

Proyecto Final

Robótica I

Juan Pablo Sibecas

Legajo: 12224

2022



Resumen

En el presente se desarrollará el estudio cinemático de un manipulador de 6 grados de libertad, con el propósito del traslado de chasis de automóviles de una etapa de la línea de producción a la siguiente en una fábrica automotriz.

El manipulador en estudio está basado en el modelo comercial KUKA KR 1000 1300 PA que es de gran tamaño y soporta cargas elevadas.

Las simulaciones se realizaron con el software de MATLAB y el toolbox de Peter Corke.



Índice

Resumen.....	2
Introducción	4
Especificaciones del Robot.....	5
Características básicas.....	6
Rango articular	6
Espacio de trabajo.....	7
Desarrollo	9
Denavit-Hartenberg	9
Cinemática Directa	11
Cinemática Inversa	11
Jacobiano.....	15
Planificación y Generación de Trayectorias	19
Interpolación Articular	20
Interpolación Cartesiana (con punto intermedio)	21
Selección de Sensores y Actuadores	23
Actuadores	23
Sensores	24
Fuente	25
Conclusión.....	26
Referencias.....	27
Anexo	28

Introducción

Se desea realizar una tarea simple de pick and place con objetos de gran tamaño y peso, para lo que se escogió un robot de altas prestaciones dinámicas KUKA KR 1000 1300 PA (Figura 1). El mismo posee 6 articulaciones rotacionales de gran porte que permiten realizar la tarea especificada con un alto grado de precisión.

El robot está montado en una base a 1m de altura y no hay obstáculos dentro del espacio de trabajo además de las bases inicial y final sobre las que se asientan los chasis, a 1m y 3m de altura respectivamente.



Figura 1 – KUKA KR TITAN 1000 1300 PA

Especificaciones del Robot

Se utilizaron los modelos STL desarrollados para este robot por Arturo Gil de ARTE que se pueden observar en MATLAB en la figura 2.

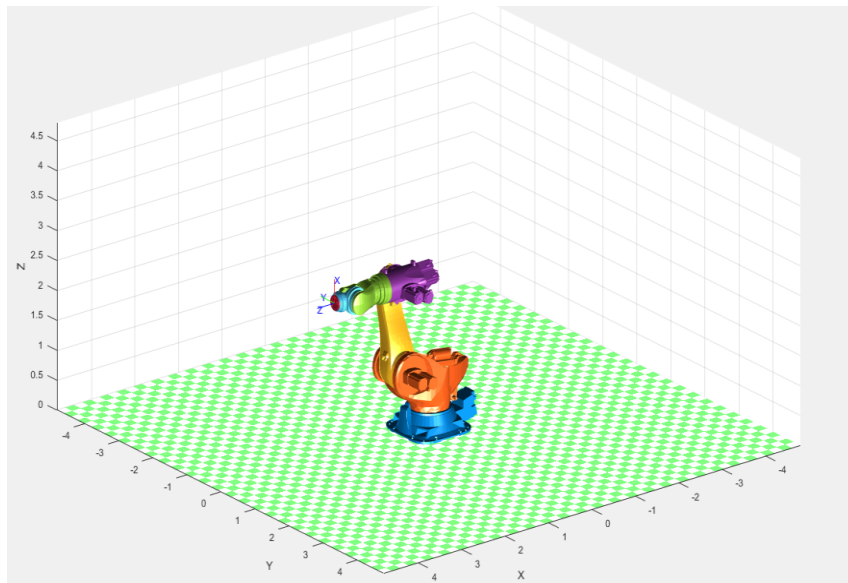


Figura 2 – Modelo STL del robot

Sobre los mismos también se diseñaron la base de 1m de altura y una herramienta tipo pala como efector final para sujetar la carga.

