



INFORME FINAL ROBÓTICA I

PROYECTO:

“DESARROLLO DE BRAZO ROBÓTICO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE TAREAS REPETITIVAS EN LABORATORIOS DE ANÁLISIS CLÍNICO”

Integrantes:

- | | | |
|--------------------------|---|------------------|
| ● Dalessandro, Francisco | - | Legajo N°: 13318 |
| ● Panonto, Valentín | - | Legajo N°: 13583 |

Responsables de la asignatura

- | | |
|--------------------|-----------------------------------|
| ● Docente titular: | Doctora Ingeniera Diaz, Carolina. |
| ● Docente JTP: | Ingeniero Sanchez, Eric. |

Ciclo de cursado:

Segundo semestre, año 2024

1. Resumen

Este proyecto se centra en el diseño e implementación de un brazo robótico de 5 grados de libertad, inspirado en un robot industrial como lo es el FANUC LR Mate 200iD, adaptado para realizar tareas específicas en laboratorios de análisis clínicos, particularmente en la manipulación de tubos de ensayo para análisis de hemogramas. El brazo se diseñó para optimizar la manipulación en una celda de trabajo que incluye estaciones para escaneo, análisis y almacenamiento refrigerado de muestras, garantizando precisión, eficiencia y seguridad en un entorno controlado.

Para lograr el movimiento preciso y repetible del robot, se abordaron tanto la cinemática directa como la inversa, utilizando el método de Pieper para simplificar el cálculo de las orientaciones y posiciones deseadas. Se utilizó el determinante del Jacobiano para encontrar puntos singulares. La planificación de trayectorias incluyó el uso de funciones como `jtraj()` y `ctrjaj()` principalmente para interpolar puntos en el espacio articular y cartesiano, respectivamente, optimizando el posicionamiento del robot en cada estación.

Se hizo un breve análisis sobre qué tipos de sensores y actuadores debería emplear el robot para su completo control y correcto funcionamiento.

Finalmente, se destaca la eficiencia y flexibilidad del sistema al ejecutar las tareas necesarias en el laboratorio, y propone mejoras para alcanzar puntos adicionales y la ampliación de funciones para otros tipos de análisis clínicos.

2. Índice

1. Resumen.....	2
2. Índice.....	3
3. Introducción.....	4
4. Presentación del problema.....	4
5. Descripción del robot.....	7
5.1. Parametrización de la estructura.....	7
5.2. Cinemática directa.....	8
5.3. Cinemática inversa.....	10
5.4. Relación de velocidades.....	12
5.5. Planificación y generación de trayectorias.....	14
5.6. Simulaciones y gráficas finales.....	18
6. Sensores y actuadores del sistema.....	19
6.1. Sensores.....	19
6.2. Actuadores.....	20
7. Conclusiones.....	20
8. Referencias.....	20
9. Anexos.....	21
Anexo A: Parametrización del robot.....	21
Anexo B: Cinemática inversa con método de Pieper.....	22
Anexo C: Singularidades en la relación de velocidades.....	27
Anexo D: Gráficas de simulación.....	29
Anexo E: Extras relacionados a la entrega.....	31

3. Introducción

Para la realización de este proyecto, se desarrolló un robot manipulador tipo serie de 5 grados de libertad, el cual fue logrado a partir de un diseño propio (inspirado en los muy conocidos FANUC LR Mate 200iD, de 6 grados de libertad) tanto de algunas formas, como de sus dimensiones generales y particulares de algunas partes. En términos generales, su aplicación se basa en la manipulación automatizada de tubos de ensayo, los cuales se trasladan por diferentes estaciones de trabajo para llevar a cabo los pasos necesarios en la realización de un análisis de hemograma a la muestra. Esta configuración del robot permite el posicionamiento y orientación precisos del efector para realizar cada tarea en la celda de trabajo, optimizando el flujo de trabajo, la característica de precisión e igualdad a la hora de la realización de la actividad y reduciendo posibles errores humanos en el laboratorio.

4. Presentación del problema

El robot diseñado es un manipulador de 5 grados de libertad, con eslabones rígidos y todas articulaciones rotacionales, basado en la estructura de los robots industriales FANUC LR Mate 200iD, pero en este caso adaptado para cumplir con las tareas de manipulación de tubos de ensayo requeridas. Su configuración permite movimientos en el espacio tridimensional y la capacidad de rotación sobre dos ejes en el efector final.

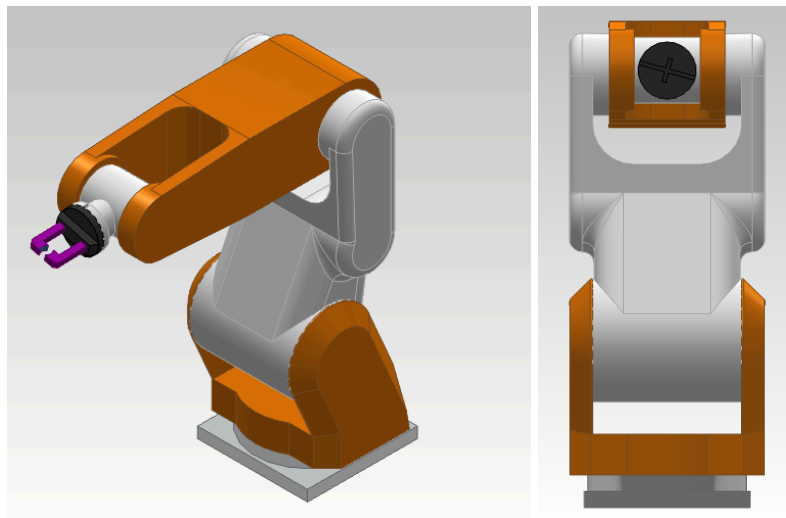


Figura 1. Perspectiva isométrica y vista frontal del modelo de brazo robótico desarrollado.

Las longitudes de los eslabones y los parámetros geométricos fueron definidas por los autores para alcanzar las posiciones de trabajo requeridas. El área de trabajo (Figura 2) es una celda cuadrada de 1.5m de lado, que cuenta con cuatro estaciones también cuadradas en cada esquina, de 450mm de lado por 800mm de alto. El brazo se encuentra ubicado en el pilar cuadrado central de la celda, el cual es de 300mm de lado por 700mm de alto.

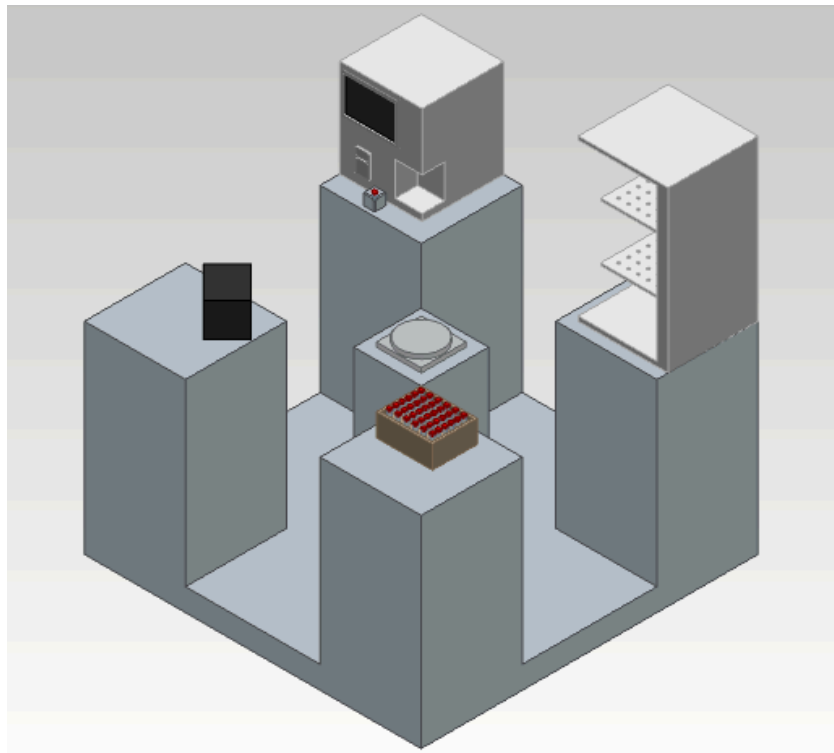


Figura 2. Perspectiva isométrica del layout de la celda de trabajo.

Observando la Figura 2, comenzando por la esquina inferior y en sentido horario, se pueden apreciar las cuatro estaciones de la celda:

- Estación de muestras: Estación donde hay una caja que contiene las muestras de sangre de los pacientes a analizar. Aquí, el robot debe recoger cada tubo de ensayo y comenzar el ciclo de trabajo.
- Estación de escaneo: En esta siguiente estación, el robot deberá contener la muestra en su pinza y “mostrarla” al escáner, donde se busca obtener los datos del paciente, a partir del escaneo del código de barras que se encuentra pegado en la superficie del tubo de muestra seleccionado.
- Estación de máquina de Hemograma: En esta estación, se realiza el estudio a la muestra. La máquina se encuentra esperando a que arribe la muestra, la cual debe insertarse desde su esquina inferior (la que se ve de frente en la imagen). Una vez que comienza el análisis, de la máquina sale una aguja la cual debe punzar la zona de goma del tapón, y extraer una pequeña muestra representativa de la sangre que contiene el tubo.
- Estación de refrigeración y guardado: Por último se lleva a almacenar cada tubo para su preservación en el refrigerador. Aquí termina el ciclo de utilización de la muestra y comienza un nuevo ciclo de trabajo.

Como se mencionó anteriormente, el brazo posee 5 articulaciones, las cuales son de tipo rotacionales. Estas cuentan con el siguiente rango articular correspondientemente de la base a la brida del efector final.

Articulación	Límite inferior	Límite superior
A1	$-\pi$	π
A2	$-\pi/2$	$\pi/2$
A3	$-\pi/6$	$\pi/2$
A4	$-\pi/2$	$\pi/2$
A5	$-\pi$	π

Tabla 1. Límites articulares.

