

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Buenos Aires



Asignatura: Robótica

Prof: Ing. Hernán Giannetta

**Tesis: Desarrollo del Modelo Cinemático
Completo de un Robot tipo SCARA de 4
Grados de Libertad**

Alumnos: Mobrici, Emiliano y Ermida Damian

Fecha de Entrega: 07/08/2009

Aprobado

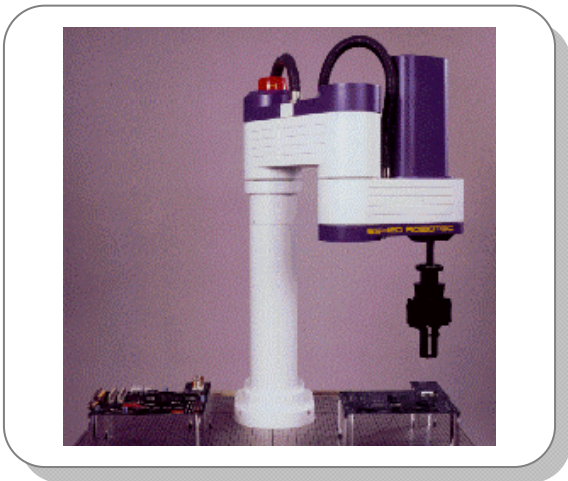
INDICE

EL ROBOT SCARA Y SUS APLICACIONES	3
PRESENTACIÓN DEL MODELO A CALCULAR	4
RESOLUCIÓN DEL MODELO:	5
MODELO CINEMÁTICO DIRECTO	5
MODELO CINEMÁTICO INVERSO	8
VERIFICACIÓN DEL MODELO CINEMÁTICO INVERSO	9
DIMENSIONAMIENTO DEL ROBOT (TAMAÑO Y LÍMITES DE MOVIMIENTO)	11
CONSIDERACIONES DE LAS SIMULACIONES:	12
SIMULACIONES PARA DIMENSIONAMIENTO:	13
ELECCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN	18
DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO	19
CONCLUSIONES	20
BIBLIOGRAFÍA	21

El Robot SCARA y Sus Aplicaciones

Los robots de tipo SCARA obtienen su nombre del acrónimo inglés “*Selective Compliant Articulated Robot Arm*”, bautizado así por sus creadores de la Universidad de Yamanashi, Japón. El primer SCARA comercial fue presentado en 1981 por Sankyo Seiki, Pentel y NEC. Y desde su presentación marcó un nuevo concepto en líneas de ensamble y montaje ya que fue específicamente diseñado con ese propósito.

Son ampliamente utilizados en diferentes industrias y en diferentes aplicaciones, por ello existen en muchas configuraciones tamaños y topologías. Algunas de ellas pueden apreciarse en las fotos que a continuación se muestran.



Un robot tipo SCARA tiene libertad total de movimientos en los ejes X e Y pero severamente limitados en sus desplazamientos sobre el eje Z. Básicamente, se comportan de forma similar al brazo humano, permitiendo situar al extremo de la mano en cualquier ubicación pero siempre sobre el mismo plano. En el eje vertical solo realizan manipulaciones simples que habitualmente consisten en presionar, tomar y desplazarse unos pocos centímetros.

Generalmente poseen pocos grados de libertad (entre 3 y 4) lo que los hace verdaderamente simple tanto en su diseño y construcción como en su utilización. Esta

ventaja también hace que el control del mismo sea sencillo logrando altas velocidades de respuesta y gran precisión.

Debido a estas altas prestaciones son ampliamente utilizados aún en líneas de montaje de componentes electrónicos, proceso conocido también como “pick and place”, donde la precisión es un factor fundamental debido al grado de miniaturización que se ha conseguido.

Algunos de los parámetros con que habitualmente se los caracteriza son:

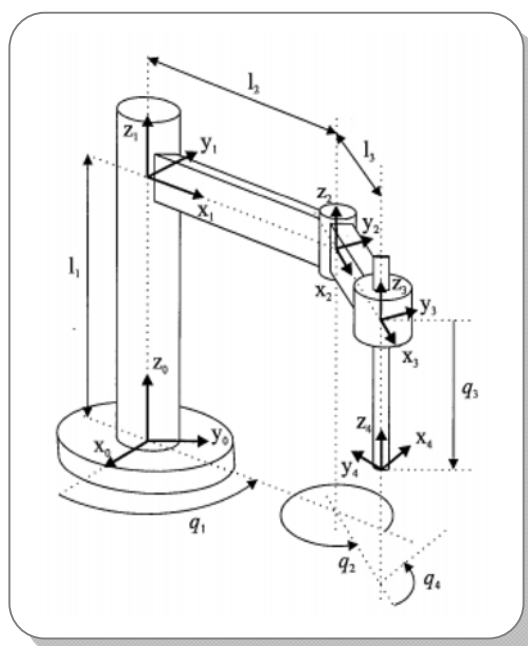
- Velocidad.
- Repetitividad.
- Capacidad de carga.
- Formas de fijación.
- Cantidad de grados de libertad.
- Tipo de control.

Finalmente podemos concluir que realizar un análisis de este tipo de robots es provechoso tanto para desarrollar las herramientas y poder obtener un modelo que pueda construirse como así también para clarificar los conceptos y permitir una mejor comprensión de modelos con más grados de libertad y por ende mas complejos.

Presentación del Modelo a Calcular

El modelo sobre el cual haremos el diseño y cálculo es el formado por una de las topologías mas clásicas del los SCARA cuya fijación se encuentra sobre el suelo y las articulaciones se desarrollan hacia arriba, con 3 grados de libertad principales y un cuarto que se utiliza sólo para dar orientación al actuador que se coloque en el extremo de la cadena cinemática.

A continuación se presenta una figura que describe con mayor claridad el modelo a calcular.

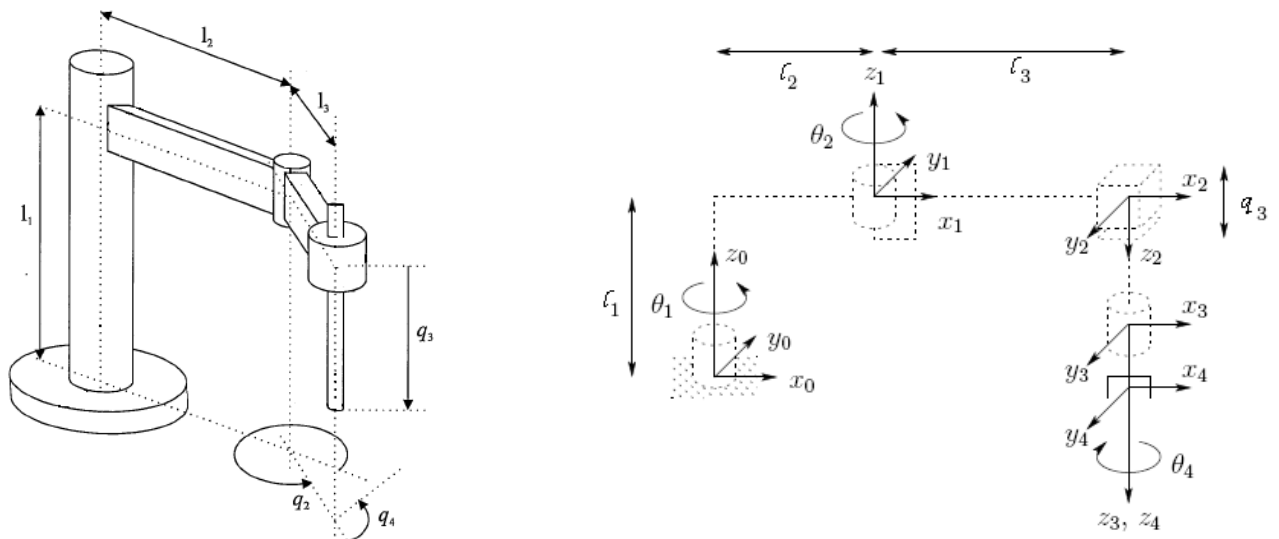


Resolución del Modelo:

Modelo Cinemático Directo

Aplicando el algoritmo de Denavit-Hartenberg ubicamos los sistemas de referencia de todos los grados de libertad que posee el modelo de nuestro SCARA. A continuación detallamos las 16 reglas que posee el algoritmo para que sea más clara la comprensión del resultado.

- **DH1.**Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (ultimo eslabón móvil). Se numerara como eslabón 0 a la base fija del robot.
- **DH2.**Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).
- **DH3.**Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
- **DH4.**Para i de 0 a n-1, situar el eje Z_i , sobre el eje de la articulación i+1.
- **DH5.**Situar el origen del sistema de la base (S_0) en cualquier punto del eje Z_0 . Los ejes X_0 e Y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 .
- **DH6.**Para i de 1 a n-1, situar el sistema (S_i) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Z_i con la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría (S_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos (S_i) se situaría en la articulación i+1.
- **DH7.**Situar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i .
- **DH8.**Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con X_i y Z_i .
- **DH9.**Situar el sistema (S_n) en el extremo del robot de modo que Z_n coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .
- **DH10.**Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i queden paralelos.
- **DH11.**Obtener D_i como la distancia, medida a lo largo de Z_{i-1} , que habría que desplazar (S_{i-1}) para que X_i y X_{i-1} quedasen alineados.
- **DH12.**Obtener A_i como la distancia medida a lo largo de X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo (S_{i-1}) para que su origen coincidiese con (S_i).
- **DH13.**Obtener α_i como el ángulo que habría que girar entorno a X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}), para que el nuevo (S_{i-1}) coincidiese totalmente con (S_i).
- **DH14.**Obtener las matrices de transformación $i-1A_i$.
- **DH15.**Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$.
- **DH16.**La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y posición (submatriz de traslación) del extremo referido ala base en función de las n coordenadas articulares.



Con el modelo y los sistemas de referencia de cada una de las articulaciones planteados estamos en condiciones de obtener los parámetros de Denavit-Hartenberg que nos permitirán plantear las matrices transferencia parciales de cada articulación.