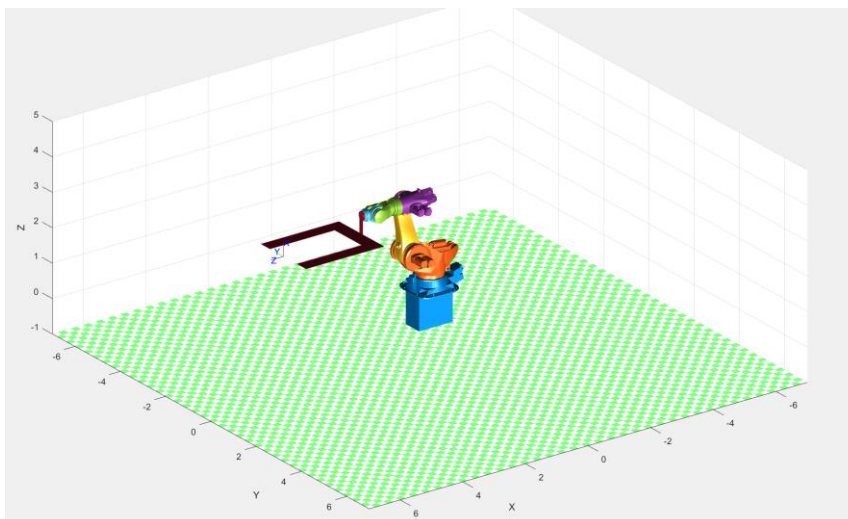


Figura 3 – Modelos STL Base y Tool

Características básicas

De la hoja de datos del robot (Anexo 1) se obtuvieron las siguientes especificaciones del mismo:

Peso 4690kg

Alcance máximo 3202mm

Carga máxima 1300kg

Repetibilidad de posición $\pm 0.1\text{mm}$

Rango articular

Eje	Rango de desplazamiento
1	$\pm 150^\circ$
2	$-17.5^\circ/130^\circ$
3	$-145^\circ/62^\circ$
4	-
5	$\pm 118^\circ$
6	$\pm 350^\circ$

Tabla 1 – Rango articular de cada eje

Además, se pueden determinar las dimensiones del robot a partir de la figura 3.

Gráfica del campo de trabajo

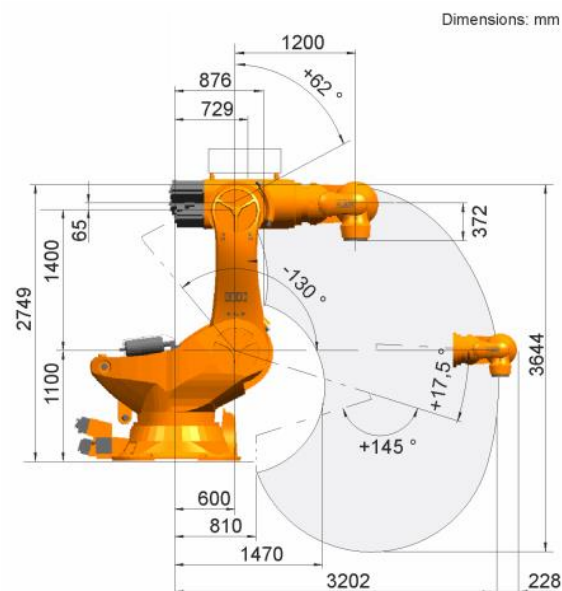


Figura 4 – Dimensiones del robot obtenidas de la hoja de datos

Espacio de trabajo

En las figuras 4 y 5 se puede observar el espacio de trabajo del manipulador en los planos XY y XZ respectivamente.

