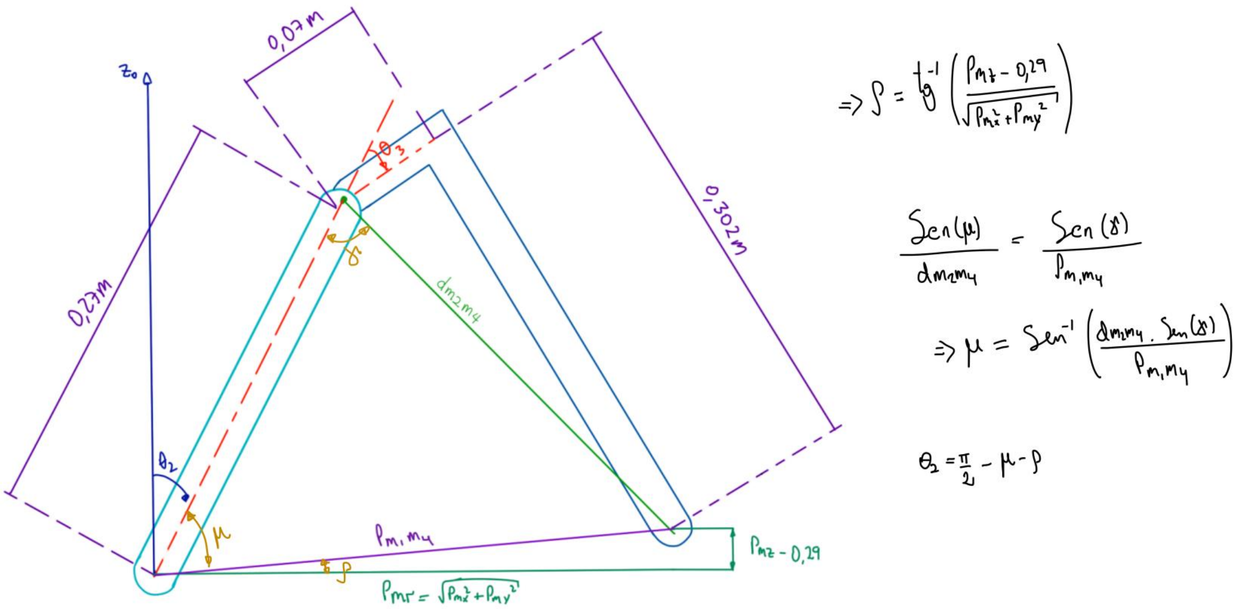
$$P_{m_1m_4}^2 = 0{,}27^2 + d_{m_2m_4}^2 - 2\cdot 0{,}27\cdot d_{m_2m_4}\cos\gamma$$

$$P_{m_1m_4}^2 - 0{,}27^2 - d_{m_2m_4}^2 = -2\cdot 0{,}27\cdot d_{m_2m_4}\cdot\cos\gamma$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{P_{m_1m_4}^2 - 0{,}27^2 - d_{m_2m_4}^2}{-2\cdot 0{,}27\cdot d_{m_2m_4}}\right)$$

$$\theta_3 = \pi - \gamma - \beta$$

```
beta = atan(0.302/0.070);
dm2m4 = sqrt(0.070^2 + 0.302^2);
pm1m4 = sqrt(pmx^2 + pmy^2 + (pmz - 0.290)^2);
gamma = acos((pm1m4^2  - 0.270^2 - dm2m4^2)/(-2*0.270*dm2m4));
theta3 = pi - gamma - beta;
```




```
rho = atan((pmz - 0.290)/(sqrt(pmx^2 + pmy^2)));
mhu = asin((dm2m4*sin(gamma))/pm1m4);
theta2 = pi/2 - mhu - rho;
```

- **MÉTODO DE LA MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA PARA LOS 3 ÚLTIMOS DoF**