A partir de la definición de los parámetros geométricos del robot, y de la amplitud de los rangos articulares, se obtuvo el siguiente espacio de trabajo alcanzable para el robot.

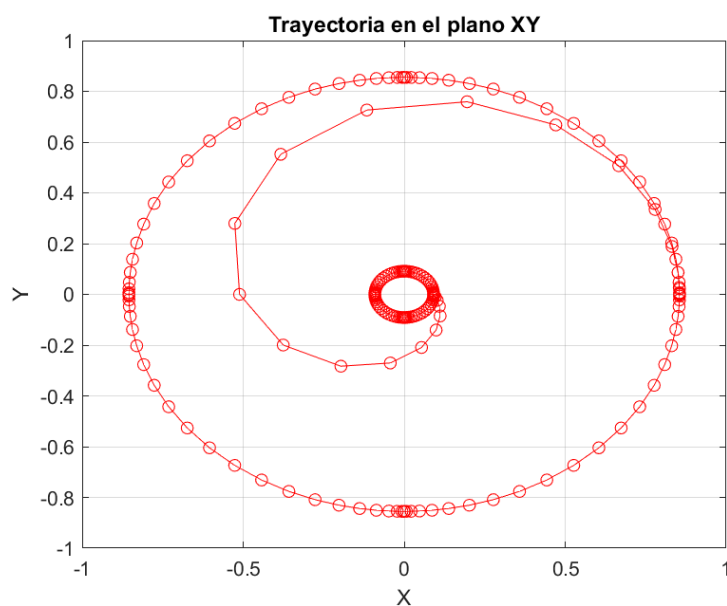


Figura 3. Límite exterior e interior del espacio de trabajo en el plano XY.

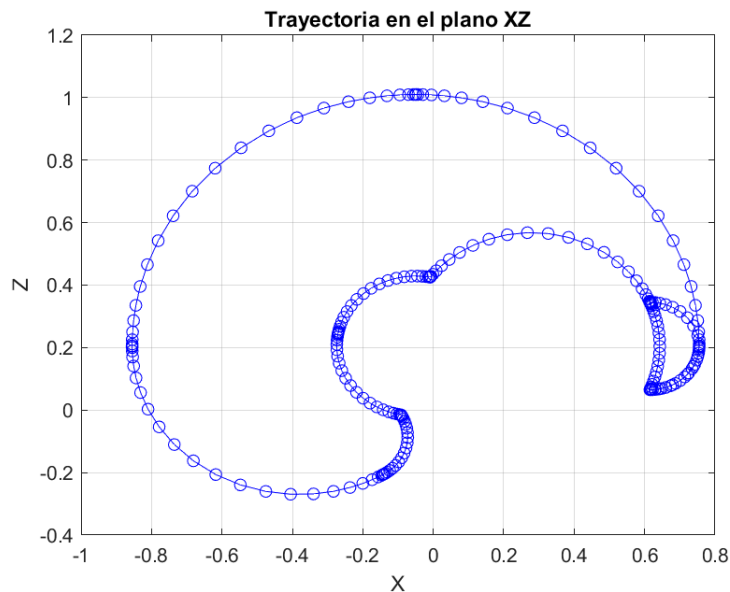


Figura 4. Límite exterior e interior del espacio de trabajo en el plano XZ.

Como observación final de las características del robot, se comenta que en el extremo operativo se encuentra una pinza como efector final. Esta se extiende 70mm contando desde la articulación hasta el punto de agarre de la misma ("tool center point").

5. Descripción del robot

5.1. Parametrización de la estructura

Para la parametrización de la estructura del robot, se utilizó la convención de Denavit-Hartenberg sobre sus eslabones y articulaciones. Se establecieron los sistemas coordenados en las articulaciones (posición y orientación), para luego poder formar la tabla característica del robot. Las Figuras A-1 y A-2 en el Anexo A muestran el resultado de aplicar la convención.

Logrando la siguiente tabla de parámetros de Denavit-Hartenberg.

Tita (rad)	d (m)	a (m)	alfa (rad)	sigma
q1	0.205	0.050	$\pi/2$	0
q2	0.000	0.330	0.000	0
q3	0.000	0.335	0.000	0
q4	0.000	0.000	$\pi/2$	0
q5	0.070	0.000	0.000	0

Tabla 2. Matriz DH del robot.

Con la matriz de parámetros y los rangos articulares ya definidos, se puede comenzar a utilizar en Matlab el toolbox de Peter Corke, en el cual se debe definir un objeto “robot”, que cuenta con estos parámetros como características. También, se hace definición de un vector de “offsets”, con el cual se ubicará al robot en una posición inicial (para el trabajo posterior) convenientemente elegida. Definido de la siguiente manera en el script (valor correspondiente a cada una de las articulaciones).

```
R.offset = [0, pi/2, -pi/2, pi/2, 0];
```

En la Figura A-3 del anexo A, se muestra la comparativa entre la posición que el robot toma al no/sí considerar el vector de offsets definido.

Por último, la matriz de base es la identidad de 4x4, lo cual indica que el robot no está ni desplazado ni rotado con respecto a los ejes del sistema base. La matriz de tool presenta el desplazamiento comentado anteriormente de 70mm con respecto al sistema ubicado en la brida al final de la cadena cinemática.

5.2. Cinemática directa

Para resolver el problema de la cinemática directa y obtener la posición y orientación del efector final en el espacio cartesiano a partir de posiciones articulares dadas, se utilizó la metodología basada en el producto de matrices de transformación homogénea. Estas matrices permiten expresar cualquier punto o vector definido en un sistema de coordenadas dado, en el siguiente sistema dentro de la cadena cinemática.

La transformación entre el sistema de coordenadas $i-1$ y el sistema i se representa mediante la matriz homogénea:

$${}^{i-1}T_i = Rot(z_{i-1}, \theta_i) * Tras(z_{i-1}, d_i) * Tras(x_i, a_i) * Rot(x_i, \alpha_i)$$

El producto de estas transformaciones sucesivas permite, a partir del conocimiento de la matriz DH del robot y de los ángulos articulares, obtener las coordenadas y orientación del efector final en el espacio cartesiano con respecto al sistema base.

Para implementar esto, se utilizó el método “A(J, Q)”, contenido en el objeto R (robot) del toolbox, el cual recibe el número de articulación y el vector completo de posiciones articulares y devuelve la matriz de transformación homogénea correspondiente (resultado del producto antes mencionado).


```
T = R.base; % Inicializar T con la base del robot R.base
if sistemas(1) == 1
    trplot(T, 'frame', '0', 'color', 'r', 'length', 0.5);

end

% Recorrer y graficar los sistemas de referencia
for i = 2:length(sistemas)-1 % Iterar sobre el número de articulaciones (grados de libertad)
    T = T * R.A(i-1,vec_articular);
    if sistemas(i) == 1
        trplot(T, 'frame', num2str(i-1), 'color', 'r', 'length', 0.5);
    end
end

if sistemas(end) == 1
    T = T * R.A(R.n,vec_articular)* R.tool;
    trplot(T, 'frame', num2str(R.n), 'color', 'r', 'length', 0.5);
end
```

Figura 5. Implementación de la cinemática directa en Matlab.

Para verificar la correcta implementación y ploteo, se hace uso del método “teach()” también contenido en el objeto robot, desde el cual se puede obtener la posición y orientación del extremo del robot, variando sus coordenadas articulares manualmente.

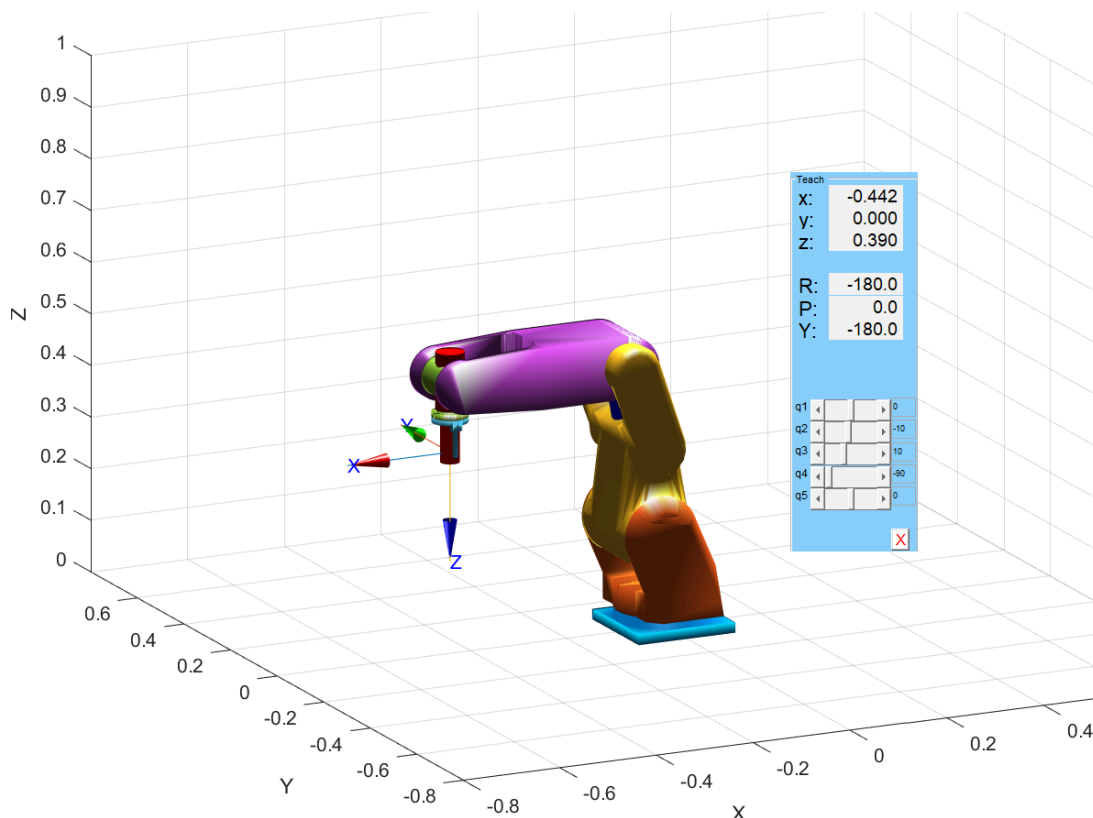


Figura 6. Visualización de la posición y orientación otorgada por el método teach, al posicionar manualmente desde la interfaz.

$$T = \begin{bmatrix} -1.0000 & 0 & 0 & -0.4423 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.0000 & 0.39 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 7. Matriz de transformación del efector final con respecto a la base.