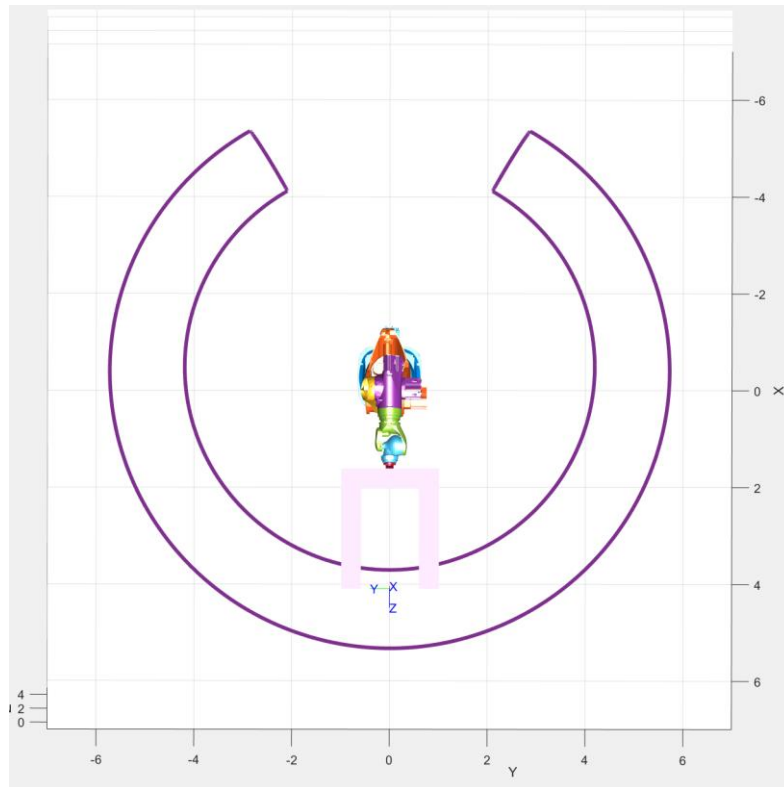


Figura 5 – Espacio de trabajo en el plano XY

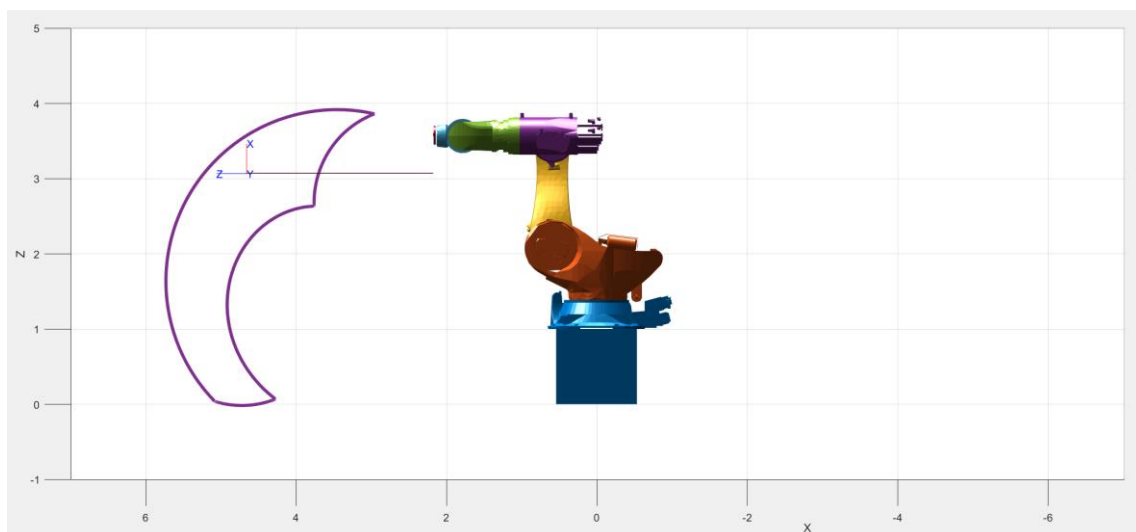


Figura 6 – Espacio de trabajo en el plano XZ



El espacio de trabajo es adecuado para la tarea que se debe realizar, ya que el robot tiene un alcance radial de aproximadamente 6m en el plano XY y puede alcanzar alturas entre 1m y 4m, manteniendo la orientación del efector final según requerido. Se debe posicionar al robot para que tanto la posición inicial como la final queden dentro de su espacio de trabajo.

Desarrollo

Denavit-Hartenberg

Se utilizó la convención de Denavit-Hartenberg para determinar completamente los sistemas correspondientes a cada articulación y así facilitar el estudio del manipulador. Se tomaron las dimensiones de los eslabones de la hoja de datos aportada por el fabricante del robot.

Como especifica la convención, primero se determinaron los eslabones y ejes del robot (Figura 7) y finalmente se designaron los sistemas correspondientes a cada articulación y al efector final (Figuras 8 y 9).