Para esta última parte hemos descompuesto nuestra matriz de transformación en una matriz de rotación, para la orientación del end effector del robot. Siendo esta ${}^{0}R_{6}$ = [**n o a**]. Posterior a esto tenemos que identificar y extraer nuestra matriz de rotación final deseada:

$$FDLOM = \begin{bmatrix} nx & ox & ax & px \\ ny & oy & ay & py \\ nz & oz & az & pz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Siendo nuestra matriz de rotación deseada la matriz de 3x3 morada a la cual llamaremos (DOMik - Desired Orientation Matrix for inverse kinematics). A la cual tendremos que multiplicar la matriz inversa de ${}^{0}R_{3}$ la cual ya sería conocida gracias a los valores previamente obtenidos de los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3. A esta matriz la denominaremos R123i (La i por ser la **inversa** de la matriz de rotación resultante de: ${}^{0}R_{1} * {}^{1}R_{2} * {}^{2}R_{3}$). Ahora para la última parte para la obtención de las 3 ecuaciones finales buscaremos la matriz resultante de:

${}^{3}R_4 * {}^{4}R_5 * {}^{5}R_6$. La cual tendrá todas sus variables únicamente en función de los ángulos θ_4, θ_5 y θ_6. Ya con estas 3 partes podemos presentar la ecuación para despejar todos los valores de los ángulos θ_4, θ_5 y θ_6 siendo así:

$${}^{3}R_6 = {}^{0}R_3^{-1} * DOMik$$

```
R123i = simplify(inv(A(1:3,1:3,1)*A(1:3,1:3,2)*A(1:3,1:3,3)))
```

R123i =

$$\begin{pmatrix} \sin(q_2+q_3)\cos(q_1) & \sin(q_2+q_3)\sin(q_1) & \cos(q_2+q_3) \\ \sin(q_1) & -\cos(q_1) & 0 \\ \cos(q_2+q_3)\cos(q_1) & \cos(q_2+q_3)\sin(q_1) & -\sin(q_2+q_3) \end{pmatrix}$$

```
R456 = simplify(A(1:3,1:3,4)*A(1:3,1:3,5)*A(1:3,1:3,6))
```

R456 =

$$\begin{pmatrix} \cos(q_4)\cos(q_5)\cos(q_6) - \sin(q_4)\sin(q_6) & -\cos(q_6)\sin(q_4) - \cos(q_4)\cos(q_5)\sin(q_6) & -\cos(q_4)\sin(q_5) \\ \cos(q_4)\sin(q_6) + \cos(q_5)\cos(q_6)\sin(q_4) & \cos(q_4)\cos(q_6) - \cos(q_5)\sin(q_4)\sin(q_6) & -\sin(q_4)\sin(q_5) \\ \cos(q_6)\sin(q_5) & -\sin(q_5)\sin(q_6) & \cos(q_5) \end{pmatrix}$$

```
syms S1 C1 S2 C2 S3 C3 S4 C4 S5 C5 S6 C6 S23 C23
for f=1:1:3
    for c=1:1:3
        R123iS(f,c)=subs(R123i(f,c),[sin(q1), cos(q1), sin(q2), cos(q2), sin(q3),
cos(q3), sin(q4), cos(q4), sin(q5), cos(q5), sin(q6), cos(q6), sin(q2+q3),
cos(q2+q3)],[S1, C1, S2, C2, S3, C3, S4, C4, S5, C5, S6, C6, S23, C23]);
        R456S(f,c)=subs(R456(f,c),[sin(q1), cos(q1), sin(q2), cos(q2), sin(q3), cos(q3),
sin(q4), cos(q4), sin(q5), cos(q5), sin(q6), cos(q6), sin(q2+q3), cos(q2+q3)],[S1, C1, S2,
C2, S3, C3, S4, C4, S5, C5, S6, C6, S23, C23]);

    end
end

% MATRIZ DE POSICIÓN Y ORIENTACIÓN FINAL DESEADA
% FDLOM = [nx,ox,ax,px;...
%          ny,oy,ay,py;...
%          nz,oz,az,pz;...
%           0, 0, 0, 1];

% DOMik = [nx,ox,ax;...
%          ny,oy,ay;...
%          nz,oz,az]
DOMik = FDLOM(1:3,1:3)
```