	Θ	D	a	α
1	q_1	l_1	L_2	0
2	q_2	0	L_3	180°
3	0	0	0	0
4	q_4	q_3	0	0

Recordemos que la forma general de las matrices A es la siguiente:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En base a los parámetros de Denavit- Hartenberg obtenemos entonces las matrices de transferencia parciales 0A_1 , 1A_2 , 2A_3 y 3A_4 :

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & l_2 \cos q_1 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & l_2 \sin q_1 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = |I|$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & \sin q_2 & 0 & l_3 \cos q_2 \\ \sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & l_3 \sin q_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ahora debemos hallar la matriz homogénea de la cadena cinemática completa y esta se calcula multiplicando las matrices de transferencia parciales de la siguiente manera:

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4$$

Multiplicando parcialmente las matrices obtenemos la matriz homogénea T

$${}^0A_1 {}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2 & \cos q_1 \text{sen} q_2 + \text{sen} q_1 \cos q_1 & 0 & l_2 \cos q_1 + l_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2) \\ \text{sen} q_1 \cos q_2 + \cos q_1 \text{sen} q_2 & \text{sen} q_1 \text{sen} q_2 - \cos q_1 \cos q_2 & 0 & l_2 \text{sen} q_1 + l_3 (\cos q_2 \text{sen} q_1 + \cos q_1 \text{sen} q_2) \\ 0 & 0 & -1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdot I = \begin{bmatrix} \cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2 & \cos q_1 \text{sen} q_2 + \text{sen} q_1 \cos q_1 & 0 & l_2 \cos q_1 + l_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2) \\ \text{sen} q_1 \cos q_2 + \cos q_1 \text{sen} q_2 & \text{sen} q_1 \text{sen} q_2 - \cos q_1 \cos q_2 & 0 & l_2 \text{sen} q_1 + l_3 (\cos q_2 \text{sen} q_1 + \cos q_1 \text{sen} q_2) \\ 0 & 0 & -1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos q_4 (\cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2) + \cos q_4 (\cos q_1 \text{sen} q_2 + \text{sen} q_1 \cos q_1) & -\text{sen} q_4 (\cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2) + \cos q_4 (\cos q_1 \text{sen} q_2 + \text{sen} q_1 \cos q_1) & 0 & l_2 \cos q_1 + l_3 (\cos q_1 \cos q_2 - \text{sen} q_1 \text{sen} q_2) \\ \cos q_4 (\text{sen} q_1 \cos q_2 + \cos q_1 \text{sen} q_2) + \text{sen} q_4 (\text{sen} q_1 \text{sen} q_2 - \cos q_1 \cos q_2) & -\text{sen} q_4 (\text{sen} q_1 \cos q_2 + \cos q_1 \text{sen} q_2) + \cos q_4 (\text{sen} q_1 \text{sen} q_2 - \cos q_1 \cos q_2) & 0 & l_2 \text{sen} q_1 + l_3 (\cos q_2 \text{sen} q_1 + \cos q_1 \text{sen} q_2) \\ 0 & 0 & -1 & l_1 - q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A continuación hallamos las posiciones respecto de la posición de referencia que en este caso es el origen del sistema de referencia (x_0, y_0, z_0):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Como resultado obtenemos que las posiciones en función del sistema de referencia (x_0, y_0, z_0) y de los valores que toman cada una de las articulaciones están dadas por las siguientes ecuaciones.

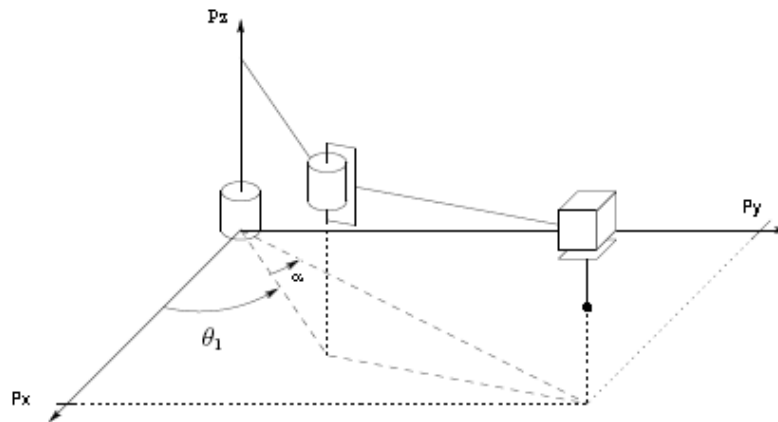
$$Px = l_2 \cdot \cos q_1 + l_3 \cos(q_1 + q_2)$$

$$Py = l_2 \cdot \text{sen} q_1 + l_3 \text{sen}(q_1 + q_2)$$

$$Pz = l_1 - q_3$$

Modelo Cinemático Inverso

Para analizar el robot SCARA desde el punto de vista de la cinemática inversa vamos a considerar el siguiente gráfico:

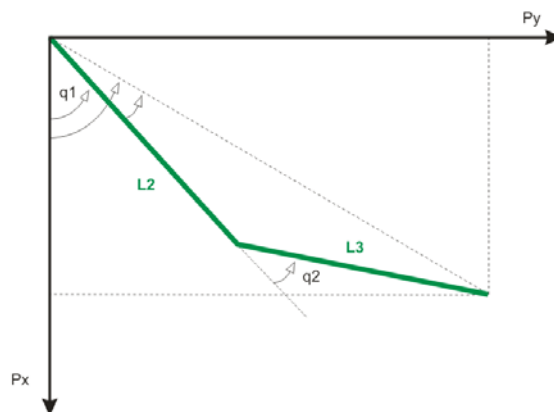


En el observamos que es posible definir independientemente el desplazamiento sobre el eje z, que sólo depende de la articulación dada por q_3 y el desplazamiento en el plano xy, dado por los ángulos θ_1 y θ_2 .

Según lo antedicho y considerando los resultados obtenidos del análisis directo podemos hallar en forma inmediata los resultados para el desplazamiento q_3 :

$$q_3 = l_1 - P_z$$

Para obtener los ángulos θ_1 y θ_2 consideramos:



A continuación planteamos el teorema del coseno, según el cual

$$Px^2 + Py^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos q_2 \Rightarrow \cos q_2 = \frac{Px^2 + Py^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}$$

$$q_2 = \arccos\left(\frac{Px^2 + Py^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3}\right)$$

Luego

$$q1 = \beta - \alpha \qquad \beta = \arctg \frac{Py}{Px} \qquad \alpha = \arctg \frac{l_3 \cdot \text{sen} q2}{l_2 + l_3 \cos q2}$$

Con lo cual

$$q1 = \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \cdot \text{sen} q2}{l_2 + l_3 \cos q2}\right)$$

Debido a que la variable $q4$ sólo nos da un valor de rotación de la última articulación y no influye en la posición del extremo del SCARA utilizaremos las tres ecuaciones halladas anteriormente.

$$q2 = \arccos\left(\frac{Px^2 + Py^2 - l_2^2 - l_3^2}{2 \cdot l_2 \cdot l_3}\right)$$

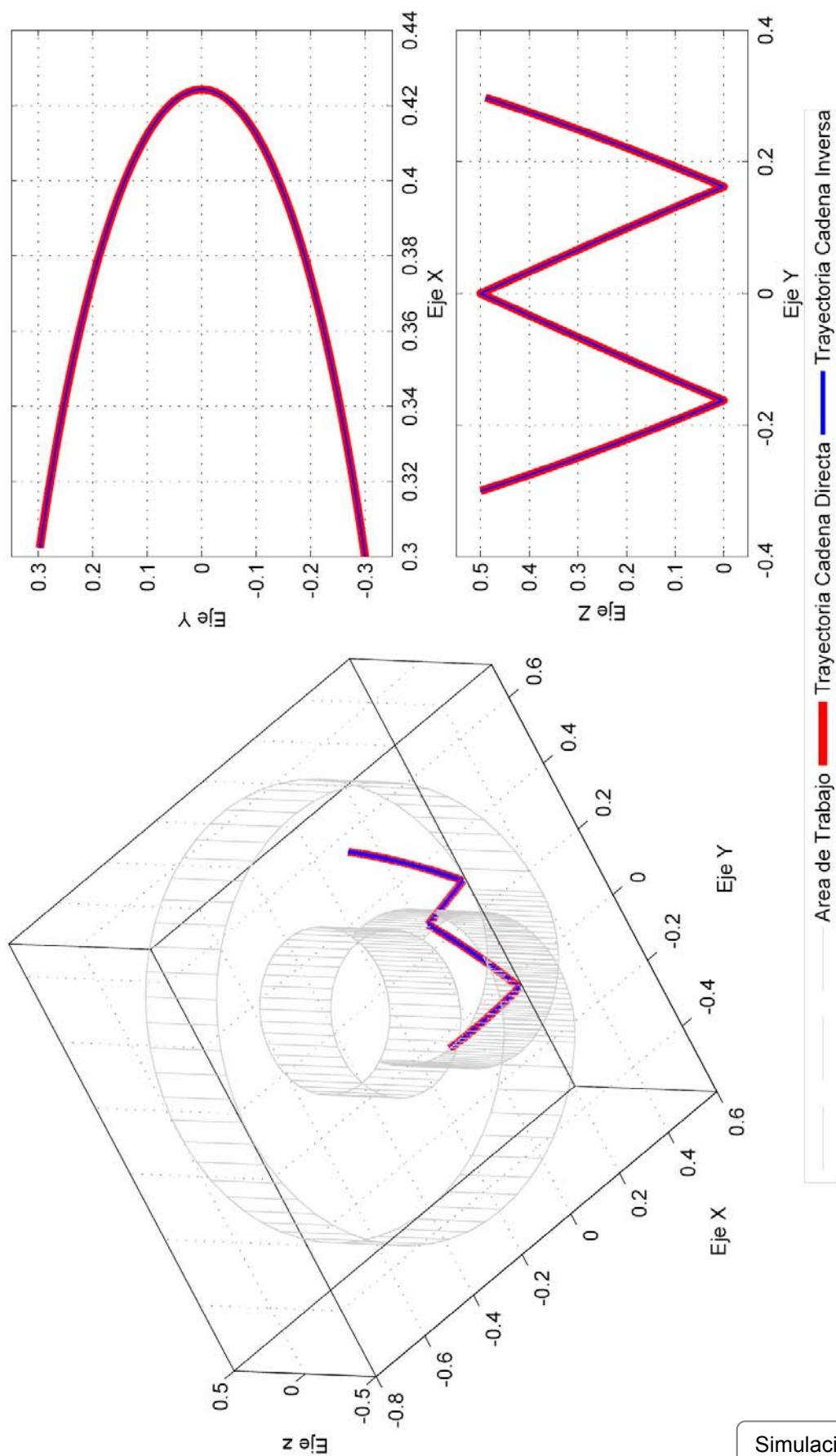
$$q1 = \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) - \arctg\left(\frac{l_3 \cdot \text{sen} q2}{l_2 + l_3 \cos q2}\right)$$

$$q3 = l_1 - Pz$$

Verificación del Modelo Cinemático Inverso

Para verificar si las ecuaciones halladas en el modelo cinemático inverso son las adecuadas podríamos calcular para una determinada posición que valores de deberían tener las articulaciones (q_i) y con dichos valores y las ecuaciones del modelo cinemático directo hallar los valores de coordenadas que estas últimas arrojan. Si estos valores son iguales a los que planteamos al comienzo podremos afirmar que el las ecuaciones halladas son correctas.