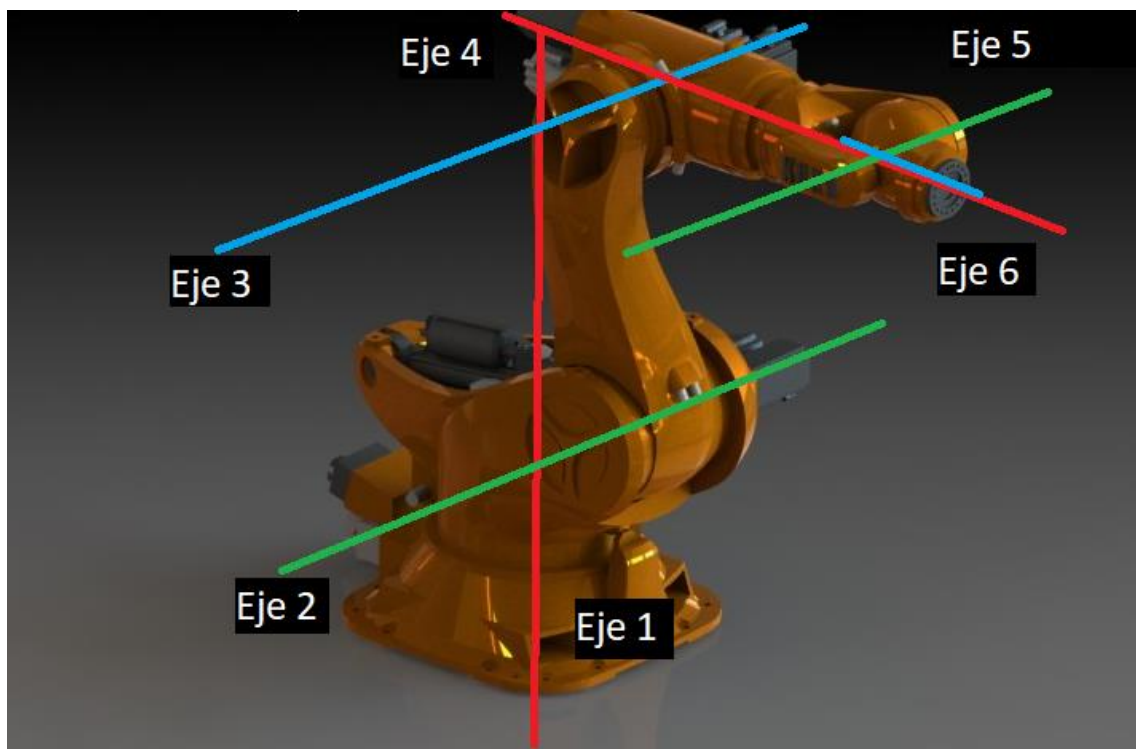


Figura 7 – Designación de ejes DH

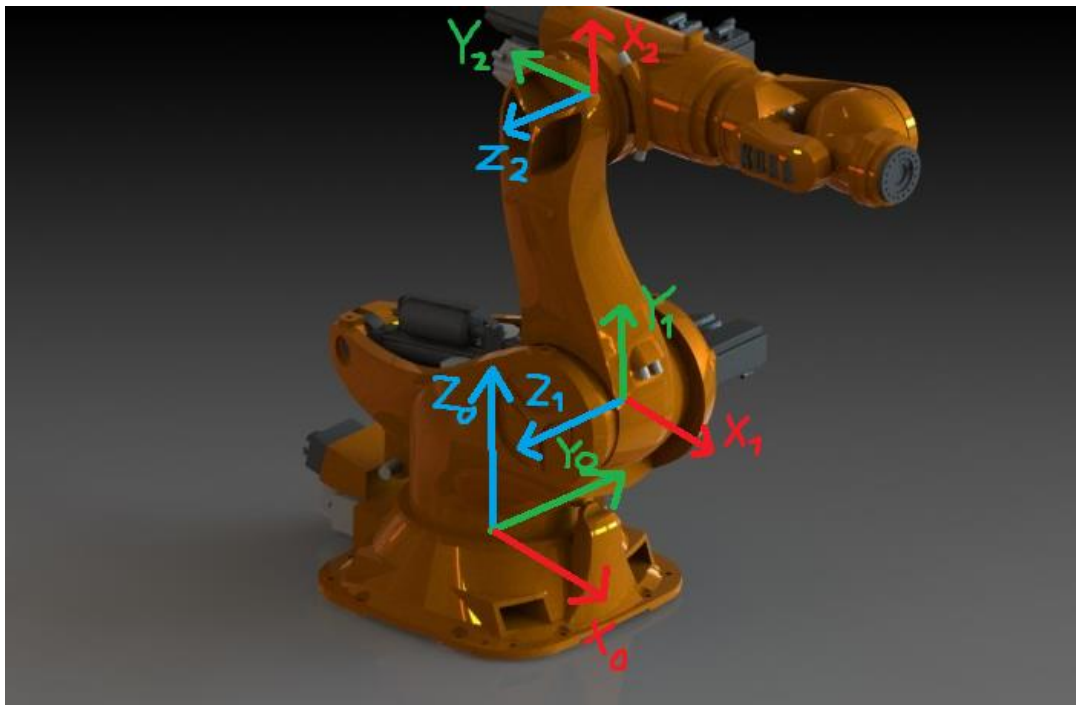


Figura 8 – Designación de sistemas 0-2 DH

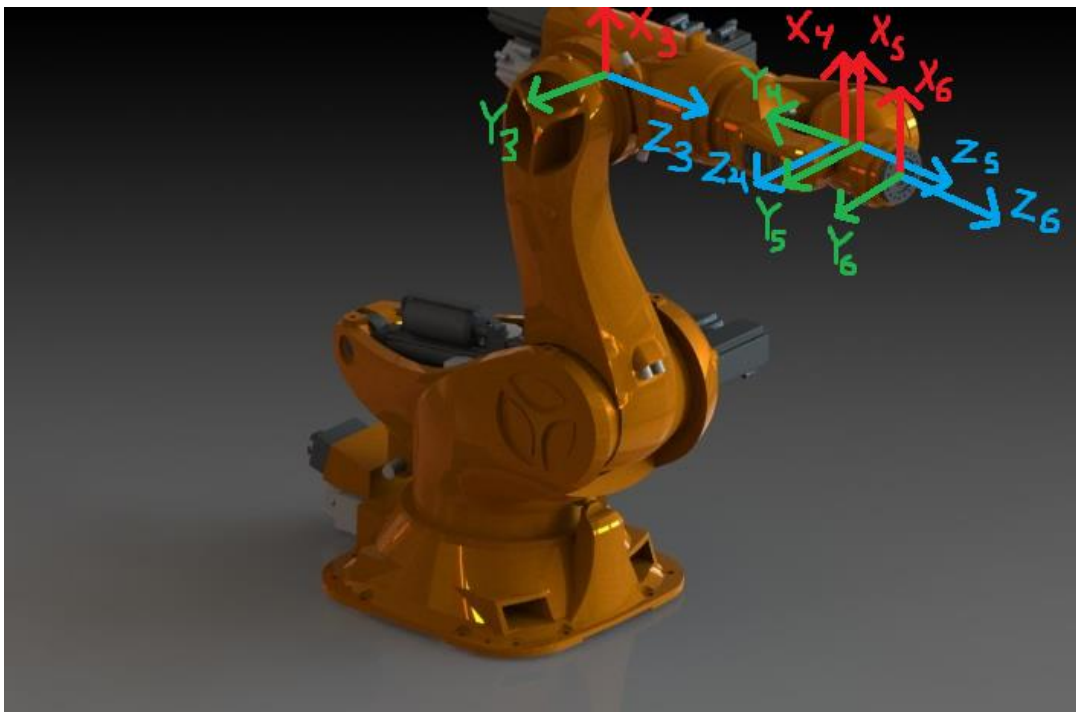


Figura 9 – Designación de sistemas 3-6 DH



Una vez identificados los sistemas, se procede a determinar los parámetros del manipulador según los mismos y se obtiene la siguiente matriz de parámetros DH:

Sistema	θ	d	a	α	σ
1	q_1	1.1	0.6	$\pi/2$	0
2	q_2	0	1.4	0	0
3	q_3	0	0	$\pi/2$	0
4	q_4	1.2	0	$-\pi/2$	0
5	q_5	0	0	$\pi/2$	0
6	q_6	0.372	0	0	0

Tabla 2 – Matriz de parámetros DH

Aclaración: Estos parámetros DH se determinaron a los efectos de aprender los conceptos sobre la convención. En los cálculos y simulaciones siguientes se utilizaron los parámetros DH correspondientes al modelo STL del robot desarrollados por Arturo Gil.

Cinemática Directa

La función de cinemática directa tiene como objetivo el cálculo de la matriz de transformación homogénea del extremo del robot, a partir de un vector articular conocido.

Se utilizó la función provista por el toolbox de Peter Corke `fkine()` para el cálculo matemático y finalmente, se utilizó también la cinemática directa para realizar un esbozo del espacio de trabajo y los alcances máximos del manipulador, cuyo resultado se observa en las figuras 5 y 6.

Cinemática Inversa

La cinemática inversa, como el nombre lo indica, realiza el proceso opuesto a la cinemática directa. Su objetivo es calcular las posiciones articulares que logran una matriz de transformación homogénea específica en el extremo del robot.