En la Figura 6 se posicionó manualmente al robot de tal forma que sea fácilmente identificable la rotación de los ejes del efector final con respecto a los de la base. Las coordenadas del efector final mostradas en la Figura 6 y su orientación se ven claramente reflejadas en la matriz T de la Figura 7, calculada utilizando la metodología antes mencionada.

5.3. Cinemática inversa

El problema de cinemática inversa es un poco más complicado, pues se tiene un punto y orientación del efector final en el espacio cartesiano, representados por una matriz homogénea, y se quieren conocer las posiciones articulares que conducen a esa matriz. Es decir, ahora en vez de ir del espacio articular al cartesiano (problema de la cinemática directa), se busca ir del espacio cartesiano al espacio articular.

Al examinar Figura A-1 y A-2 del Anexo A, se observa que el robot cuenta con 3 grados de libertad dispuestos para el posicionamiento espacial y con una muñeca “casi esférica” (no cuenta con las tres rotaciones, solo dos) que le permiten orientar al punto en dos de las tres rotaciones espaciales posibles.

Dado que los ejes de las articulaciones 4 y 5 tienen un punto de cruce común, característica compartida con la muñeca esférica de robots de 6 grados de libertad (GDL), es posible aplicar el método de Pieper para resolver la cinemática inversa de este robot. Este método, diseñado para sistemas con muñecas esféricas, permite simplificar el cálculo de orientaciones. En este caso, sin embargo, el robot no cuenta con el tercer GDL en la muñeca, lo que limita la orientación completa en el espacio y afecta la cantidad de soluciones posibles para cada articulación. Más adelante se discutirá en detalle cómo esta restricción influye en el número de configuraciones viables para la orientación del efector final.

En el Anexo B se formula el desarrollo completo de la implementación propia del método de Pieper al brazo.

Por último se aborda la discusión sobre la cantidad total de soluciones posibles de obtener. Estudiando la Figura 8 (robot con 6 GDL) y comparándolo con el propio (de 5 GDL), se observa que al propio le falta esta cuarta articulación, la cual es la responsable de agregar 4 soluciones posibles a las planteadas, dando un total de 8 soluciones matemáticas para este tipo de planteo en un robot de 6 GDL. Es por esto, que se concluye que para

cualquier punto en el espacio de trabajo, para el robot de 5 GDL existirán como máximo sólo 4 configuraciones posibles de posicionar las articulaciones del robot.

Lo último que queda por realizar en la resolución de la cinemática inversa del robot, es restar los offsets en cada uno de los valores θ obtenidos para cada vector solución. De este modo se logra como solución, el ángulo desde la "posición inicial" del robot.

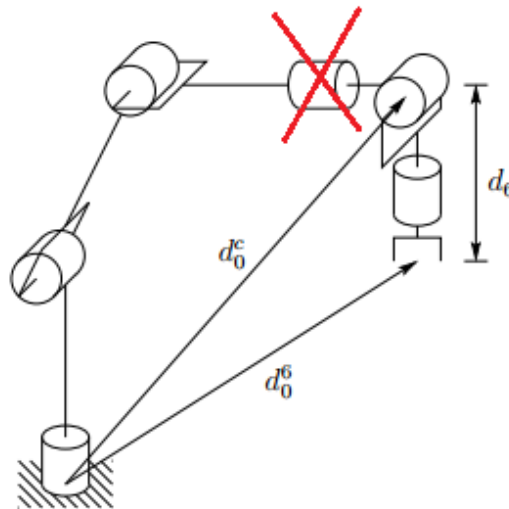


Figura 8. Robot de 6 GDL.

Para verificar el correcto funcionamiento de la implementación en MATLAB de la cinemática inversa, se le da al programa el vector $[0 \text{ pi}/6 \text{ } 0 \text{ pi}/6 \text{ pi}/2]$ para que calcule la cinemática directa y luego la inversa, devolviendo todas las soluciones posibles, una de las cuales es el vector dado. En la Figura 9, la primera fila corresponde al mismo vector, en grados.

```
vec_articular =
    0    0.5236    0    0.5236    1.5708

Soluciones articulares encontradas (en grados):
    0.0000    30.0000    0    30.0000    90.0000
   -180.0000    67.2205    9.1144    43.6650   -90.0000
    0.0000   -60.8616   180.0000   -59.1384    90.0000
   -180.0000   -14.3994   170.8856   -36.4862   -90.0000
```

Figura 9. Verificación de la cinemática inversa.

Es importante destacar que, debido a errores numéricos en MATLAB, puede ocurrir que al calcular $\text{atan2}(0,-1)$, el valor cero se aproxime ligeramente como un número negativo. En otras palabras, a veces se evalúa como $\text{atan2}(0,-1)$ y otras como $\text{atan2}(-0,-1)$, lo cual podría provocar que una articulación cambie repentinamente de un ángulo a su opuesto en un instante, generando discontinuidades no deseadas en la trayectoria. Para solucionar esto, se implementó una tolerancia: si el valor está dentro del rango de la tolerancia, se redefine

como 0, evitando así el salto brusco en el ángulo de la articulación, siendo coherente con la trayectoria previa que el robot venía trayendo.

5.4. Relación de velocidades

Para analizar el comportamiento cinemático del robot y su capacidad de seguir trayectorias, es necesario entender cómo se relacionan las velocidades de sus articulaciones con la velocidad del efector final. Este análisis se realiza a través del Jacobiano, una matriz que permite expresar la relación entre las velocidades articulares y las velocidades lineales y angulares del extremo del robot. En el caso de un robot de 5 GDL, la matriz Jacobiana original es de tamaño 6x5, lo que implica que no es posible controlar simultáneamente todas las componentes de posición y orientación del efector final. Esto hace que sea necesario realizar una reducción del Jacobiano.

Para obtener este Jacobiano reducido, se realizaron pruebas eliminando diferentes filas de la matriz Jacobiana completa. Se evaluó si el determinante de la matriz resultante tenía sentido desde el punto de vista físico y matemático, con el objetivo de obtener una matriz cuadrada de 5x5 que pudiera ser invertida para el análisis cinemático.

Se encontró que eliminando la última fila de la matriz Jacobiana completa (correspondiente a una componente de la velocidad angular) se obtuvo un determinante que no depende de las articulaciones q_1 y q_5 , lo cual era consistente con la estructura y grados de libertad del robot. Este resultado es adecuado, ya que q_1 únicamente modifica el plano sobre el cual se analizarán las singularidades, y el eje 5, no puede por sí solo alinearse con ningún otro, por lo que no tendrán impacto en las singularidades del robot.

Las singularidades del robot se pueden analizar buscando aquellas configuraciones articulares las cuales hacen que el determinante de la matriz jacobiana (reducida en este caso) se haga nulo. En la Figura 9 se muestra la expresión simbólica obtenida del determinante.

$$\begin{aligned} \det(J_r) = & \frac{148137 \cos(q_3 - q_4)}{16000000} - \frac{72963 \sin(2q_2 + q_4)}{8000000} + \frac{72963 \sin(2q_3 + q_4)}{8000000} + \frac{15477 \cos(2q_2 + 3q_3 + 2q_4)}{8000000} \\ & + \frac{2211 \cos(q_2 + 2q_3 + q_4)}{800000} + \frac{148137 \cos(2q_2 + q_3 + q_4)}{16000000} + \frac{2211 \cos(q_2 + q_4)}{800000} + \frac{148137 \cos(q_3 + q_4)}{16000000} \\ & + \frac{15477 \cos(q_3)}{4000000} + \frac{15477 \cos(2q_2 + q_3 + 2q_4)}{8000000} + \frac{148137 \cos(2q_2 + 3q_3 + q_4)}{16000000} + \frac{72963 \cos(q_4)}{8000000} - \frac{72963 \sin(2q_2 + 2q_3 + q_4)}{8000000} \end{aligned}$$

Figura 10. Expresión simbólica del determinante del Jacobiano reducido.

Observando la expresión del determinante y evaluando para aquellos puntos donde éste se anula, se encontró a partir de su expresión simbólica, aquellas configuraciones que dan la nulidad como resultado. En la Figura 11 se presenta el trazo realizado por el efector final, al pasar por todos los puntos donde el determinante es cero.

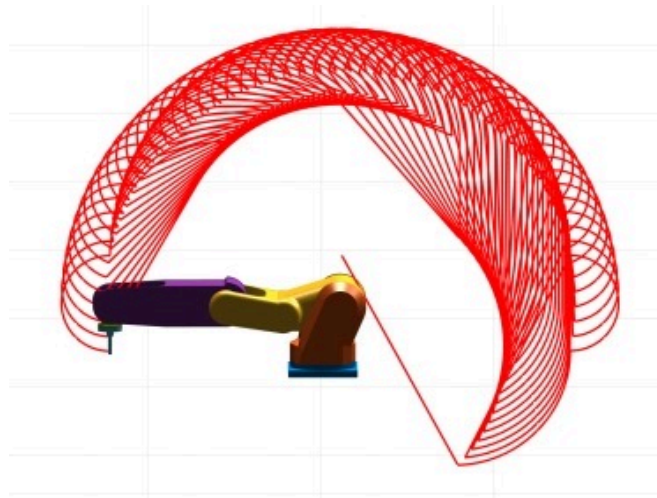


Figura 11. Lugar geométrico de las singularidades en el plano XZ.