Para hacerlo de un modo más gráfico y automático generamos un script de MATLAB detallado en el Anexo III “*Verificación del Modelo Cinemático Inverso*” en el cual generamos una trayectoria utilizando el modelo cinemático directo y la graficamos, con los valores de posición generados hallamos los valores que deben tener cada una de las articulaciones para cada punto de la trayectoria utilizando el modelo cinemático inverso, con estos nuevos valores y usando el modelo directo graficamos otra trayectoria, si ambas coinciden el modelo inverso es correcto.



Simulación N°11

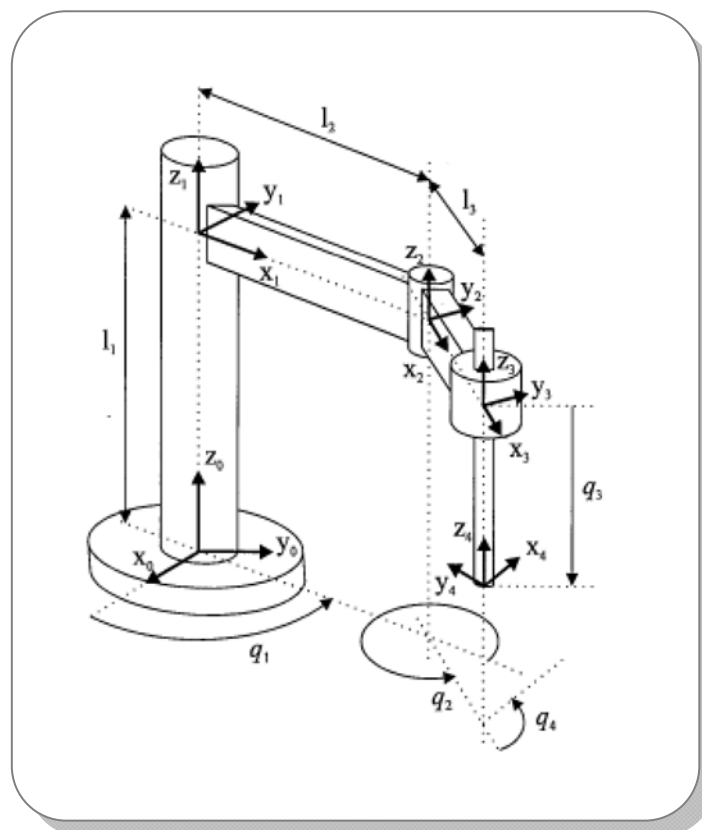
Dimensionamiento del robot (tamaño y límites de movimiento)

Para poder dimensionar los parámetros de nuestro robot SCARA definimos dos características que deseamos que el mismo cumpla.

- En primer lugar buscamos que tenga mismo alcance que un brazo humano, esto es del orden de los 600mm.
- En segundo lugar que tenga el mayor área de trabajo posible, del orden de los 360°.

De acuerdo a nuestro modelo de SCARA debemos definir los siguientes parámetros:

- Q1, ángulo de giro principal (hombro).
- Q2, ángulo de giro secundario (codo).
- Q3, altura variable.
- Q4, ángulo de orientación de la herramienta (muñeca).
- L1, eslabón base-hombro.
- L2, eslabón hombro-codo.
- L3, eslabón codo-muñeca.



De acuerdo a las dos premisas que planteamos al principio podemos definir sin mayor dificultad algunos de los parámetros, entonces:

- $L1 = 500\text{mm}$.
- Podemos requerir que el extremo pueda alcanzar el mismo nivel que posee la base del robot, consecuentemente Q3 variará entre 0 y 500mm.

- A simple vista no se observa que Q4 posea alguna limitación en cuanto su variabilidad por lo que la misma podrá variar entre 0 y 360°.

Ahora bien, definir el resto de las variables requiere un análisis un poco mas elaborado ya que existen algunas limitantes dadas tanto por las especificaciones que dimos al comienzo como las características constructivas del robot.

Para tener una visión un poco mas clara de cual es la mejor configuración de parámetros nos valdremos de las ecuaciones obtenidas del modelo cinemático directo para realizar algunas simulaciones de áreas de trabajo en Matlab y observar gráficamente cual es la más adecuada.

Consideraciones de las simulaciones:

Tengamos en cuenta que las simulaciones que realizamos son solamente del plano x-y (viendo al SCARA desde arriba) ya que las graficas serán las mismas para cada valor de z. Recordemos que la posición en Z está dada por la ecuación:

$$P_z = l_1 - q_3$$

Donde se observa que sólo depende de L1 y Q3.

Otra restricción que debemos considerar y que está dada por nuestra especificación de alcance, es que la suma de L2 y L3 debe ser igual a 600mm.

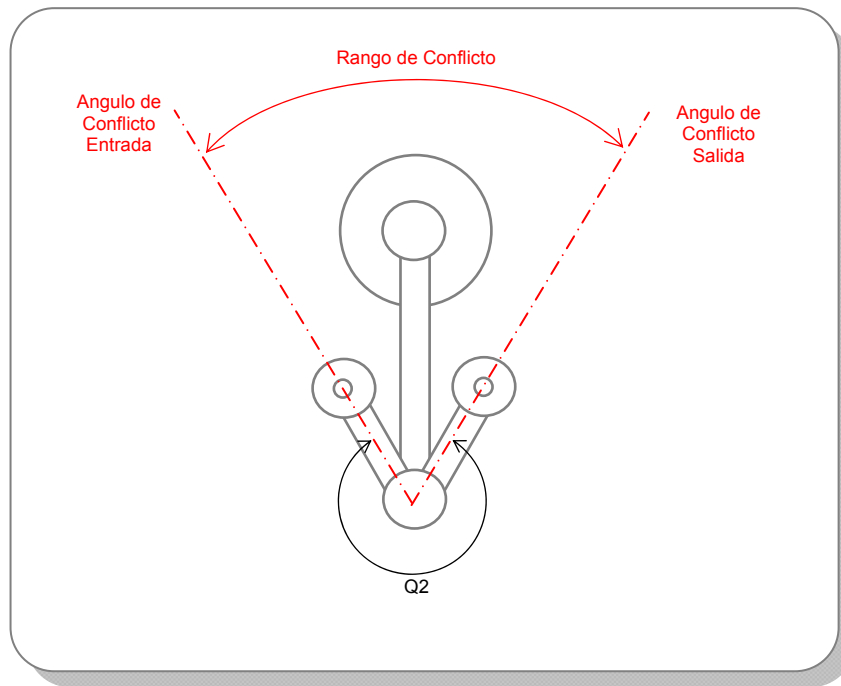
Si bien no es una limitación muy estricta ya que tenemos infinitas combinaciones de L2 y L3 que cumplen con esa especificación. Minimizando el problema reduciremos las simulaciones a dos: con $L_2 > L_3$ y con $L_2 = L_3$.

Los valores que se simularán son:

- $L_2 = 400\text{mm}$ y $L_3 = 200\text{mm}$.
- $L_2 = 300\text{mm}$ y $L_3 = 300\text{mm}$.

Por último debido a una cuestión constructiva debemos acotar el rango de variabilidad de las articulaciones Q1 y Q2, ángulos de giro de hombro y codo respectivamente. El primero si bien a simple vista no posee ninguna limitante impondremos arbitrariamente un rango máximo ya que como veremos en las simulaciones no tiene sentido que pueda girar 360° debido a que con menos se obtiene igualmente dicho alcance.

En cuanto al giro del codo (Q2) si observamos al SCARA desde arriba como en la siguiente figura, observamos que existe un rango de variación que llamaremos de “**conflicto**” en donde se coloca el eslabón codo-muñeca (L3) sobre el eslabón hombro-codo (L2). Que en caso de que Q3 (altura variable) se encuentre en alguno de sus valores intermedios hacen imposible que pueda lograrse una trayectoria desde el **ángulo de conflicto de entrada** al **ángulo de conflicto de salida** y que incluso el robot pueda sufrir algún tipo de daño.



Limitación de articulación de Q2

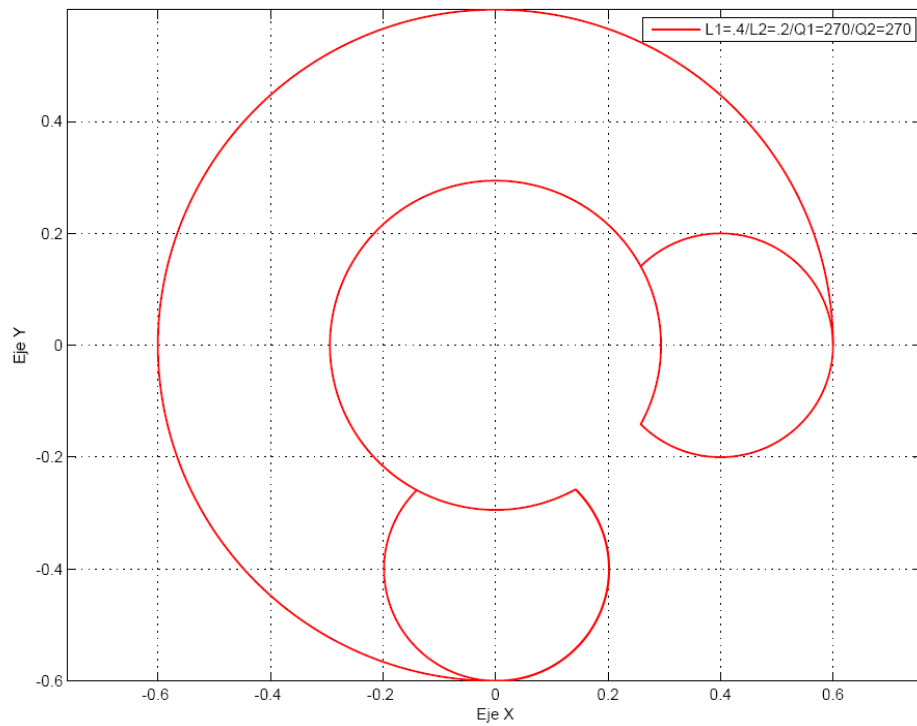
Si bien no hemos determinado cual será el espesor de cada una de los eslabones como para calcular con precisión cual es el rango de conflicto podemos suponer que puede estar comprendido entre 45° y 90° .