DOMik =

$$\begin{pmatrix} nx & ox & ax \\ ny & oy & ay \\ nz & oz & az \end{pmatrix}$$

```
left_eq = R456S
```

left_eq =

$$\begin{pmatrix} C_4\,C_5\,C_6 - S_4\,S_6 & -C_6\,S_4 - C_4\,C_5\,S_6 & -C_4\,S_5 \\ C_4\,S_6 + C_5\,C_6\,S_4 & C_4\,C_6 - C_5\,S_4\,S_6 & -S_4\,S_5 \\ C_6\,S_5 & -S_5\,S_6 & C_5 \end{pmatrix}$$

```
right_eq = simplify(R123iS*DOMik)
```

right_eq =

$$\begin{pmatrix} C_{23}\,\mathrm{nz} + C_1\,S_{23}\,\mathrm{nx} + S_1\,S_{23}\,\mathrm{ny} & C_{23}\,\mathrm{oz} + C_1\,S_{23}\,\mathrm{ox} + S_1\,S_{23}\,\mathrm{oy} & C_{23}\,\mathrm{az} + C_1\,S_{23}\,\mathrm{ax} + S_1\,S_{23}\,\mathrm{ay} \\ S_1\,\mathrm{nx} - C_1\,\mathrm{ny} & S_1\,\mathrm{ox} - C_1\,\mathrm{oy} & S_1\,\mathrm{ax} - C_1\,\mathrm{ay} \\ C_1\,C_{23}\,\mathrm{nx} - S_{23}\,\mathrm{nz} + C_{23}\,S_1\,\mathrm{ny} & C_1\,C_{23}\,\mathrm{ox} - S_{23}\,\mathrm{oz} + C_{23}\,S_1\,\mathrm{oy} & C_1\,C_{23}\,\mathrm{ax} - S_{23}\,\mathrm{az} + C_{23}\,S_1\,\mathrm{ay} \end{pmatrix}$$

Aquí podemos apreciar que en la parte derecha (right_eq) todos los valores en la matriz son valores conocidos, es decir los valores de DOMik junto a los ángulos θ_1, θ_2 y θ_3 y sus funciones trigonométricas. Por lo que para realizar el análisis correcto debemos escoger qué variables entre ambas partes de la ecuación se pueden igualar de tal forma que podamos obtener los valores de los ángulos θ_4, θ_5 y θ_6.

```
left_eq = R456;
right_eq = simplify(R123i*DOMik);

equal_ = left_eq == right_eq;

e_1=simplify(equal_(3,3));
syms f_q5(ax,ay,az,q1,q2,q3) % DEFINIR FUNCIÓN PARA Q5 EN TÉRMINOS ax,ay,az,q1,q2 y q3
f_q5(ax,ay,az,q1,q2,q3)=solve(e_1,q5)
```

f_q5(ax, ay, az, q1, q2, q3) =

$$\begin{pmatrix} \mathrm{acos}\left(\cos(q_2+q_3)\ (\mathrm{ax}\cos(q_1) + \mathrm{ay}\sin(q_1)) - \mathrm{az}\sin(q_2+q_3)\right) \\ -\mathrm{acos}\left(\cos(q_2+q_3)\ (\mathrm{ax}\cos(q_1) + \mathrm{ay}\sin(q_1)) - \mathrm{az}\sin(q_2+q_3)\right) \end{pmatrix}$$

```
e_2=simplify(equal_(2,3));
syms f_q4(ax,ay,az,q1,q5) % DEFINIR FUNCIÓN PARA Q4 EN TÉRMINOS ax, ay, az, q1, q5
f_q4(ax,ay,az,q1,q5)=solve(e_2,q4)
```

f_q4(ax, ay, az, q1, q5) =

$$\begin{pmatrix} \mathrm{asin}\left(\dfrac{\mathrm{ay}\cos(q_1) - \mathrm{ax}\sin(q_1)}{\sin(q_5)}\right) \\ \pi - \mathrm{asin}\left(\dfrac{\mathrm{ay}\cos(q_1) - \mathrm{ax}\sin(q_1)}{\sin(q_5)}\right) \end{pmatrix}$$

```
e_3=simplify(equal_(3,1));
syms f_q6(nx,ny,nz,q1,q2,q3,q5) % DEFINIR FUNCIÓN PARA Q6 EN TÉRMINOS nx,ny,nz,q1,q2,q3 y q5
f_q6(nx,ny,nz,q1,q2,q3,q5)=solve(e_3,q6)
```