Se puede observar y concluir que existe cierto patrón que siguen estos puntos, en general, las singularidades cumplen con alguna de las siguientes características:

- Configuraciones donde $q_3 = \pi/2$ (respecto a la posición inicial, es decir, respecto al offset de $-\pi/2$). En esta configuración el robot se extiende a su máximo alcance (ejemplo Figura C-1), alineando los 3 ejes z de los sistemas coordenados S1, S2 y S3 en un mismo plano en el espacio. Estos puntos singulares serán independientes del resto de valores articulares (q_1 , q_2 , q_4 y q_5). Por esto es que se observa el trazado de una semicircunferencia (todo el rango de q_4) en todo el rango de la segunda articulación (q_2) en la Figura 11.
- Configuraciones donde el eje z del efector final S5 está en la misma dirección que el eje z del sistema base S0 (dirección positiva/para arriba o negativa/para abajo) (Figura C-2). En esta configuración el robot pierde la capacidad de rotar de forma independiente alrededor de esos ejes, habiendo una redundancia en el control de la orientación, ya que la rotación en torno al eje z del efector final es indistinguible de la rotación en torno al eje z del sistema base. Esto crea una pérdida de control sobre una de las orientaciones del efector final.

Cabe aclarar que, al eliminar una fila de la matriz jacobiana, la solución no puede considerarse completa pues existe un parámetro que se está ignorando y del que no es posible obtener información para su debido control.

5.5. Planificación y generación de trayectorias

Se destacan los siguientes puntos a tener en cuenta en el desarrollo y planificación de la trayectoria:

1. Cada muestra se encuentra ubicada en una posición de la caja que las contiene (primera estación), por lo que se deberán extraer con cuidado y siguiendo una trayectoria lineal vertical en el recorrido hasta que se la extrae completamente de la caja.

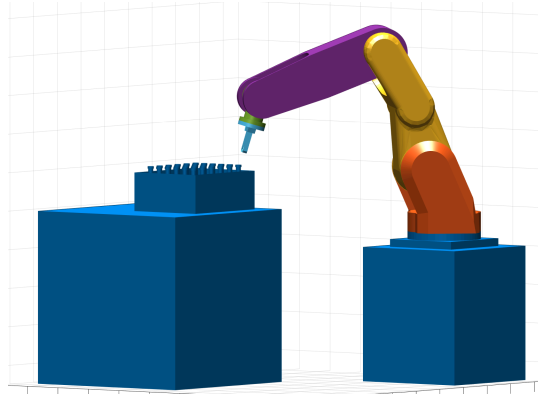


Figura 12. Extracción de muestras.

2. Una vez extraída la muestra de la caja, se la debe transportar hacia la estación siguiente, donde se la deberá hacer rotar sobre su eje principal, para que el escáner pueda captar adecuadamente el código de barras.
3. En el siguiente tramo de la trayectoria, previo a llegar a la máquina de hemogramas, el brazo debe agitar/voltar a la muestra, con el objetivo de que el contenido de sangre en el tubo se homogeneice.

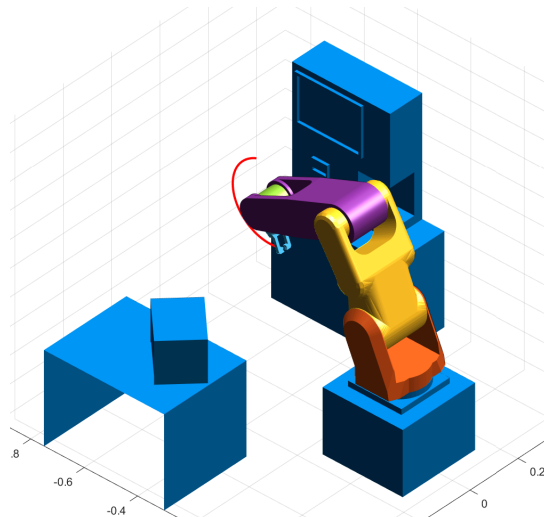


Figura 13. Agitación de la muestra previo al análisis de hemogramas.

4. Un detalle a tener en cuenta es que previo a realizar el análisis de hemograma, se debe realizar un cambio de orientación entre la muestra y el efector final del robot. Para esto, se ha propuesto un soporte (Figura 14), el

cual se utiliza para dejar a la muestra en el orificio que posee y luego se la vuelve a agarrar, previo reposicionamiento de la muñeca del robot (Figura 15 y Figura 16).

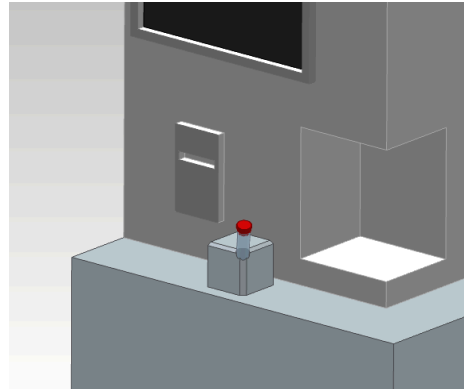


Figura 14. Soporte de muestras.

Al realizar este cambio, se busca reposicionar al eje principal del tubo de ensayos respecto al eje z del efector final (antes coincidentes) a una en la cual existe un ángulo relativo entre estos sistemas que permita posteriormente poder ingresar el tubo en la máquina. Esto se debe hacer debido a que no se cuenta con un sexto grado de libertad, lo cual permitiría mayor flexibilidad en la muñeca.

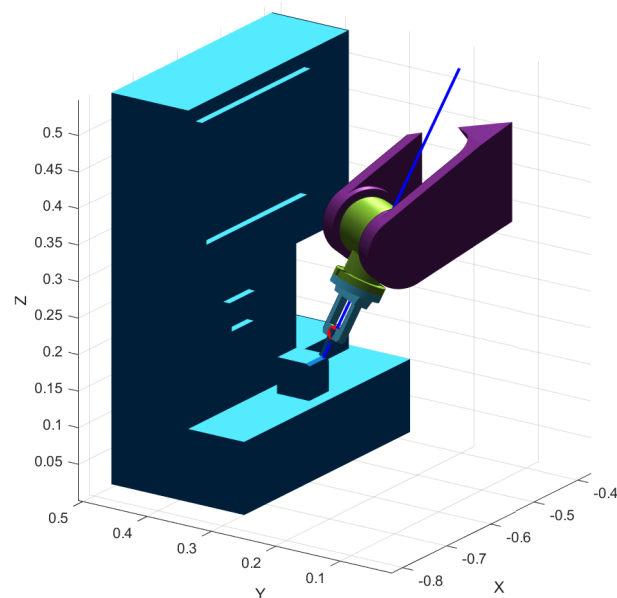


Figura 15. Posicionamiento de la muestra en el soporte.

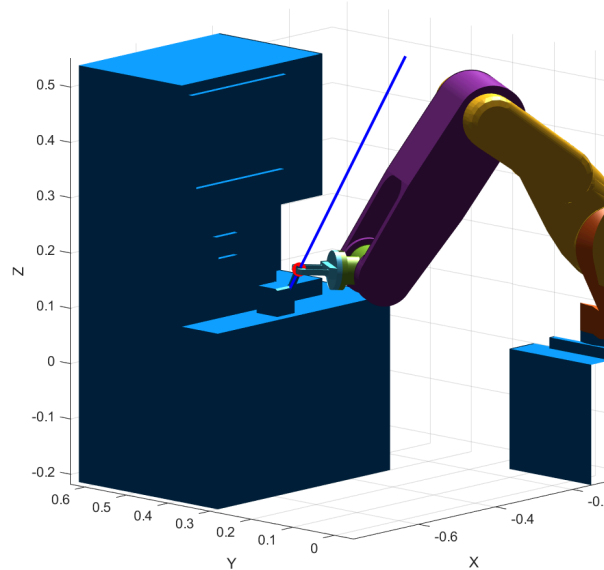


Figura 16. Agarre del tubo con la muñeca reposicionada.

5. Teniendo en cuenta todo lo anterior, se llega con la muestra a la máquina de análisis de hemogramas, donde se deberá ubicar a la muestra en una inclinación y posición tal que la máquina pueda con su aguja perforar el tapón y extraer la muestra correspondiente para su estudio.
La aguja sale del interior de la máquina para perforar, extrae la muestra y luego vuelve a guardarse en el interior de la máquina.
6. Por último, se lleva la muestra desde la máquina de hemogramas, siguiendo una trayectoria sin mayores dificultades, hasta la estantería correspondiente del refrigerador. Una vez allí, se posiciona la muñeca para poder dejar el tubo enfrente con el correspondiente agujero donde se lo desea ubicar (Figura 17). contemplando que éste ya no se encuentra con su eje principal coincidente con el eje z del efector final, sino que a partir del reacomodo de la muñeca en los pasos anteriores, ahora se tiene un ángulo a considerar entre estos dos.

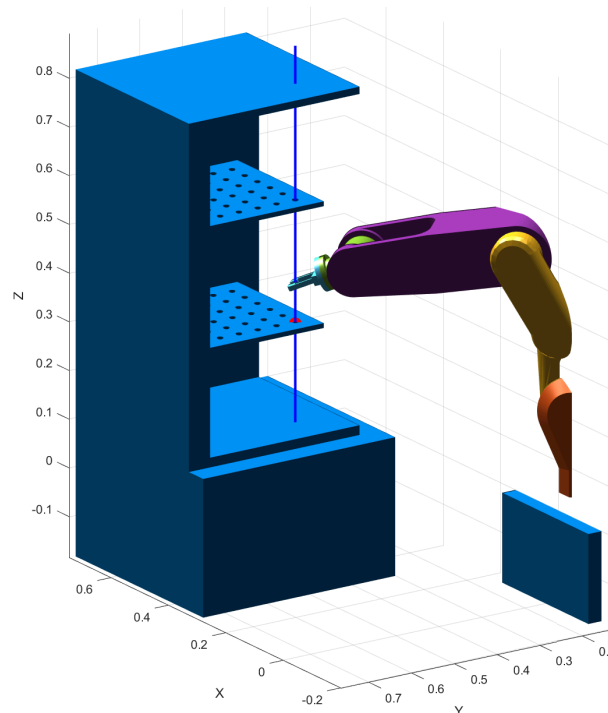


Figura 17. Posicionamiento en refrigerador.