Simularemos entonces con los siguientes valores de Q1 y Q2:

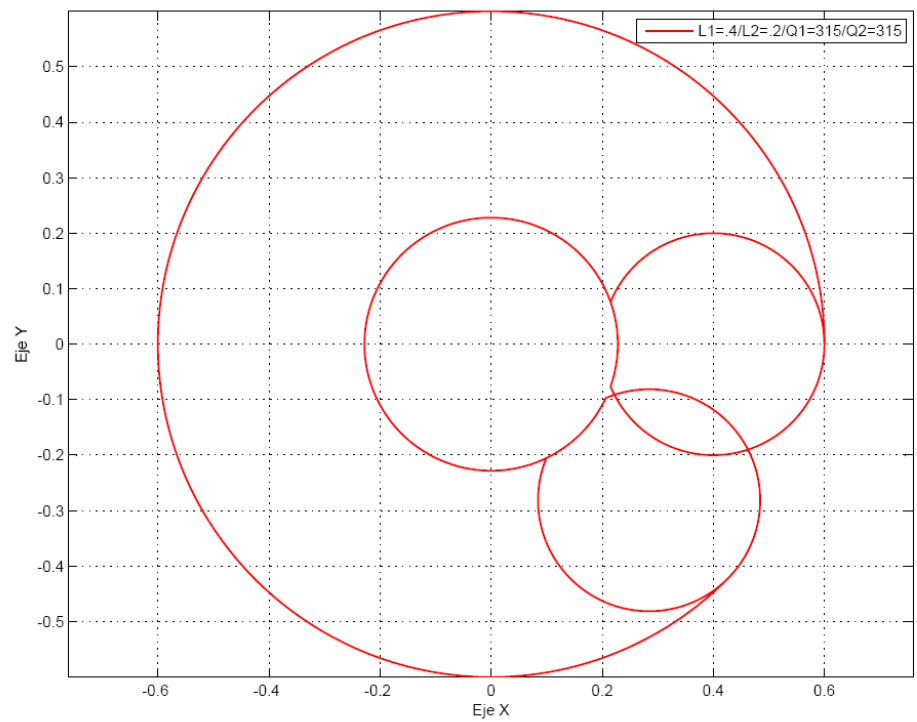
- Q1 de 0° a 270° y Q2 de 0° a 270° .
- Q1 de 0° a 315° y Q2 de 0° a 315° .
- Q1 de 0° a 270° y Q2 de 0° a 315° .
- Q1 de 0° a 315° y Q2 de 0° a 270° .

Simulaciones para Dimensionamiento:

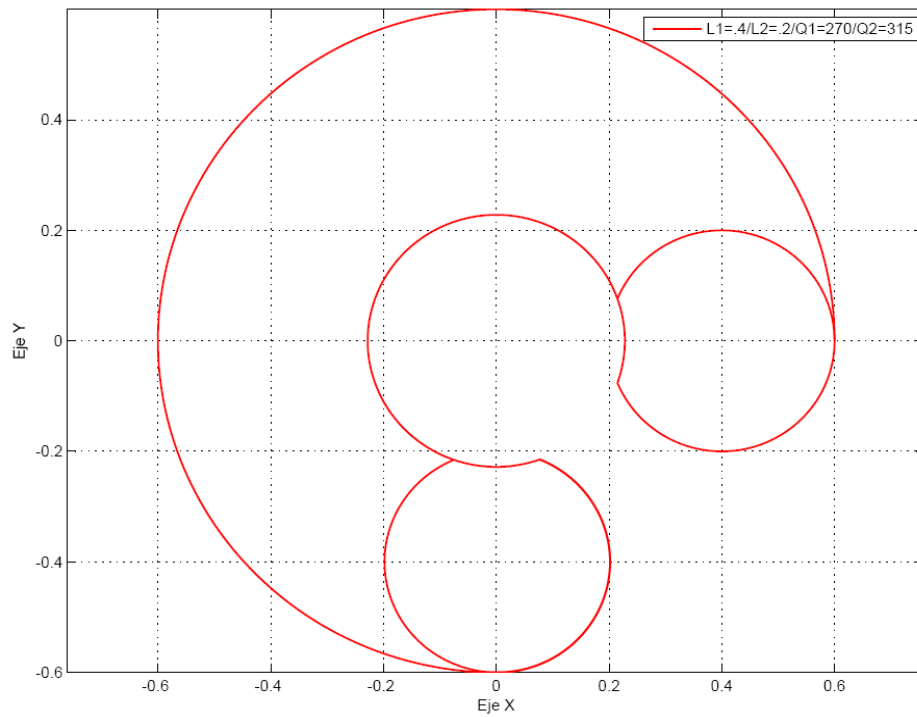
Para realizar las simulaciones hemos desarrollado un script en Matlab el cual se describe en el Anexo I “Áreas de Trabajo con Distintas Configuraciones” y que da como resultado las 8 graficas que se muestran a continuación y que representan las áreas de trabajo vistas del plano x-y (desde arriba del SCARA) y que son producto de combinar las dos configuraciones de L2 y L3 con las cuatro configuraciones de Q1 y Q2.