Se resolvió mediante el método de Pieper, desacoplando el robot de 6 grados de libertad en 2 etapas de 3 grados de libertad cada una. Esto simplifica la resolución del problema al obtener posiciones objetivo intermedias que representan un “checkpoint” en el cálculo.

La ecuación siguiente permite obtener la posición objetivo de las primeras 3 articulaciones del robot.

$$p_{04} = p_{06} - a_{06} * d_4$$

p_{06} : Posición del extremo respecto al sistema 0

a_{06} : Dirección del eje Z del extremo respecto al sistema 0

d_4 : Longitud del eslabón 4

Se obtuvieron los primeros 2 valores articulares para lograr esta posición mediante el método geométrico, y el tercero mediante la resolución de un SEL 2x2. Esto es debido a que el eslabón 3 del robot posee 2 segmentos con ejes a 90° como se observa en la figura 10.

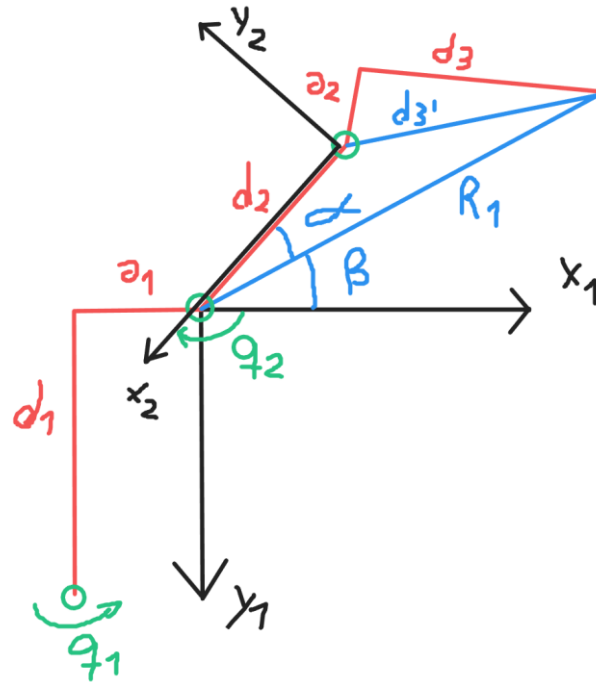


Figura 10 – Eslabones 2, 3 y 4 referidos al sistema 1

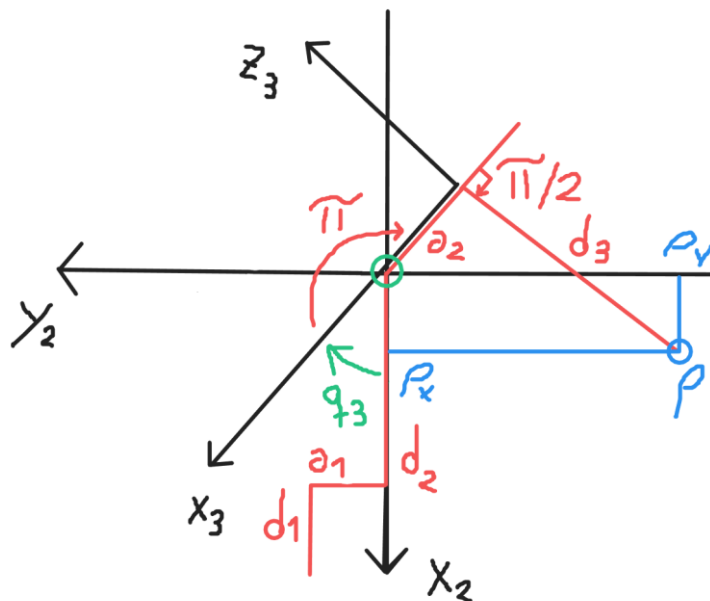


Figura 11 – Eslabón 3 del robot referido al sistema 2

$$\begin{cases} a_2 * \cos(\pi + q_3) + d_3 * \cos\left(\frac{3}{2}\pi + q_3\right) = p_x \\ a_2 * \sin(\pi + q_3) + d_3 * \sin\left(\frac{3}{2}\pi + q_3\right) = p_y \end{cases}$$

Del cual operando se obtiene:

$$\begin{cases} -a_2 * \cos(q_3) + d_3 * \sin(q_3) = p_x \\ -d_3 * \cos(q_3) - a_2 * \sin(q_3) = p_y \end{cases}$$