En general, para obtener los puntos en el espacio a interpolar, se hizo uso de la herramienta `teach()` para ubicar manualmente las articulaciones en las posiciones deseadas. Esto fue práctico principalmente cuando no era necesario pasar de una postura a otra en línea recta, por lo que la función más utilizada fue `jttraj()`, que no tuvo mayores inconvenientes.

Para trazar trayectorias rectas con el efector final, se comenzó ubicando dicho efector en un punto específico mediante la función `teach()`, asegurando una orientación adecuada. Esta orientación inicial alinea uno de los ejes del efector final con la dirección de la trayectoria deseada, que típicamente coincide con el eje de las muestras.

Una vez alineado, se obtiene el versor k del sistema de coordenadas de la pinza. Con este versor y el punto de partida, se traza la recta que define el camino a seguir en la trayectoria. A partir de la ecuación de la recta, es posible calcular otros puntos a lo largo de ella. Para que el efector final se desplace a lo largo de esta recta sin cambiar su orientación, las matrices de posición inicial y final deben compartir la misma matriz de rotación 3×3 . Esto se logra resolviendo la cinemática directa para el punto inicial y aplicando la misma orientación al punto de destino en la recta.

Finalmente, con la función `cttraj()` se interpoló entre estos dos puntos, generando una trayectoria suave y recta que mantiene la orientación del efector final.

En el caso del posicionamiento en el refrigerador, el eje z del efector final tiene un ángulo de alrededor de 23° con el vector $(0, 0, -1)$ que describe la dirección de la recta que se ve en la Figura 17. Esto significa que el sistema coordenado del efector final debe ser tal que compense este ángulo, para que la muestra entre con su eje coincidente a la recta.

Empleando una combinación de las trayectorias calculadas a través de `jtraj` y `ctrj`, junto con la adición de un tramo interpolado con `mstraj`, se logró la trayectoria completa que el robot sigue.

5.6. Simulaciones y gráficas finales

Para corroborar la correcta aplicación y uso del robot, se cargaron los modelos (STL de diseños propios) tanto de los eslabones del robot, como de la configuración de la celda de trabajo. Una vez hecho esto, se procede a animar los movimientos, siguiendo la trayectoria propuesta en el punto anterior (Figura 18). También, se adjuntan gráficas en función del tiempo, de las posiciones, velocidades y aceleraciones, tanto articulares como del efector final (Figuras D-1y D-2 del Anexo D).

Se adjunta a la entrega el script "`tray_completa.m`" que ejecuta la simulación.

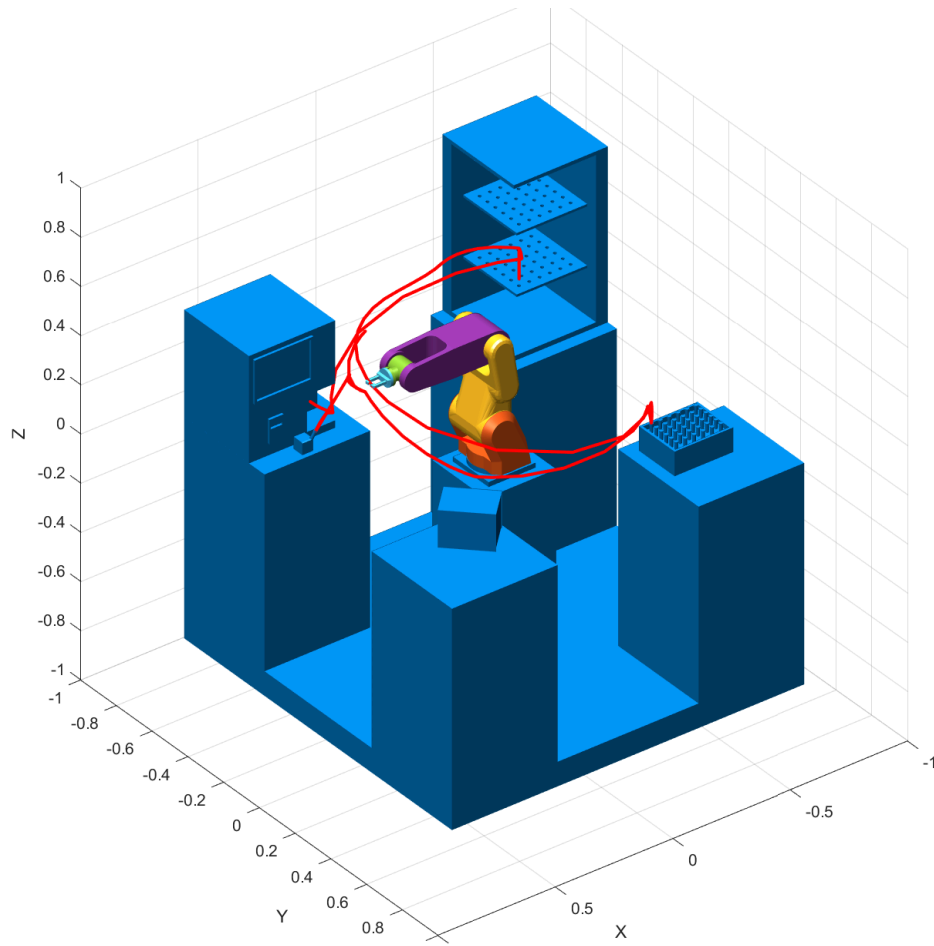


Figura 18. Simulación de la trayectoria en el entorno de trabajo.

Al tener previsto que cada ciclo de trabajo no dura más de 60 segundos, las gráficas articulares no presentan picos de velocidad o aceleración inalcanzables pues se le da

tiempo al robot a que se posicione correctamente en cada punto dado. Teniendo esto en cuenta, las gráficas arrojan números razonables, comportamientos esperados y controlados.

6. Sensores y actuadores del sistema

6.1. Sensores

Para llevar a cabo las trayectorias y tareas que el robot debe realizar, se plantean una serie de sensores y actuadores que el sistema deberá tener, con el objetivo de que desarrolle su actuar dentro de un entorno controlado y con los recaudos necesarios.

- Sensor de fuerza

Para asegurar la correcta sujeción de los tubos, dado que se van a realizar tareas de manipulación delicada, se plantea el uso de un sensor de fuerza, que sirva para calibrar y adaptar la fuerza de manipulación en la pinza para cada tubo con el que se vaya a trabajar.

- Cámara con visión artificial

Se colocará una cámara en el techo de la celda de trabajo, mirando hacia abajo, la cual estará integrada en un sistema de visión artificial desarrollado por software. Este sistema permitirá reconocer y localizar objetos no previstos del entorno, como así también de la presencia humana dentro de la celda de trabajo. Conectado al sistema informático que maneja al robot, se podrán hacer paradas de emergencia en movimiento, se podrá informar al robot sobre las posiciones en particular de las que puede tomar/dejar muestras, entre otras.

- IMU con magnetómetro

Una IMU (Unidad de Medición Inercial) con acelerómetros y giroscopios ofrece información sobre aceleración y orientación en el espacio, mientras que el magnetómetro permite conocer el rumbo absoluto del robot en relación con el campo magnético de la Tierra. Estos sensores son útiles para mantener una posición de referencia y lograr una precisión mayor en el efector final, junto con el uso de la cámara, para tener su posición y orientación controladas.

- Finales de carrera

Necesarios para evitar que el robot sobrepase sus límites articulares durante el funcionamiento y además para tener la capacidad de hacer homing. Ayudan también a calibrar la cámara y los IMU, proporcionando una capa de verificación en caso de desajustes o errores de lectura.

- Encoders incrementales

También se dota al brazo robótico de encoders, los cuales van ubicados según conveniencia, en cada articulación. Estos sensores proporcionan mediciones precisas de

posición angular en los actuadores (motores eléctricos) y son esenciales para mantener el control preciso sobre las articulaciones del robot.

6.2. Actuadores

Se elegirían actuadores eléctricos, más precisamente servomotores debido a su precisión y alta capacidad de torque, además de su alta eficiencia, lo que los hacen ideales para mover la masa del brazo consumiendo menos energía que otros motores. Para el efector final se podría utilizar un servomotor más pequeño que permita abrir y cerrar la pinza, con un control efectivo de su torque, para que funcione en conjunto con el sensor de fuerza.

7. Conclusiones

Se resalta que el brazo robótico, si bien está inspirado en un robot existente, posee medidas y piezas de diseño completamente original. Asimismo, la celda de trabajo fue también una creación de los autores. Esto fue ventajoso debido a que si el brazo no podía llegar a ciertos lugares, cambiar la disposición de los elementos en la celda o bien alguna medida del brazo lograban solucionar ese problema. De hecho, el agregado del soporte de muestras en la máquina de hemogramas fue esencial para evitar añadir un grado de libertad extra, lo cual también, realísticamente, abarata costos y ahorra mucho tiempo.

Unos detalles a tener en cuenta para trabajos futuros, es que el robot aún no consigue llegar a la totalidad de puntos donde podrían ubicarse las muestras, sea en la primera estación o en el refrigerador. Como se dijo anteriormente, esto puede corregirse modificando la celda de trabajo o bien las medidas del brazo (obviamente lo primero es más fácil y rápido de implementar).

Otra particularidad que se podría incorporar es la posibilidad de realizar otros tipos de análisis (sumando estaciones a la celda de trabajo) a las muestras de sangre, de manera que el robot podría ser capaz de identificar a cuáles muestras se les deben realizar qué estudios y clasificarlas siguiendo un cierto criterio.

8. Referencias

Apunte para la cinemática inversa (método de Pieper)

Cátedra de Robótica I. (2024). *Material Adicional: Cinemática Inversa*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo.

https://aulaabierta.ingenieria.uncuyo.edu.ar/pluginfile.php/169762/mod_assign/introattachment/0/TP5B-2023-Material%20Adicional.pdf

Libro de Peter Corke

Corke, P. I. (2017). *Robotics, Vision and Control: Fundamental Algorithms in MATLAB®(2da ed.)*. Springer.