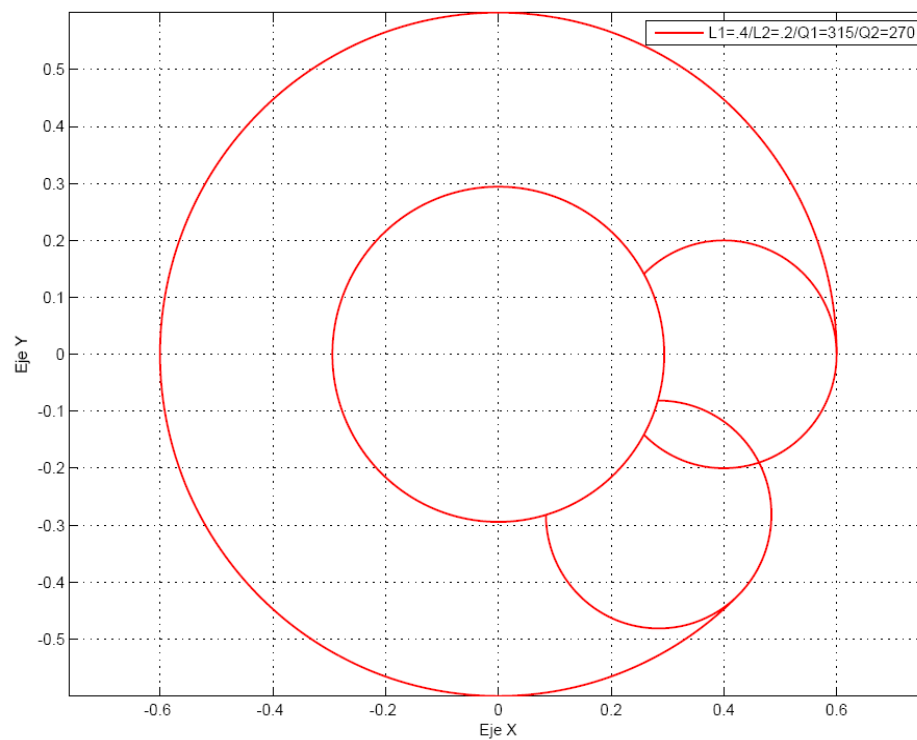
Simulación N°1



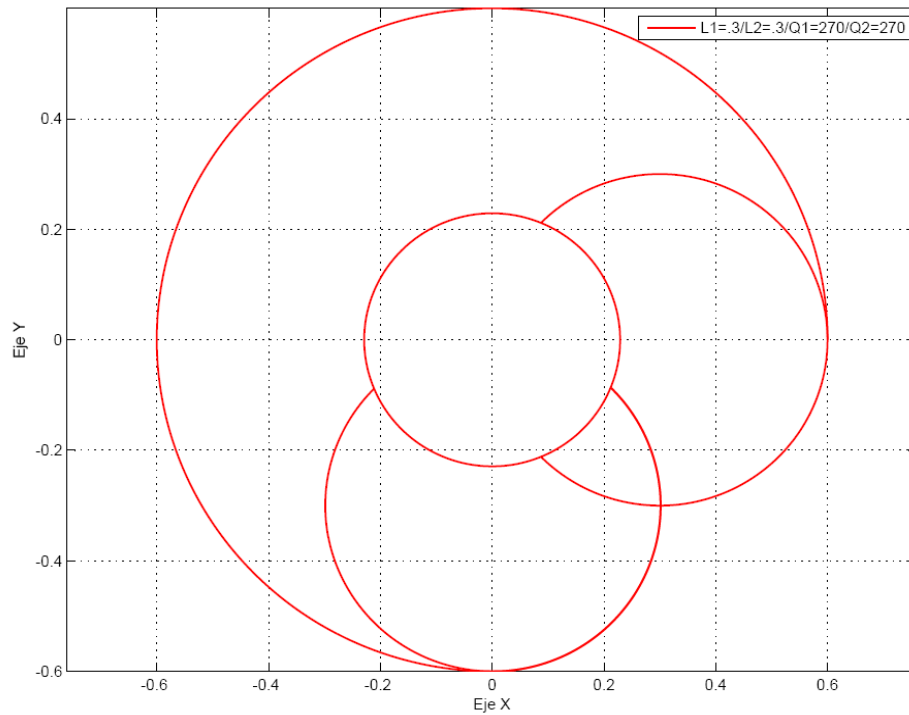
Simulación N°2



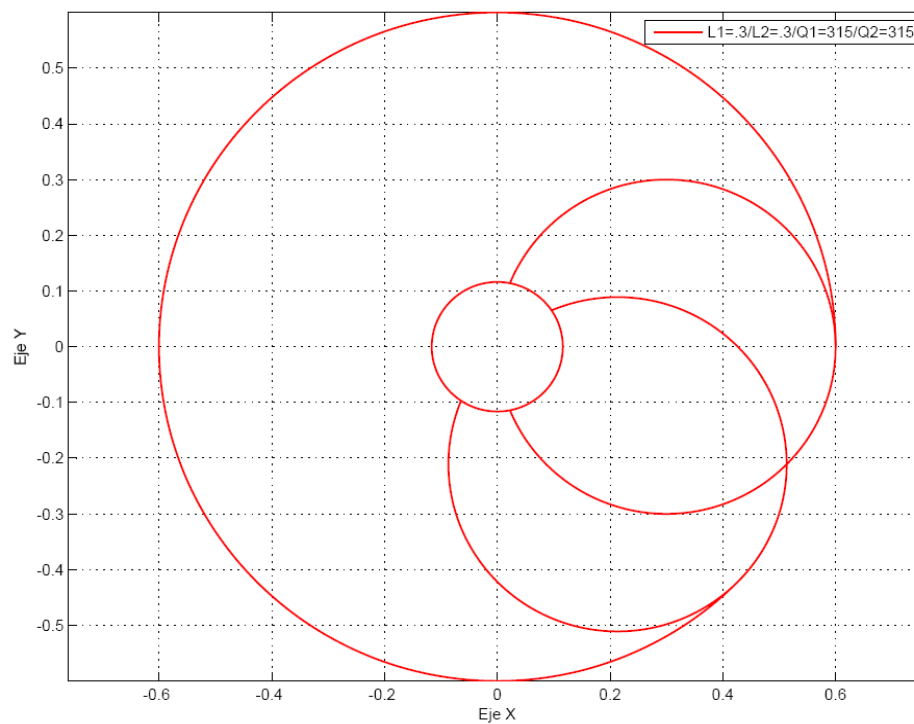
Simulación N°3



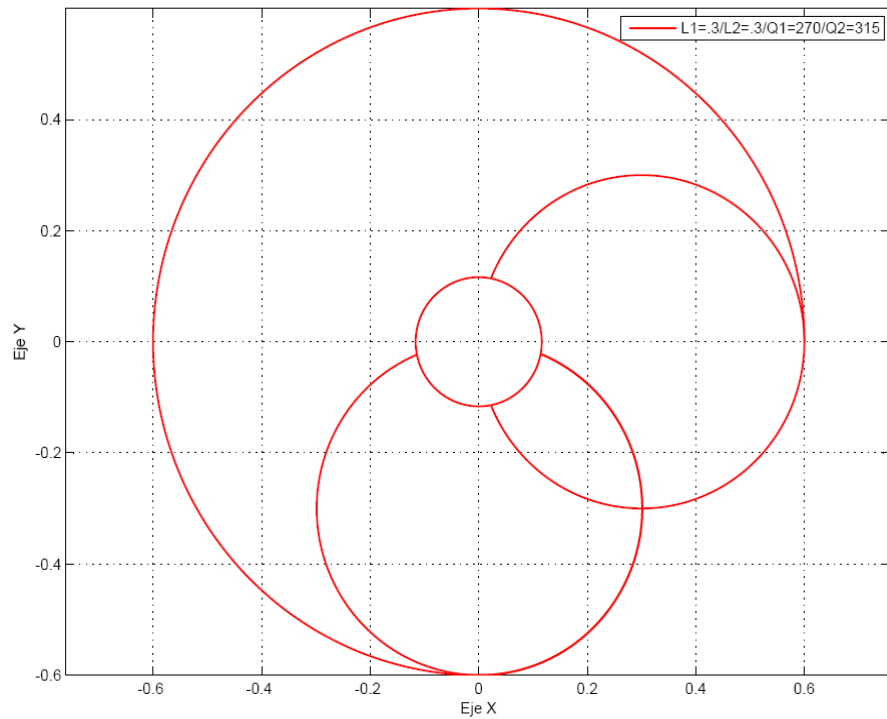
Simulación N°4



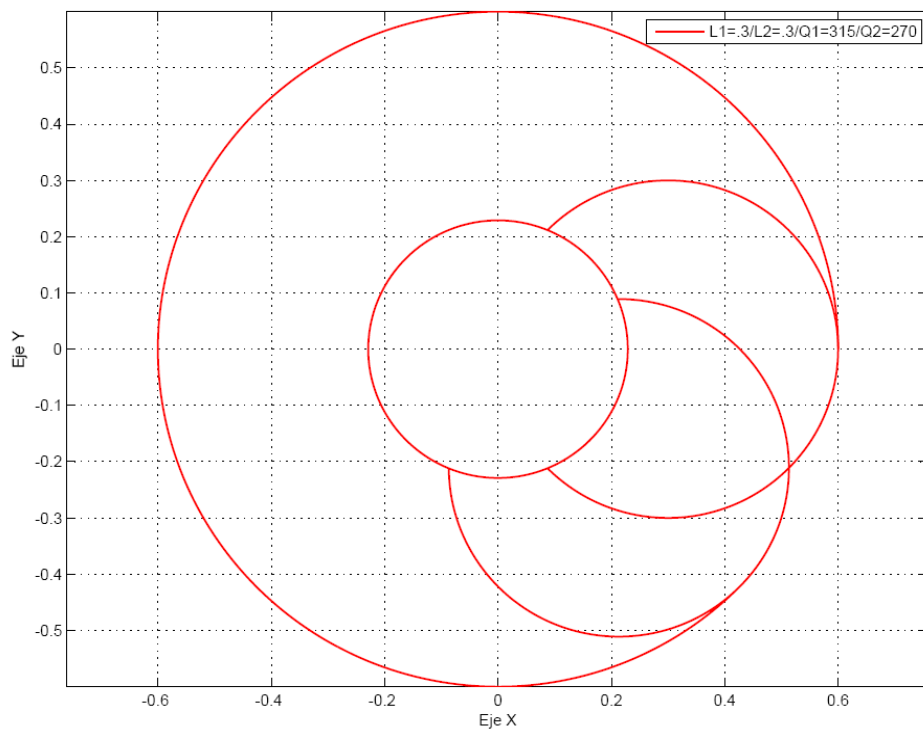
Simulación N°5



Simulación N°6



Simulación N°7



Simulación N°8

Elección de la Configuración

En las simulaciones puede observarse que el área de trabajo del SCARA puede asemejarse a una semi arandela cuyo diámetro exterior es fijo (1200mm) y el diámetro interior varía en función de las distintas configuraciones.

Una de las premisas de diseño que dimos al principio de esta sección fue que debe tener el mayor área de trabajo posible por lo que las configuraciones que generan las simulaciones N°1, 3 y 4 quedan descartadas.

Si bien las configuraciones que generan las simulaciones N° 6 y 7 serían las que cumplen mayormente este requerimiento tienen el inconveniente de que nos dejan poco espacio para colocar la base del robot ya que el diámetro interno de la arandela es del orden de los 200mm. Por esta razón también las descartamos.

De las configuraciones restantes la que genera la simulación N°8 es la que mayor áreas de trabajo posee y a su vez tiene como ventaja que el rango operación de la articulación Q2 es de 270° dándonos mayor rango de conflicto y permitiéndonos mayor libertad al momento de diseñar los espesores de los brazos del robot. En consecuencia elegiremos la configuración que genera dicha simulación.

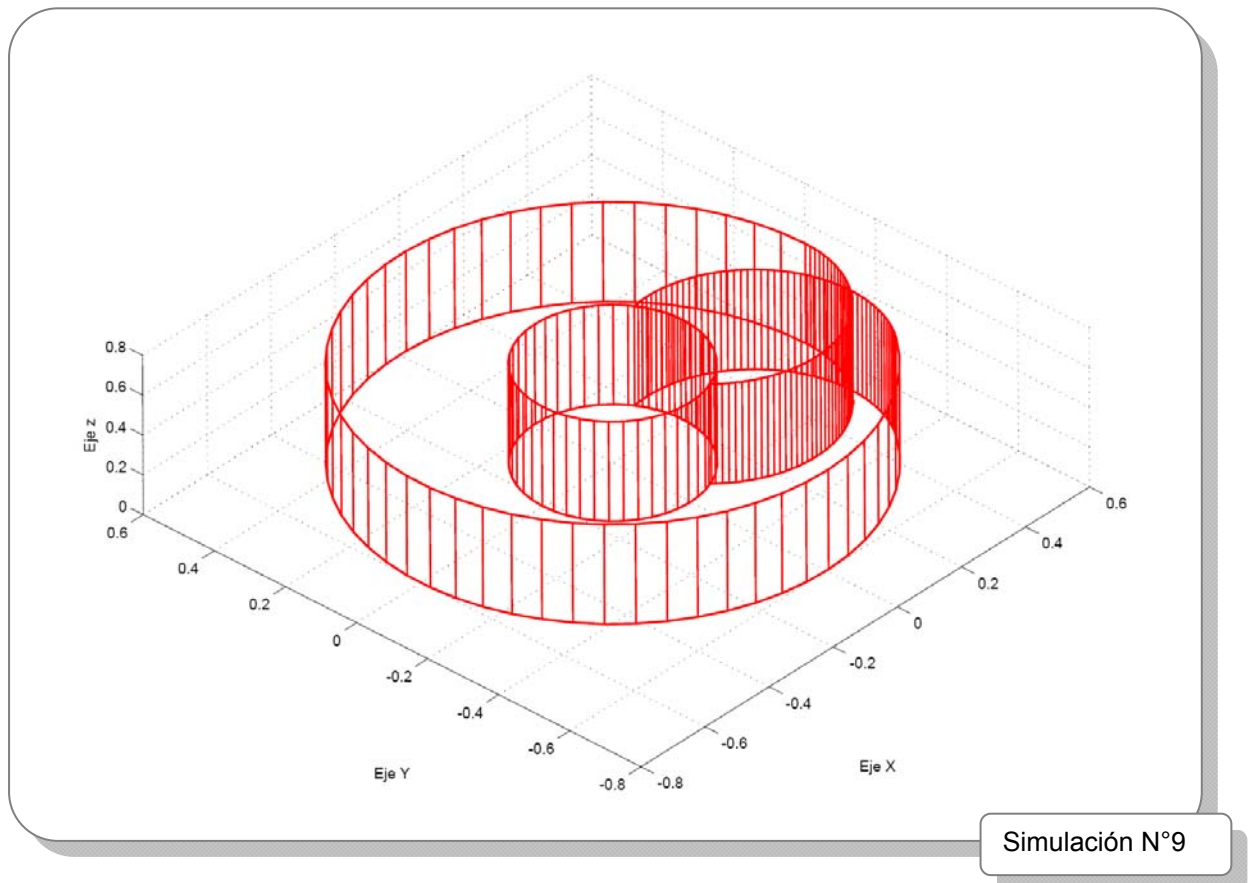
Resumiendo damos a continuación que valores posee cada parámetro del SCARA.