Resolviendo para $\cos(q_3)$ y $\sin(q_3)$, y dividiendo:

$$\cos(q_3) = \frac{-d_3 * p_y - a_2 * p_x}{d_3^2 + a_2^2}$$

$$\sin(q_3) = \frac{-a_2 * p_y + d_3 * p_x}{d_3^2 + a_2^2}$$

$$q_3 = \text{atan2}(\sin(q_3), \cos(q_3))$$

El primer problema posee 4 soluciones, con q_1 en una dirección y en la misma con sentido opuesto, y para cada q_1 existen 2 soluciones para q_2 y q_3 . Estas son codo arriba y codo abajo.

El segundo problema de Pieper se determinó mediante el método matricial, referenciando los sistemas a resolver según el sistema anterior. Este problema posee 2 soluciones, y se debe realizar con cada una de las 4 matrices de transformación homogénea obtenidas en el primer problema.

Así, el problema completo contempla 8 soluciones, que se deben analizar y depurar para verificar si realmente son soluciones válidas y, en caso afirmativo, seleccionar la mejor.

Para esto, se clasifican las soluciones según las siguientes características:

- Dentro o fuera del espacio de trabajo
- Exactas o cercanas
- Dentro o fuera del rango articular

Mediante lógica de decisión, se ordenan dichas soluciones según una prioridad establecida, y se selecciona la más apropiada.

- 1- Se separan las soluciones reales y exactas de las que no, para darles prioridad
- 2- Si existe mas de una solución real y exacta, se elige la de menor distancia articular a q_0
- 3- Si hay solo una, selecciono esa
- 4- Si no hay ninguna solución real y exacta, se selecciona la de menor distancia espacial al punto objetivo.

Finalmente, el programa devuelve un booleano y el vector solución.

```
% Logica de seleccion de solucion
j = 1;
null_flag = 0;
% Separo las soluciones exactas que se encuentran dentro de limites
for i=1:8
    if is_real(i) && limit_check(i)
        indexes(j) = i; %#ok<AGROW> % Indices de las soluciones exactas y en limites
        j = j + 1;
        null_flag = 1;
    end
end

% n es la cantidad de soluciones exactas y en limites articulares
if null_flag == 1
    [~, n] = size(indexes);
else
    n = 0;
end

d = 1e5;
% Si hay una o mas de una, selecciono la de menor distancia articular a q0
if n >= 1
    for i=1:length(indexes)
        if d_art(indexes(i)) < d
            d = d_art(indexes(i));
            idx = indexes(i);
        end
    end
    q_sol = q(idx,:);
    exito = 1;
% Si no hay ninguna, selecciono la de menor distancia cartesiana al objetivo
elseif n == 0
    for i=1:8
        if d_xyz(i) < d
            d = d_xyz(i);
            idx = i;
        end
    end
    q_sol = q(idx,:);
    exito = 0;
end

% Devuelve la matriz completa si mejor == 0
if mejor == 0
    q_sol = q;
end
```

Figura 12 – Función de lógica de decisión

Como último ajuste, debido al extenso rango articular de q4 y q6, se contemplan las múltiples soluciones que presenta cada una de estas, y se eligen las que resulten más cercanas al vector articular en el que se encuentra el robot.



Jacobiano

El jacobiano es una matriz que relaciona velocidades articulares con velocidades cartesianas. Se utilizó para determinar puntos singulares (donde el manipulador tiene dificultad para realizar movimientos en determinadas direcciones) y elipsoides de manipulabilidad (cuyos ejes representan la facilidad relativa del manipulador para realizar movimientos en dicha dirección).

Los puntos singulares son aquellos para los que el determinante del jacobiano es igual a cero. Si bien se puede calcular la matriz jacobiana simbólica para un manipulador de 6 grados de libertad, este análisis no es extensible al determinante de la misma debido al alto costo computacional que conlleva.

Se pueden utilizar 2 enfoques para encontrar puntos singulares:

- Buscar situaciones o relaciones entre articulaciones, en las que algunas de las mismas queden alineadas. El caso más fácil es el de $q_5=0$, que causa que q_4 y q_6 generen el mismo movimiento.
- Generar configuraciones articulares aleatorias, calcular sus respectivos determinantes y analizar las que resulten en menores valores de estos.