9. Anexos

Anexo A: Parametrización del robot

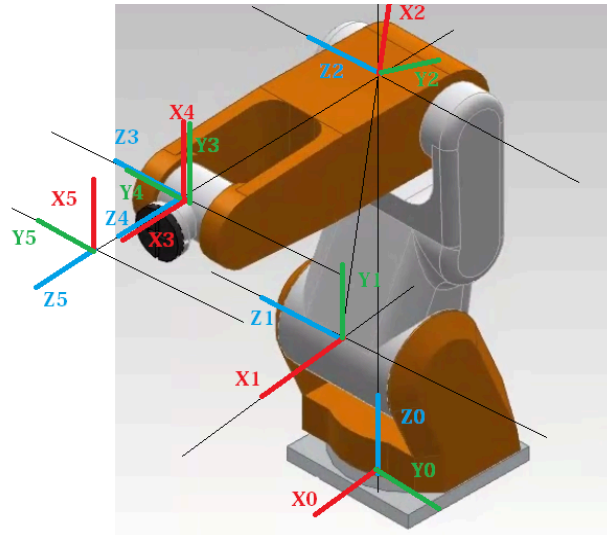


Figura A-1. Perspectiva isométrica con sistemas coordenados convención DH.

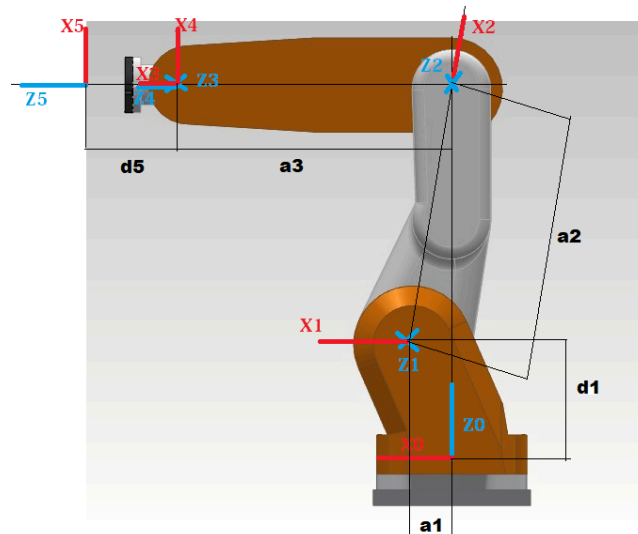


Figura A-2. Vista lateral con sistemas coordenados convención DH.

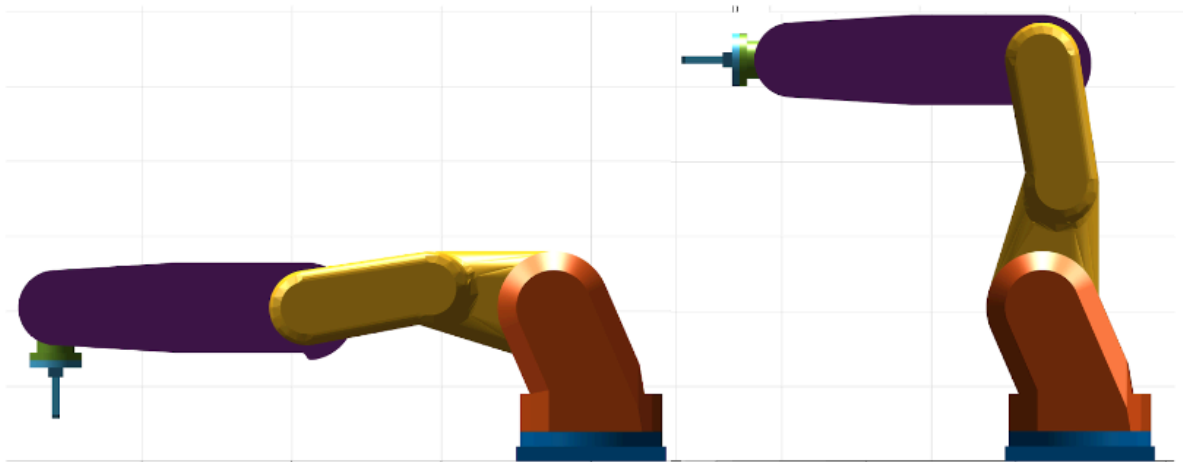


Figura A-3. Vista lateral del robot sin (izquierda) y con vector offset (derecha) definido.

Anexo B: Cinemática inversa con método de Pieper

Planteo de la función de cinemática inversa

Para comenzar a resolver el problema, se tiene que tener en mente que el método de Pieper resuelve las posiciones angulares de la cadena cinemática, y no las del robot en un contexto determinado. Es decir, no tiene en cuenta modificaciones que aplican a la cinemática directa como la matriz base, tool y los offsets en las articulaciones. Es por eso que como primer paso se tienen que desacoplar dichas matrices y configurar todos los offsets a 0 antes de empezar el problema, evitando así errores al utilizar el objeto Robot.

Se pueden desacoplar las articulaciones del robot, y resolver dos problemas por separado. Para definir el centro de la muñeca se utiliza la distancia d_5 , que es la distancia entre el punto extremo (conocido a partir de una matriz 0T_5 , dato) y el centro de la muñeca.

$$\bar{p}_c = \bar{d}_0^5 - d_5 \bar{a}_5$$

Donde:

- \bar{p}_c : vector de posición de la muñeca respecto del origen.
- \bar{d}_0^5 : vector de posición del extremo final respecto del origen (dato de la matriz de transformación homogénea del extremo).
- d_5 : parámetro de DH que indica la distancia entre el extremo y la muñeca.
- \bar{a}_5 : versor que indica la dirección del extremo, y por lo tanto, la dirección entre el extremo y la muñeca (dato de la matriz de transformación homogénea del extremo).

Al calcular el punto \bar{p}_c , se puede llevar el problema a dicho punto, y desde allí resolver la primera parte del problema de Pieper. La configuración del robot queda muy similar a la que se muestra en la imagen siguiente, con la diferencia de que en el robot diseñado existe

el parámetro a_1 , y en el de la imagen no. Aun así, ese cambio no dificulta la solución de ninguna manera, simplemente la modifica un poco respecto a la de uno de 6 GDL.

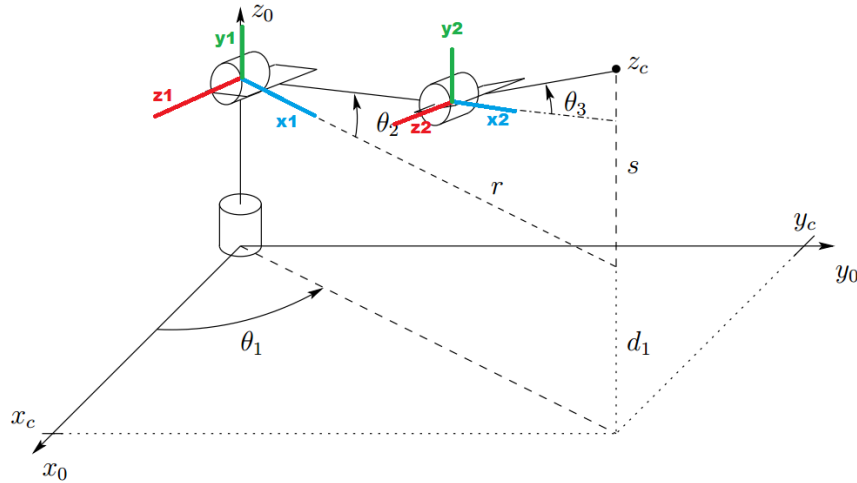


Figura B-1. Primer problema de Pieper.

Primera parte del primera de Pieper: Posición espacial de la muñeca

Para calcular θ_1 , se realiza:

$$\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{y_c}{x_c}\right)$$

Como θ_1 puede tomar valores en el rango de $\pm 180^\circ$, para la mayoría de puntos del espacio de trabajo existe un segundo valor de θ_1 que también será solución:

$$\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{y_c}{x_c}\right) \pm \pi$$

Para referir \bar{p}_c respecto al sistema 1, se hace uso de la siguiente matriz:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\cos(\alpha_1) * \sin(\theta_1) & \sin(\alpha_1) * \sin(\theta_1) & a_1 * \cos(\alpha_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\alpha_1) * \cos(\theta_1) & -\cos(\theta_1) * \sin(\alpha_1) & a_1 * \sin(\alpha_1) \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dicha matriz transforma cualquier vector expresado en coordenadas desde el sistema 1, a coordenadas en base al sistema 0. Esto fue implementado en el script de MATLAB utilizando:

```
T01_1 = R.links(1).A(q1(1)).double;
T01_2 = R.links(1).A(q1(2)).double;
```

Donde $q1(1)$ y $q1(2)$ corresponden a θ_1 y $\theta_1 \pm \pi$, respectivamente.

Para encontrar el punto \bar{p}_c referido al sistema 1, entonces se invierte 0T_1 utilizando un método propio que utiliza una propiedad para la inversión de matrices de transformación homogéneas:

$${}^1p_c = {}^1T_0 \cdot {}^0p_c = ({}^1x_c; {}^1y_c; {}^1z_c)$$

A partir de aquí, es posible encontrar θ_2 y θ_3 de la siguiente forma:

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\frac{{}^1y_c}{{}^1x_c}\right) \pm \cos^{-1}\left(\frac{a_2^2 + r^2 - a_3^2}{2a_2r}\right)$$

$$\text{siendo } r = \sqrt{\left({}^1x_c\right)^2 + \left({}^1y_c\right)^2}$$

Siempre con x_c e y_c referidos a S_1 . Notar que hay 2 posibles soluciones de θ_2 para cada una de los dos posibles valores de θ_1 .