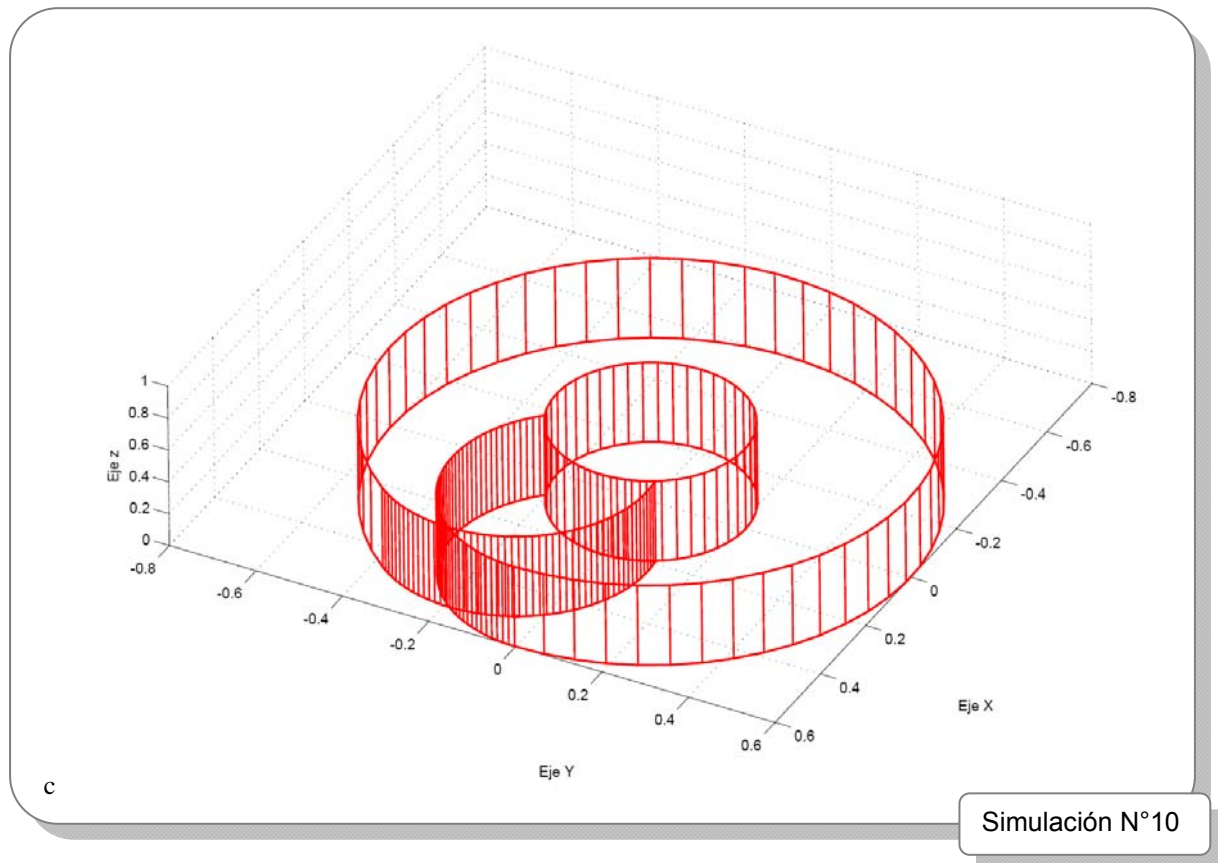
- Q1 varía entre 0° y 315°.
- Q2 varía entre 0° y 270°.
- Q3 varía entre 0mm y 500mm.
- Q4 varía entre 0° y 360°.
- L1 = 500mm.
- L2 = 300mm.
- L3 = 300mm.

Determinación del área de trabajo.

Utilizando las ecuaciones del modelo cinemático directo hemos generado otro script en MATLAB detallado en el Anexo II “Área de Trabajo en el Espacio” el cual genera una gráfica en tres dimensiones que ilustra los límites del área de trabajo en el espacio del SCARA con la configuración elegida.

A continuación se presentan varias figuras que muestra dicha área de trabajo vista desde diferentes ángulos.





Conclusiones

Como mencionamos en nuestra introducción, el robot SCARA es simple y robusto pero con gran versatilidad en los movimientos dentro del plano xy. Cabe destacar que mientras muchos robots presentan hasta 8 soluciones distintas al problema cinemático inverso, este brazo robótico posee solo 2 soluciones posibles lo que facilita el control del mismo.

Por otra parte es muy importante elegir la relación apropiada entre los brazos L2 y L3 para lograr un diámetro pequeño del límite de cobertura interior, mientras que el límite de cobertura exterior depende de la suma de ambos brazos.

Bibliografía

- *Fundamentos de Robótica – Universidad Politécnica de Madrid – Antonio Barrientos – McGraw-Hill 1997.*
- *Robot Modeling and Control - Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasaga.*
- *Robótica, Manipuladores y Robots Móviles – Olleres.*

ANEXO I - “Áreas de Trabajo con Distintas Configuraciones”

```

%Defino los limites de las variables
LIMITEQ1 = 270
LIMITEQ2 = 270
LIMITEQ3 = 0.5

%Defino los valores iniciales
INICIOQ1 = 0
INICIOQ2 = 0
INICIOQ3 = 0

%Inicializo las variables
Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3
L1=0.5
L2=0.4
L3=0.2

%Determino los incrementos de cada variable
Pasos = 1000
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
INCQ3 = LIMITEQ3 / Pasos

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

%-----
% Secuencia 1: Angulos limite 270
%-----

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 135
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;

```

```

end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (1)
plot (X, Y, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.3)
hold on
%pause

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.4/L2=.2/Q1=270/Q2=270')

%-----
%   Secuencia 2: Angulos limite 315
%-----

Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos

```

```
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 157.5
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];
```



```

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (2)
plot (X, Y, 'Color','r','LineWidth',1.3)
%pause

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.4/L2=.2/Q1=315/Q2=315')

%-----
% Secuencia 3: Angulos limite 270/315
%-----

Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 157.5
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

```

```

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (3)
plot (X, Y, 'Color','r','LineWidth',1.3)
%pause

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.4/L2=.2/Q1=270/Q2=315')

%-----
% Secuencia 3: Angulos limite 315/270
%-----

Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

```

```
for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 135
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
```

```

X = [X aux];

aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Y = [Y aux];

aux = L1 -Q3;
Z = [Z aux];

Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (4)
plot (X, Y, 'Color','r','LineWidth',1.3)

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.4/L2=.2/Q1=315/Q2=270')

%-----
% Simulacion con brazos iguales (L3 = L2)
%-----
%pause

%Inicializo las variables
Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3
L1=0.5
L2=0.3
L3=0.3

%Determino los incrementos de cada variable
Pasos = 1000
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
INCQ3 = LIMITEQ3 / Pasos

%plot (0,0,'-o','MarkerEdgeColor','k','MarkerSize',6)
hold on

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

%-----
% Secuencia 1: Angulos limite 270
%-----

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 135
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;

```

```

Z = [Z aux];

Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (5)
plot (X, Y, 'Color','r', 'LineWidth',1.3)
%pause

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.3/L2=.3/Q1=270/Q2=270')

```

```
%-----
%   Secuencia 2: Angulos limite 315
%-----

Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 157.5
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
```

```

    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (6)
plot (X, Y, 'Color','r','LineWidth',1.3)
%pause

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.3/L2=.3/Q1=315/Q2=315')

%-----
%   Secuencia 3: Angulos limite 270/315
%-----

Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 157.5
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

```

```

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 270
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 315
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (7)
plot (X, Y, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.3)

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.3/L2=.3/Q1=270/Q2=315')

```



```
%-----  
%   Secuencia 3: Angulos limite 315/270  
%-----  
  
Q1=INICIOQ1  
Q2=INICIOQ2  
Q3=INICIOQ3  
  
%Calculo Valores iniciales  
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));  
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));  
Z = L1-Q3;  
  
LIMITEQ1 = 315  
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos  
  
for i=0:Pasos  
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));  
    X = [X aux];  
  
    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));  
    Y = [Y aux];  
  
    aux = L1 -Q3;  
    Z = [Z aux];  
  
    Q1 = Q1+INCQ1;  
end  
  
LIMITEQ2 = 135  
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos  
  
for i=0:Pasos  
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));  
    X = [X aux];  
  
    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));  
    Y = [Y aux];  
  
    aux = L1 -Q3;  
    Z = [Z aux];  
  
    Q2 = Q2+INCQ2;  
end  
  
LIMITEQ1 = 315  
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos  
  
for i=0:Pasos  
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));  
    X = [X aux];  
  
    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));  
    Y = [Y aux];  
  
    aux = L1 -Q3;  
    Z = [Z aux];  
  
    Q1 = Q1-INCQ1;  
end  
  
LIMITEQ2 = 270  
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos  
  
for i=0:Pasos  
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));  
    X = [X aux];  
  
    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));  
    Y = [Y aux];  
  
    aux = L1 -Q3;  
    Z = [Z aux];  
  
    Q2 = Q2-INCQ2;  
end  
  
LIMITEQ1 = 315  
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos  
  
for i=0:Pasos
```

```
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (8)
plot (X, Y, 'Color','r','LineWidth',1.3)

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')

legend('L1=.3/L2=.3/Q1=315/Q2=270')

hold off
```