f_q6(nx, ny, nz, q1, q2, q3, q5) =

$$\begin{pmatrix} \pi + \mathrm{acos}\left(\dfrac{\mathrm{nz}\sin(q_2+q_3) - \cos(q_2+q_3)\ (\mathrm{nx}\cos(q_1) + \mathrm{ny}\sin(q_1))}{\sin(q_5)}\right) \\ \pi - \mathrm{acos}\left(\dfrac{\mathrm{nz}\sin(q_2+q_3) - \cos(q_2+q_3)\ (\mathrm{nx}\cos(q_1) + \mathrm{ny}\sin(q_1))}{\sin(q_5)}\right) \end{pmatrix}$$

```
% IGUALAMOS LOS VALORES DE (3,3), (2,3), (3,1)
% R456S(3,3) = right_eq(3,3) || OBTENEMOS θ5
% R456S(2,3) = right_eq(2,3) || OBTENEMOS θ4
% R456S(3,1) = right_eq(3,1) || OBTENEMOS θ6
nx = DOMik(1,1); ox = DOMik(1,2); ax = DOMik(1,3);
ny = DOMik(2,1); oy = DOMik(2,2); ay = DOMik(2,3);
nz = DOMik(3,1); oz = DOMik(3,2); az = DOMik(3,3);

theta5 = acos(cos(theta2 + theta3)*(ax*cos(theta1) + ay*sin(theta1)) - az*sin(theta2 +
theta3));
theta4 = asin((ay*cos(theta1) - ax*sin(theta1))/sin(theta5));
theta6 = pi - acos((nz*sin(theta2 + theta3) - cos(theta2 + theta3)*(nx*cos(theta1) +
ny*sin(theta1)))/sin(theta5));
```

c. (1.5) Calcule los valores de q1, q2, q3, q4, q5 y q6 si se tiene la siguiente orientación y posición del marco en la punta del robot

$$\begin{pmatrix} 0.5194 & 0.3355 & 0.7859 & 0.3116 \\ 0.0629 & -0.9322 & 0.3564 & 0.3898 \\ 0.8522 & -0.1357 & -0.5053 & 0.5039 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

```
FDLOM = [0.5194  0.3355  0.7859 0.3116;...
         0.0629 -0.9322  0.3564 0.3898;...
         0.8522 -0.1357 -0.5053 0.5039;...
         0       0       0      1];

% MÉTODO GEOMÉTRICO
pmx= FDLOM(1,4) -0.072*FDLOM(1,3);
pmy= FDLOM(2,4) -0.072*FDLOM(2,3);
pmz= FDLOM(3,4) -0.072*FDLOM(3,3);

theta1 = atan2(pmy,pmx);

beta = atan(0.302/0.070);
dm2m4 = sqrt(0.070^2 + 0.302^2);
pm1m4 = sqrt(pmx^2 + pmy^2 + (pmz - 0.290)^2);
gamma = acos((pm1m4^2  - 0.270^2 - dm2m4^2)/(-2*0.270*dm2m4));
theta3 = pi - gamma - beta;

rho = atan((pmz - 0.290)/(sqrt(pmx^2 + pmy^2)));
mhu = asin((dm2m4*sin(gamma))/pm1m4);
theta2 = pi/2 - mhu - rho;
```

```
% DESACOPLO CINEMÁTICO
DOMik = FDLOM(1:3,1:3);
nx = DOMik(1,1); ox = DOMik(1,2); ax = DOMik(1,3);
ny = DOMik(2,1); oy = DOMik(2,2); ay = DOMik(2,3);
nz = DOMik(3,1); oz = DOMik(3,2); az = DOMik(3,3);

theta5 = acos(cos(theta2 + theta3)*(ax*cos(theta1) + ay*sin(theta1)) - az*sin(theta2 +
theta3));
theta4 = asin((ay*cos(theta1) - ax*sin(theta1))/sin(theta5));
theta6 = pi - acos((nz*sin(theta2 + theta3) - cos(theta2 + theta3)*(nx*cos(theta1) +
ny*sin(theta1)))/sin(theta5));

disp(['θ1: ',num2str(theta1),' rads || ',num2str(theta1*180/pi),' °'])
```

```
θ1: 0.95985 rads || 54.9955 °
```

```
disp(['θ2: ',num2str(theta2),' rads || ',num2str(theta2*180/pi),' °'])
```

```
θ2: 0.52354 rads || 29.9966 °
```

```
disp(['θ3: ',num2str(theta3),' rads || ',num2str(theta3*180/pi),' °'])
```

```
θ3: -0.34885 rads || -19.9877 °
```

```
disp(['θ4: ',num2str(theta4),' rads || ',num2str(theta4*180/pi),' °'])
```

```
θ4: -0.87276 rads || -50.0057 °
```