Luego, se refiere el punto 1p_c con respecto al sistema S_2 calculando la siguiente matriz:

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & {}^1x_2 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & {}^1y_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con $({}^1x_2, {}^1y_2)$ siendo la posición del sistema 2 observada desde el sistema 1:

$${}^1x_2 = a_2 \cos(\theta_2) \quad {}^1y_2 = a_2 \sin(\theta_2)$$

Luego, se invierte 1T_2 y se resuelve:

$${}^2p_c = {}^2T_1 \cdot {}^1p_c = ({}^2x_c; {}^2y_c; {}^2z_c)$$

Que es el punto del centro de la muñeca referido al sistema 2. En la Figura B-2 se puede notar lo calculado anteriormente, para cada punto, θ_1 tiene dos configuraciones posibles y cada una de estas dos configuraciones, contempla dos combinaciones de θ_2 y θ_3 (codo arriba y codo abajo):

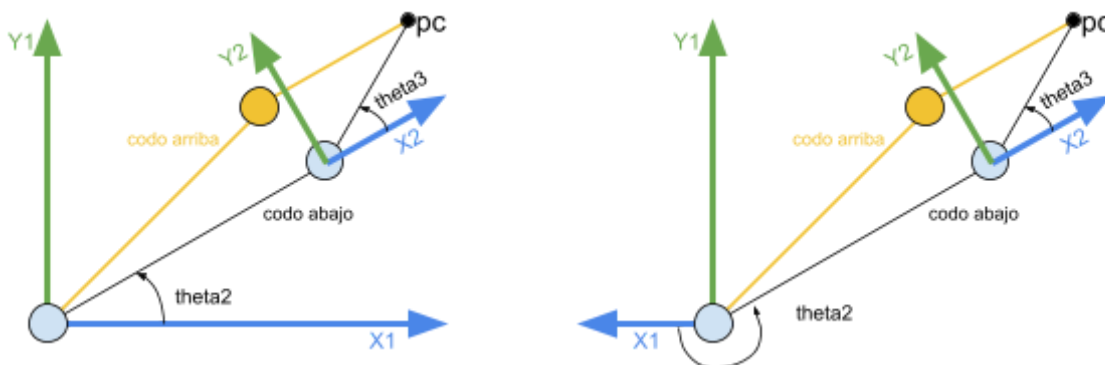


Figura B-2. Configuraciones codo arriba y codo abajo.

Por último:

$$\theta_3 = \text{atan2}\left(\frac{{}^2y_c}{{}^2x_c}\right)$$

Para encontrar 2T_3 , es decir, la matriz que expresa las coordenadas y orientación del sistema 3 con respecto al sistema 2, se hace:

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & {}^2x_3 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & {}^2y_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Con

$${}^2x_3 = a_3 \cos(\theta_3) \quad {}^2y_3 = a_3 \sin(\theta_3)$$

Entonces:

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$$

Teniendo la matriz de transformación del sistema 3 con respecto al sistema 0. El cálculo de todas las matrices puede hacerse con el mismo comando del toolbox que se usó al principio del problema.

Se vuelve a hacer notar que para cada θ_1 existen dos combinaciones (θ_2, θ_3) . Entonces, por el momento, hay 4 soluciones posibles. Así, existen 2 matrices 0T_1 para cada solución de θ_1 , 4 matrices 1T_2 , y 4 matrices 2T_3 . Al final de este análisis, se tienen entonces 4 matrices 0T_3 .

Segunda parte del primera de Pieper: Orientación espacial de la muñeca

En primer lugar se plantea la matemática necesaria para obtener la matriz 3T_5 , la cual se puede calcular con las matrices obtenidas previamente y la matriz dato del problema:

$${}^3T_5 = {}^3T_0 {}^0T_5$$

Siendo 3T_0 la inversa de la matriz de transformación homogénea 0T_3 .

En la Figura B-3, se dibujan los últimos tres sistemas coordenados de referencia que el robot posee. El origen y orientación del sistema 5 es conocido pues es proporcionado como entrada del planteo del problema (punto dato). El ángulo θ_4 que se quiere calcular se observa también en la Figura B-3.

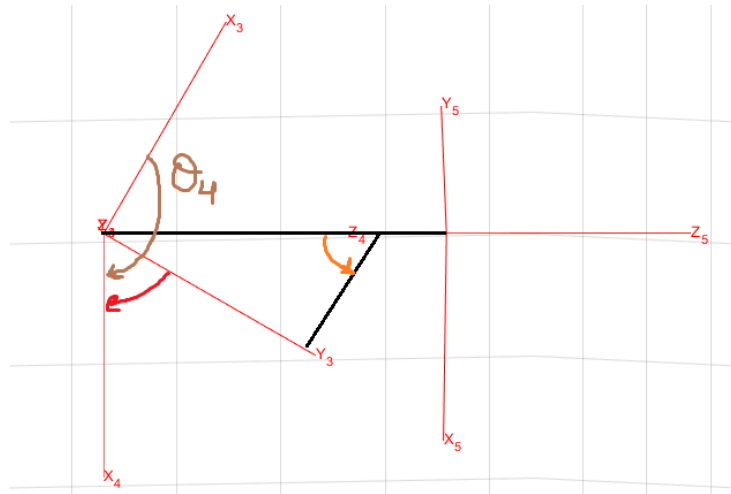


Figura B-3. Ángulo θ_4 .

Este ángulo se podría calcular sumando el que se indica con la flecha roja más 90 grados. El ángulo que se indica a la izquierda con la flecha roja, es igual al que se indica a la derecha con la flecha naranja. Por ende, por inspección, se lo puede calcular como el arcotangente de la proyección de z_5 sobre el eje y_3 , dividido la proyección de z_5 sobre el eje x_3 . Dichas proyecciones son los elementos (2,3) y (1,3), respectivamente, de la matriz 3T_5 . Se puede hacer esto debido a que z_4 y z_5 están siempre alineados porque el último sistema sólo implica un desplazamiento, ninguna rotación. Ahora se calcula la matriz 4T_5 :

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\cos(\alpha_4) * \sin(\theta_4) & \sin(\alpha_4) * \sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & \cos(\alpha_4) * \cos(\theta_4) & -\cos(\theta_4) * \sin(\alpha_4) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_4) & \cos(\alpha_4) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La última columna tiene ceros, pues no hay traslación entre el origen del sistema 3 al 4. Por último, para la obtención de θ_5 , se observa la Figura B-4.

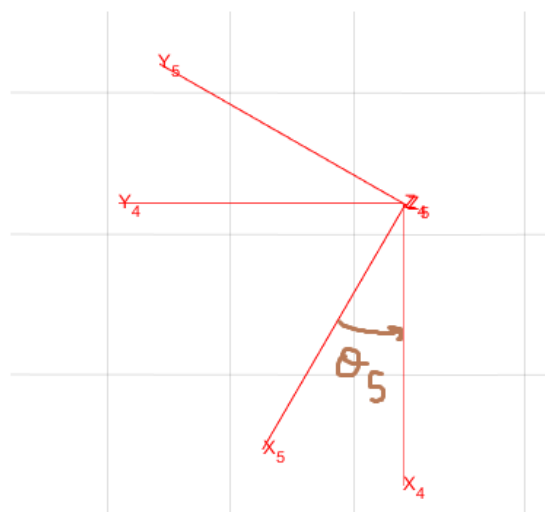


Figura B-4. Ángulo θ_5 .

Donde se puede concluir θ_5 simplemente como el arcotangente de la proyección de x_5 sobre y_4 dividido la proyección de x_5 sobre x_4 . Lo cual corresponde a los elementos (2,1) y (1,1) de la matriz 4T_5 .

Anexo C: Singularidades en la relación de velocidades

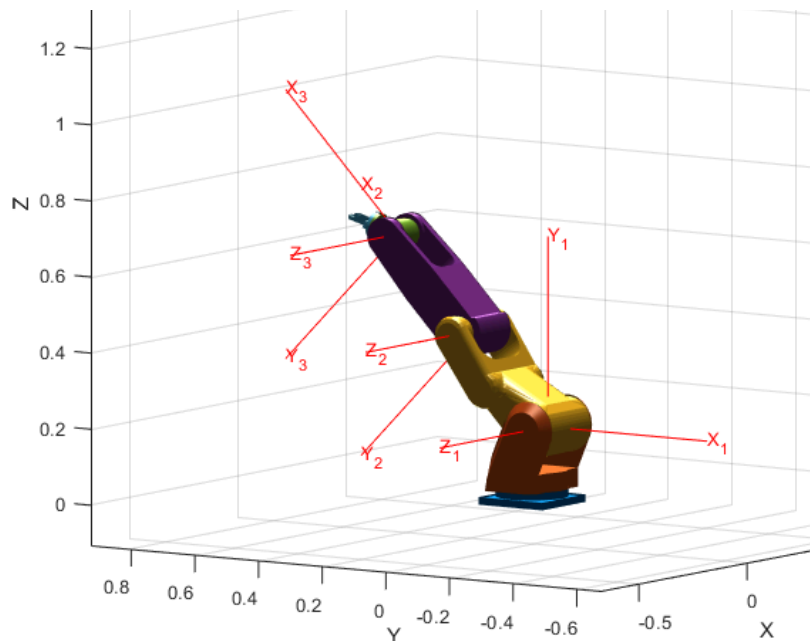


Figura C-1. Ejemplo de configuración articular para singularidad: caso 1.