Anexo II “Área de Trabajo en el Espacio”

```
%Defino los limites de las variables
LIMITEQ1 = 270
LIMITEQ2 = 270
LIMITEQ3 = 0.5

%Defino los valores iniciales
INICIOQ1 = 0
INICIOQ2 = 0
INICIOQ3 = 0

%Inicializo las variables
Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3
L1=0.5
L2=0.3
L3=0.3

%Determino los incrementos de cada variable
Pasos = 50
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
INCQ3 = LIMITEQ3 / Pasos

%-----
%   Arandela en Z=0.5
%-----

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Long = length(Z);
    if (Z(Long) == Z(Long-1))
        if (Q3==0)
            Q3=0.5;
        else
            Q3=0;
        end
        aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
        X = [X aux];

        aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
        Y = [Y aux];

        aux = L1 -Q3;
        Z = [Z aux];
    end

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 135
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];
```

```
    Long = length(Z);
    if (Z(Long) == Z(Long-1))
        if (Q3==0)
            Q3=0.5;
        else
            Q3=0;
        end
        aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
        X = [X aux];

        aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
        Y = [Y aux];

        aux = L1 -Q3;
        Z = [Z aux];
    end

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Long = length(Z);
    if (Z(Long) == Z(Long-1))
        if (Q3==0)
            Q3=0.5;
        else
            Q3=0;
        end
        aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
        X = [X aux];

        aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
        Y = [Y aux];

        aux = L1 -Q3;
        Z = [Z aux];
    end

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Long = length(Z);
    if (Z(Long) == Z(Long-1))
        if (Q3==0)
            Q3=0.5;
        else
            Q3=0;
        end
        aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
        X = [X aux];

        aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
        Y = [Y aux];

        aux = L1 -Q3;
        Z = [Z aux];
```

```

end

Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Long = length(Z);
    if (Z(Long) == Z(Long-1))
        if (Q3==0)
            Q3=0.5;
        else
            Q3=0;
        end
        aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
        X = [X aux];

        aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
        Y = [Y aux];

        aux = L1 -Q3;
        Z = [Z aux];
    end

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Long = length(Z);
    if (Z(Long) == Z(Long-1))
        if (Q3==0)
            Q3=0.5;
        else
            Q3=0;
        end
        aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
        X = [X aux];

        aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
        Y = [Y aux];

        aux = L1 -Q3;
        Z = [Z aux];
    end

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (1)
plot3 (X, Y, Z, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.3)
hold on
%-----
%   Borde
%-----

%Inicializo las variables
Q1=INICIOQ1

```

```
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3
L1=0.5
L2=0.3
L3=0.3

%Determino los incrementos de cada variable
Pasos = 50
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
INCQ3 = LIMITEQ3 / Pasos

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 135
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
```

```

INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (1)
plot3 (X, Y, Z, 'Color','r', 'LineWidth',1.5)

%Inicializo las variables
Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=0.5
L1=0.5
L2=0.3
L3=0.3

%Determino los incrementos de cada variable
Pasos = 50
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
INCQ3 = LIMITEQ3 / Pasos

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 135
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

```

```

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1-INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2-INCQ2;
end

LIMITEQ1 = 315
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
end

LIMITEQ2 = 270
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos

for i=0:Pasos
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q2 = Q2+INCQ2;
end

figure (1)
plot3 (X, Y, Z, 'Color','r', 'LineWidth',1.5)

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

grid on
axis equal
xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')
zlabel('Eje Z')

hold off

```


Anexo III “Verificación del Modelo Cinemático Inverso”

```

%Defino los valores iniciales
INICIOQ1 = 0
INICIOQ2 = 0
INICIOQ3 = 0

%Inicializo las variables
Q1=INICIOQ1
Q2=INICIOQ2
Q3=INICIOQ3
L1=0.5
L2=0.3
L3=0.3

%-----
% Secuencia 1: Calculo de las posiciones (cadena directa)
%-----

%Defino los limites de las variables
LIMITEQ1 = 22.5
LIMITEQ2 = 0
LIMITEQ3 = 0.5

%Determino los incrementos de cada variable
Pasos = 100
INCQ1 = LIMITEQ1 / Pasos
INCQ2 = LIMITEQ2 / Pasos
INCQ3 = LIMITEQ3 / Pasos

%Calculo Valores iniciales
X = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
Y = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
Z = L1-Q3;

for i=1:(Pasos)
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
    Q2 = Q2+INCQ2;
    Q3 = Q3+INCQ3;
end

for i=1:(Pasos)
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
    Q2 = Q2+INCQ2;
    Q3 = Q3-INCQ3;
end

for i=1:(Pasos)
    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
    Q2 = Q2+INCQ2;
    Q3 = Q3+INCQ3;
end

for i=1:(Pasos-1)

```

```

    aux = (L3*cos(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*cos(deg2rad(Q1)));
    X = [X aux];

    aux = (L3*sin(deg2rad(Q1+Q2)))+(L2*sin(deg2rad(Q1)));
    Y = [Y aux];

    aux = L1 -Q3;
    Z = [Z aux];

    Q1 = Q1+INCQ1;
    Q2 = Q2+INCQ2;
    Q3 = Q3-INCQ3;
end

figure (1)
plot3 (X, Y, Z, 'Color','r','LineWidth',3)
hold on
grid on
%pause

%-----
% Secuencia 2: Calculo articulaciones (cadena inversa)
%-----

aux = ((X(1)^2)+(Y(1)^2)-(L2^2)-(L3^2))/(2*L2*L3);
if (aux > 1)
    aux =1;
elseif (aux < -1)
    aux = -1;
end
q2 = acos(aux);
Q2deg = rad2deg(aux);

aux = (atan (Y(1)/X(1)) - atan ((L3*sin(q2))/(L2+(L3*cos(q2)))));
q1 =aux;
Q1deg = rad2deg(aux);
q3 = L1 - Z(1);

for i=2:(Pasos*4)
    aux = ((X(i)^2)+(Y(i)^2)-(L2^2)-(L3^2))/(2*L2*L3);
    if (aux > 1)
        aux =1;
    elseif (aux < -1)
        aux = -1;
    end
    aux = acos(aux);
    q2 = [q2 aux];
    Q2deg = [Q2deg rad2deg(aux)];

    aux = atan (Y(i)/X(i)) - atan ((L3*sin(q2(i)))/(L2+(L3*cos(q2(i)))));
    q1 = [q1 aux];
    Q1deg = [Q1deg rad2deg(aux)];
    aux = L1 - Z(i);
    q3 = [q3 aux];
end

%Calculo Valores iniciales
xq = (L3*cos(q1(1)+q2(1)))+(L2*cos(q1(1)));
yq = (L3*sin(q1(1)+q2(1)))+(L2*sin(q1(1)));
zq = L1-q3(1);

for i=2:(Pasos*4)
    aux = (L3*cos(q1(i)+q2(i)))+(L2*cos(q1(i)));
    xq = [xq aux];

    aux = (L3*sin(q1(i)+q2(i)))+(L2*sin(q1(i)));
    yq = [yq aux];

    aux = L1 -q3(i);
    zq = [zq aux];
end

figure (1)
plot3 (xq, yq, zq, 'Color','b','LineWidth',2)
hold off

%-----
% Configuracion de ejes y leyenda
%-----

```

```
grid on

xlabel('Eje X')
ylabel('Eje Y')
zlabel('Eje z')

legend('Trayectoria Cadena Directa', 'Trayectoria Cadena Inversa')

hold off
```



Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Buenos Aires

Desarrollo del Modelo Cinemático Completo de un Robot tipo SCARA

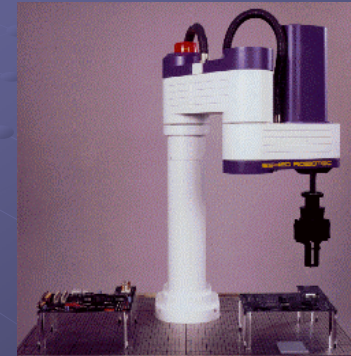
Autores: Damián Ermida - Emiliano Mobrici

UTN – FRBA - Robótica

Desarrollo del Modelo Cinemático Completo de un
Robot tipo SCARA

Introducción:

SCARA: Selective Compliant Articulated
Robot Arm



UTN – FRBA - Robótica

Desarrollo del Modelo Cinemático Completo de un
Robot tipo SCARA

Movimientos:

El robot SCARA posee libertad total de movimientos sobre los ejes x e y , mientras que se mueve muy limitadamente sobre el eje z .

Se comporta de manera similar al brazo humano, permitiendo ubicar el extremo de la mano en cualquier posición del plano, utilizando el eje vertical solo para manipulaciones simples tales como presionar y desplazarse de modo limitado.

UTN – FRBA - Robótica

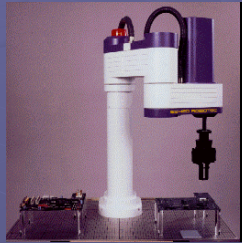
Desarrollo del Modelo Cinemático Completo de un
Robot tipo SCARA

Características destacadas:

En la mayoría de los casos, los robot SCARA no suelen superar los 3 o 4 grados de libertad, lo que los hace muy sencillos tanto en diseño y construcción como en su utilización.

Esta característica convierte al SCARA en un equipo rápido, preciso y robusto.

Ejemplos:



SCORA-ER de Eshed Robotec:
 Brazos: 270mm y 230mm
 Velocidad: 1,5m/seg
 Radios de giro: 288° y 218°
 Eje z: 18cm
 Precisión: +/- 0,05mm



KR 10 SCARA R850 de KUKA
 Brazos: 400mm y 350mm
 Velocidad: 11m/seg
 Radios de giro: 165° y 147°
 Eje z: 30cm
 Precisión: +/- 0,025mm

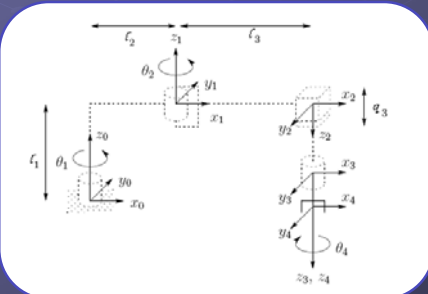
Aplicaciones:

- Soldadura
- Tomar y colocar elementos
- Guiado
- Montaje de componentes
- Atornillar

Resolución Cinemática directa:

La resolución de cinemática directa permite obtener la posición del extremo del brazo robótico a partir del valor de sus articulaciones.