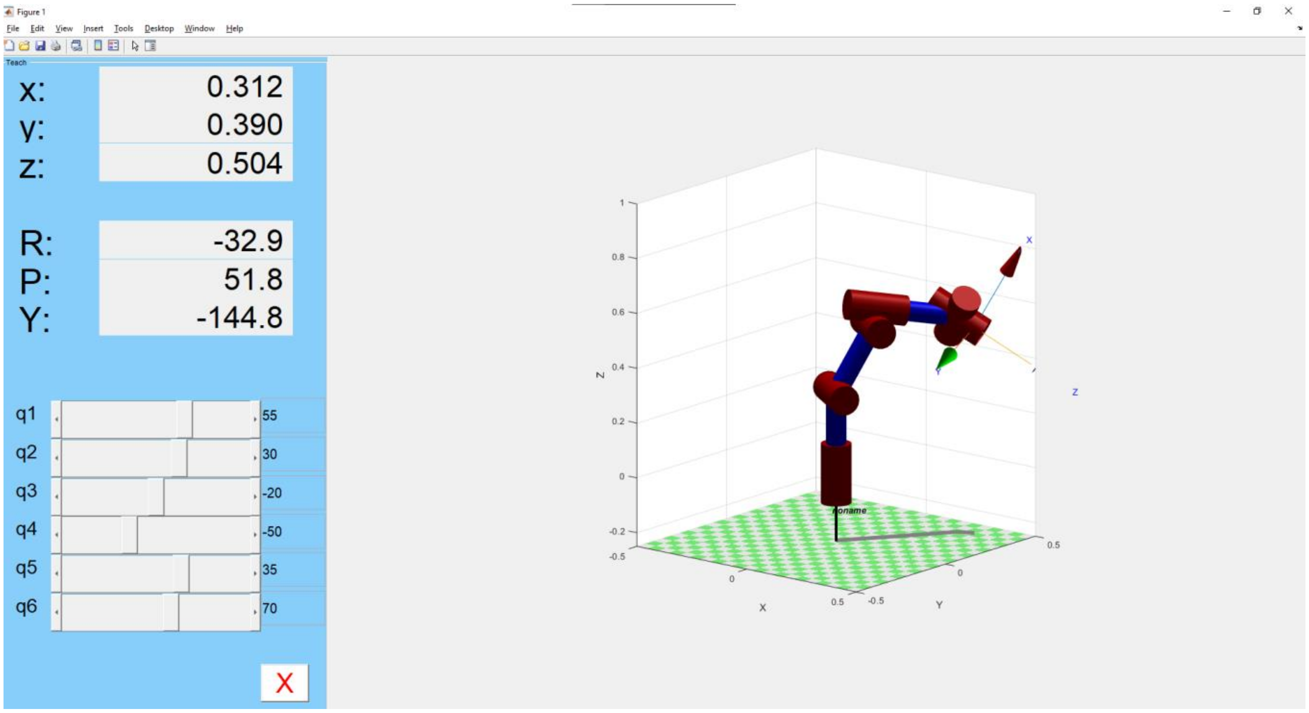
```
disp(['θ5: ',num2str(theta5),' rads || ',num2str(theta5*180/pi),' °'])
```

```
θ5: 0.61066 rads || 34.9881 °
```

```
disp(['θ6: ',num2str(theta6),' rads || ',num2str(theta6*180/pi),' °'])
```

```
θ6: 1.2219 rads || 70.0083 °
```

```
figure(4)
angles = [theta1 theta2 theta3 theta4 theta5 theta6];
IRB120.teach(angles, 'view', [39.32 14.73], 'rpy')
```




```
% COMPROBACIÓN DE ÁNGULOS OBTENIDOS PARA VERIFICAR LA MATRIZ OBTENIDA CON LA MATRIZ SOLICITADA
for f=1:1:4
    for c=1:1:4
        Ax_F(f,c)=subs(Ax(f,c),[q1,q2,q3,q4,q5,q6],angles);
    end
end
Ax_F = round(double(Ax_F),4)
```

```
ans = 4×4
    0.5194    0.3355    0.7859    0.3116
    0.0629   -0.9322    0.3564    0.3898
    0.8522   -0.1357   -0.5053    0.5039
         0         0         0    1.0000
```

```
isequal(FDLOM, double(Ax_F))
```

```
ans = logical
   1
```