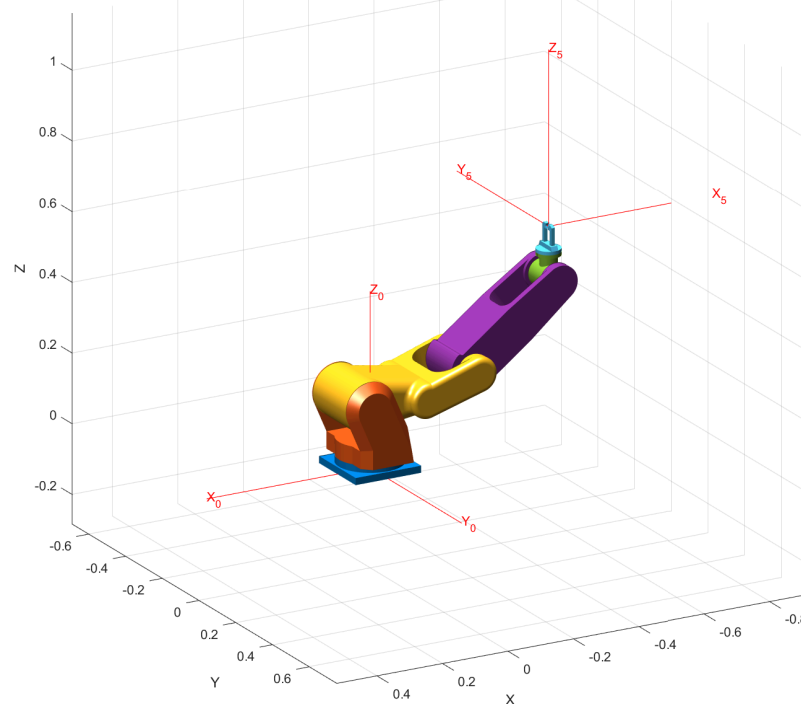


Figura C-2. Ejemplo de configuración articular para singularidad: caso 2.

Anexo D: Gráficas de simulación

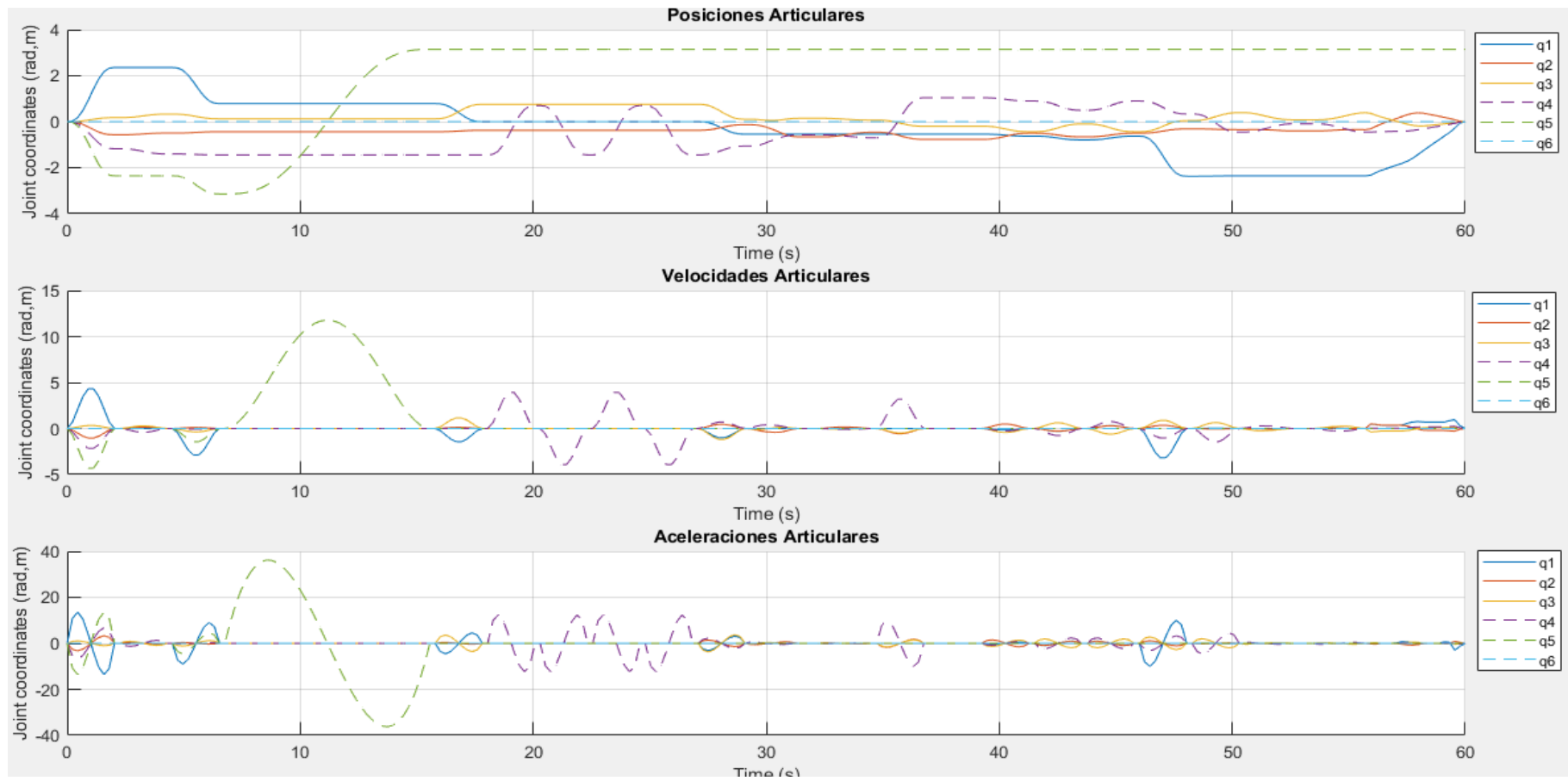


Figura D-1. Gráficas en el espacio articular de la posición, velocidad y aceleración en función del tiempo.

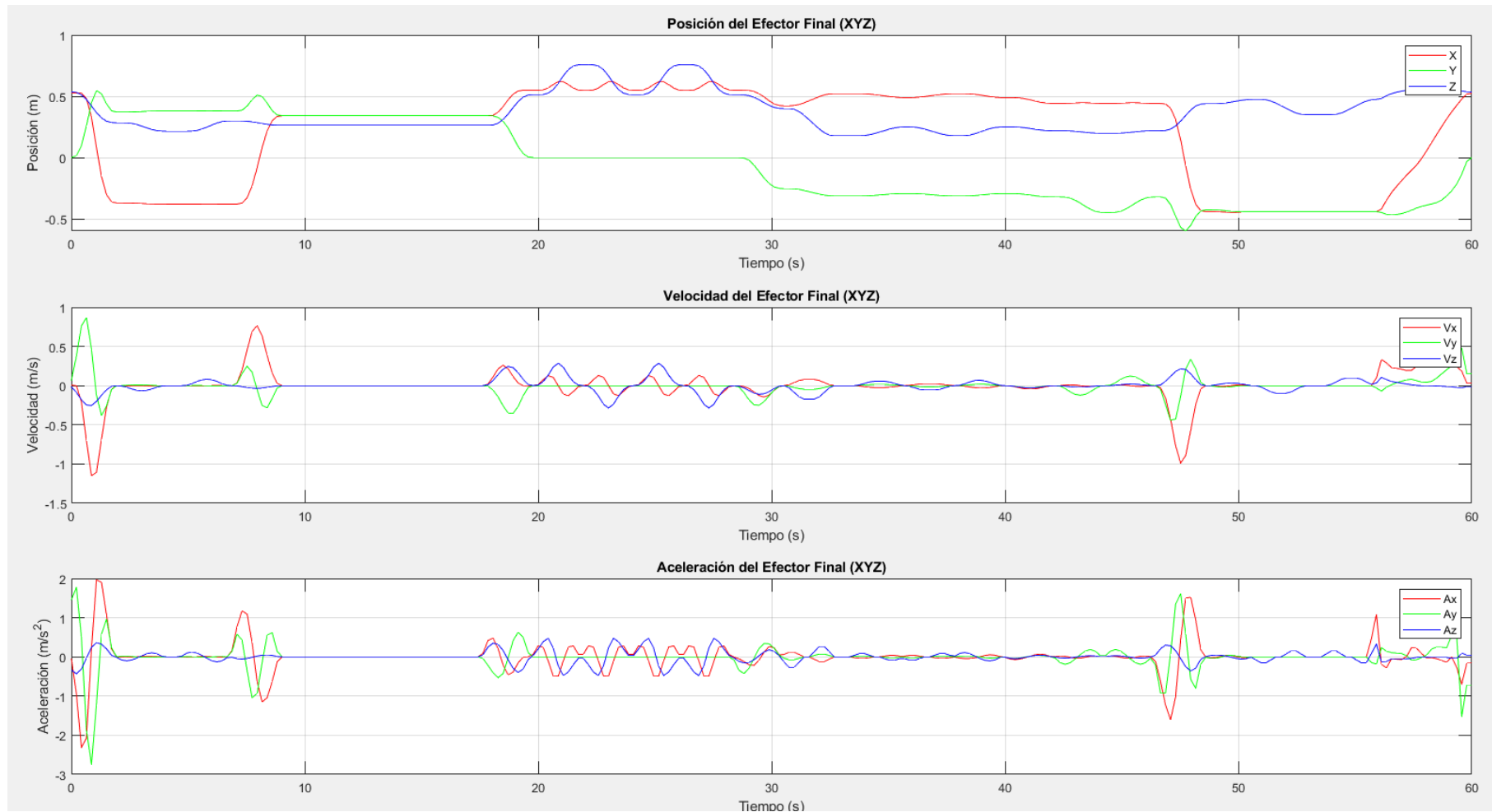


Figura D-2. Gráfica en espacio cartesiano de la posición, velocidad y aceleración del efector final en función del tiempo.

Anexo E: Extras relacionados a la entrega

Como complemento a la entrega de este anexo y su pertinente informe, se adjunta un enlace a la carpeta en Google Drive correspondiente al proyecto. En esta carpeta se encuentran:

- Los scripts desarrollados para ejecutar en MATLAB.
- Los archivos STL necesarios para la visualización de trayectorias.
- Los archivos PAR, STL y GCODE, necesarios para la impresión a escala del robot.
- Datasheets del robot industrial inspiración (FANUC LR Mate 200iD).
- Las piezas modeladas (.par), incluyendo eslabones, máquinas y el diseño de la celda de trabajo.

📁 PF_DALESSANDRO - PANONTO