Para ello utilizamos el algoritmo de Denavit Hartenberg, que nos permite llegar a los siguientes parámetros:



	Θ	D	a	α
1	q_1	l_1	L_2	0
2	q_2	0	L_3	180°
3	0	0	0	0
4	q_4	q_3	0	0

Resolución Cinemática directa:

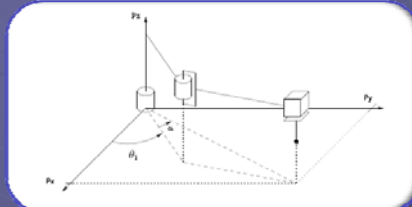
$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4$$

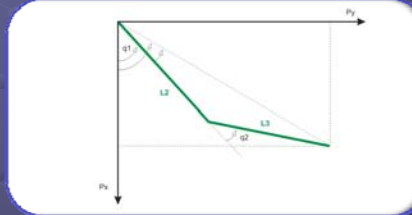
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} Px &= l_2 \cdot \cos q_1 + l_3 \cos(q_1 + q_2) \\ Py &= l_2 \cdot \sin q_1 + l_3 \sin(q_1 + q_2) \\ Pz &= l_1 - q_3 \end{aligned}$$

Resolución Cinemática Inversa:



$$q3 = l_1 - Pz$$



$$q2 = \arccos\left(\frac{Px^2 + Py^2 - l2^2 - l3^2}{2l2l3}\right)$$

$$q1 = \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) - \arctg\left(\frac{l3 \cdot \sin q2}{l2 + l3 \cdot \cos q2}\right)$$

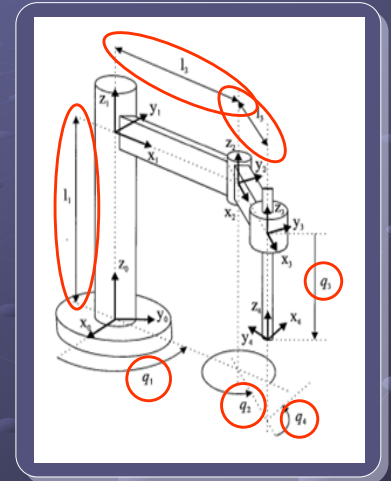
Dimensionamiento

Parámetros Fijos:

- L1, Distancia de la Base al Hombro
- L2, Distancia del Hombro al Codo
- L3, Distancia del Codo a la Muñeca

Parámetros Variables:

- Q1, Angulo de Giro del Hombro
- Q2, Angulo de Giro del Codo
- Q3, Altura de la herramienta
- Q4, Angulo de Giro de la Muñeca



Dimensionamiento

L1: 500mm

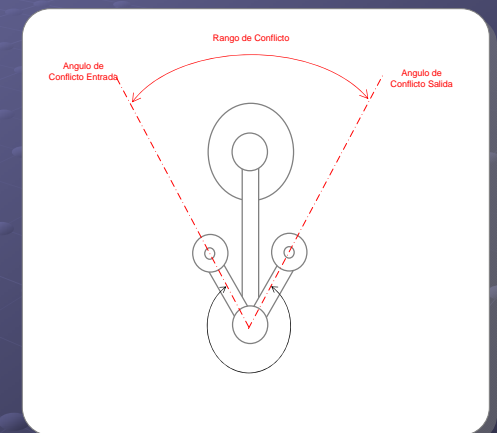
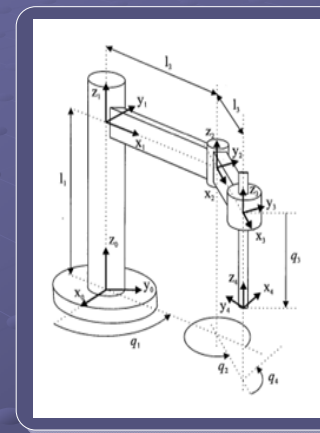
Q3: Varía de 0 a 500mm

Q4: Varía de 0° a 360°

Para determinar L2, L3, Q1 y Q2 realizaron simulaciones en Matlab teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- 1- Que tenga el mismo alcance de un brazo humano (600mm)
- 2- Que tenga el mayor área de trabajo posible.

Dimensionamiento



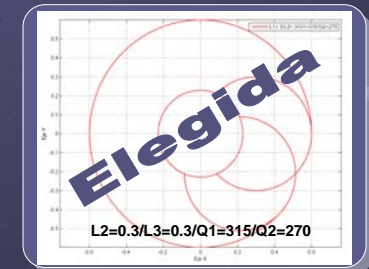
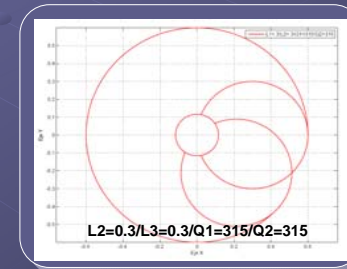
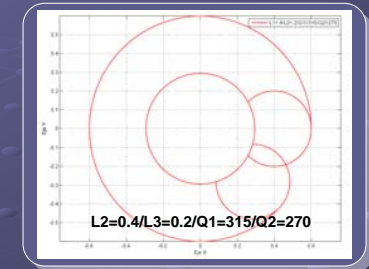
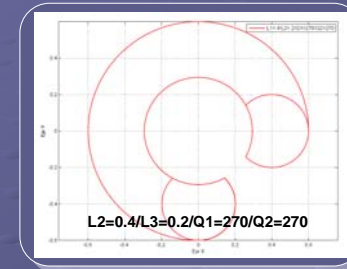
Limitación de articulación de Q2

Dimensionamiento

Simulaciones:

- $L2 = 400\text{mm}$ y $L3 = 200\text{mm}$.
- $L2 = 300\text{mm}$ y $L3 = 300\text{mm}$.
- $Q1$ de 0° a 270° y $Q2$ de 0° a 270° .
- $Q1$ de 0° a 315° y $Q2$ de 0° a 315° .
- $Q1$ de 0° a 270° y $Q2$ de 0° a 315° .
- $Q1$ de 0° a 315° y $Q2$ de 0° a 270° .

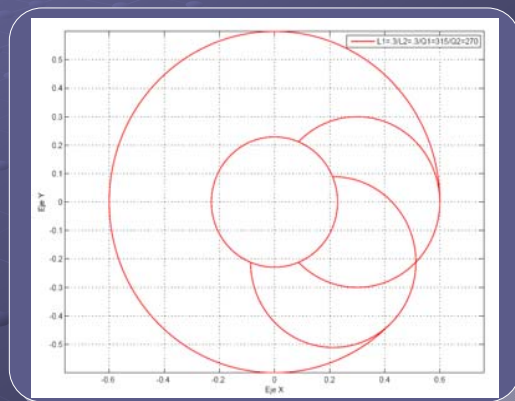
Dimensionamiento: Simulaciones



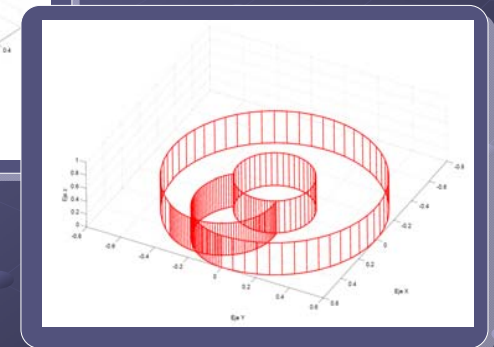
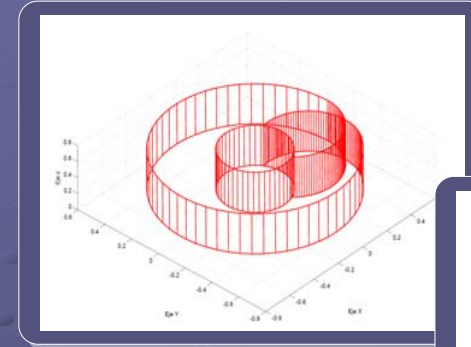
Dimensionamiento:

Configuración elegida:

- $Q1$ varía entre 0° y 315° .
- $Q2$ varía entre 0° y 270° .
- $Q3$ varía entre 0mm y 500mm .
- $Q4$ varía entre 0° y 360° .
- $L1 = 500\text{mm}$.
- $L2 = 300\text{mm}$.
- $L3 = 300\text{mm}$.



Área de Trabajo en el Espacio:

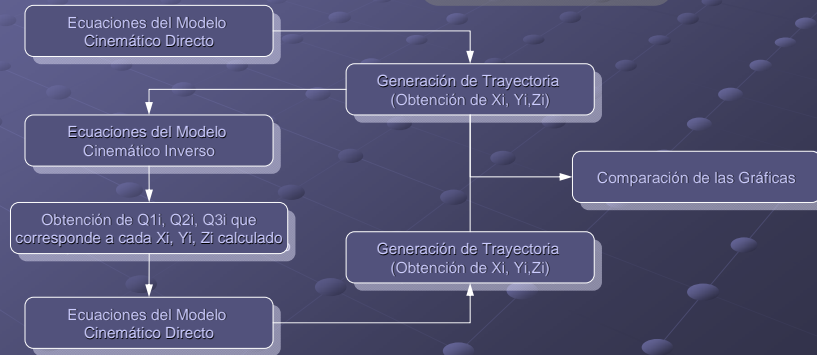
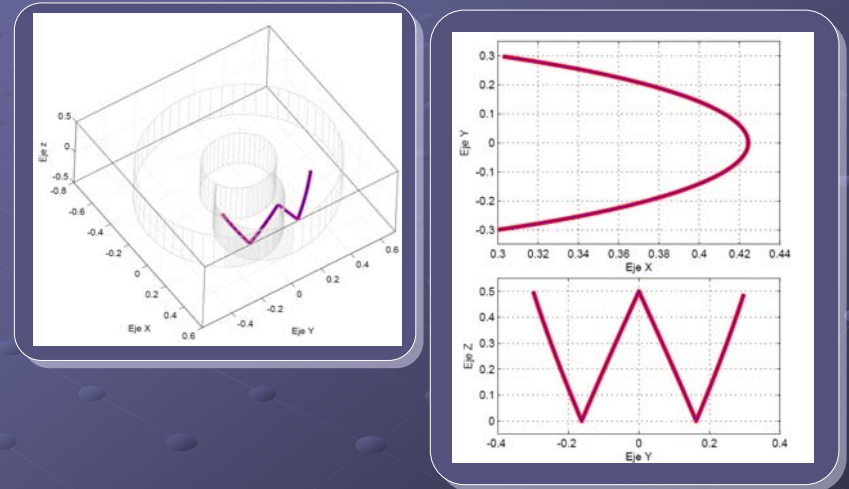


Verificación del Modelo Cinemático Inverso:Ecuaciones obtenidas:

$$q2 = \arccos\left(\frac{Px^2 + Py^2 - l2^2 - l3^2}{2 \cdot l2 \cdot l3}\right)$$

$$q1 = \arctg\left(\frac{Py}{Px}\right) - \arctg\left(\frac{l3 \cdot \sin q2}{l2 + l3 \cdot \cos q2}\right)$$

$$q3 = l1 - Pz$$

Verificación del Modelo Cinemático Inverso:Conclusiones:

- Solución cinemática inversa con solo dos posibles resultados: facilita el control del brazo robótico
- Debe elegirse cuidadosamente la relación L2/L3 ya que de ella depende el radio mínimo de acción del robot
- El radio máximo de cobertura depende de la suma de ambos brazos
- Se logran excelentes características de posicionamiento sobre el plano x-y
- Alcanza velocidades de trabajo muy elevadas