Analíticamente:

- $Q_5=0$ genera el mismo movimiento para q_4 y q_6
- No existen otras configuraciones similares que causen puntos singulares debido al diseño del robot (eslabones acodados)

Numéricamente:

- Se obtuvieron 10000 configuraciones articulares aleatorias y se calculó el determinante de cada una. Finalmente se tomaron las configuraciones cuyos determinantes son menores a 0.01

Gráficamente:

- Se puede observar q4 alineado con q6 ($\det = 4e-3$)

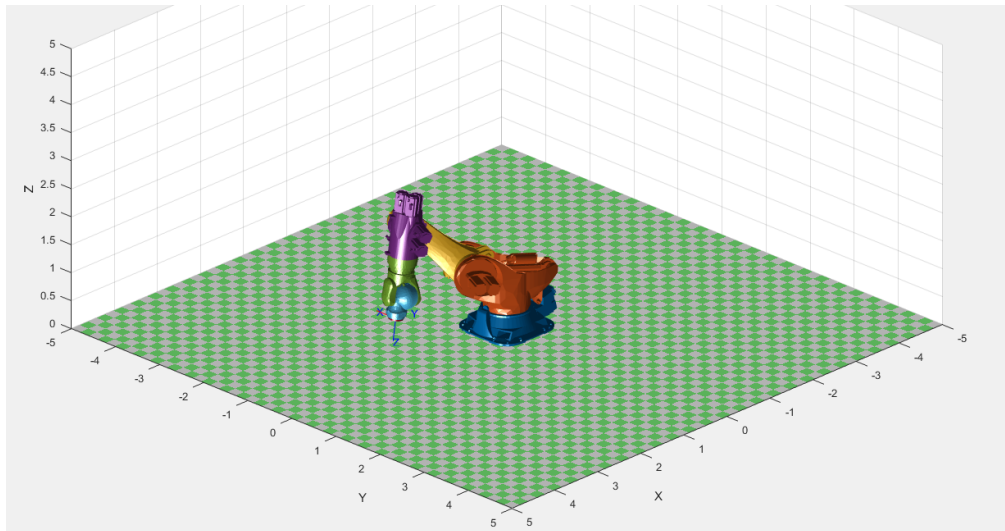


Figura 13 – Punto singular

- Cerca del límite del espacio de trabajo con q4 y q6 alineados ($\det = 6e-3$)

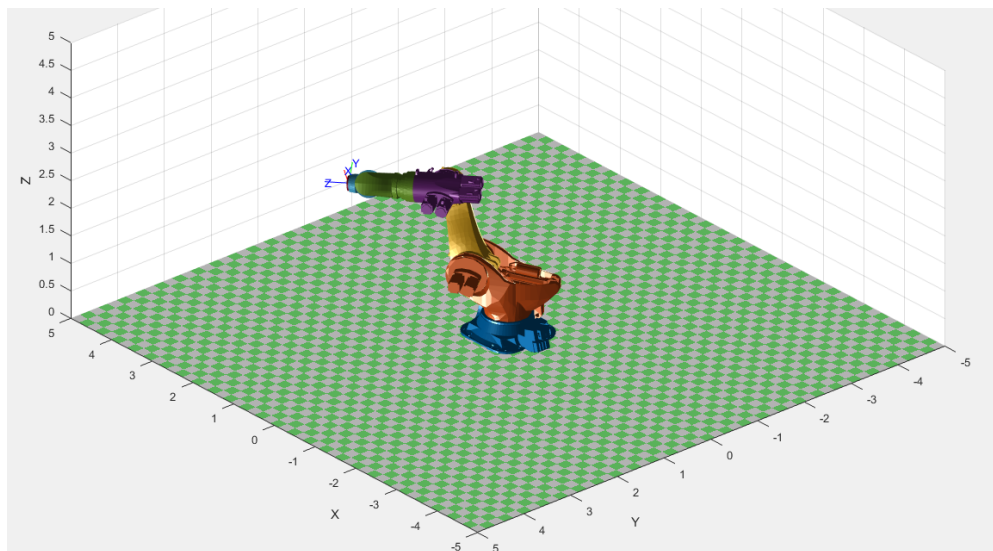


Figura 14 – Punto singular

Según los puntos de inicio y de fin de la trayectoria se realizó el análisis de elipses de manipulabilidad en cada uno de ellos:

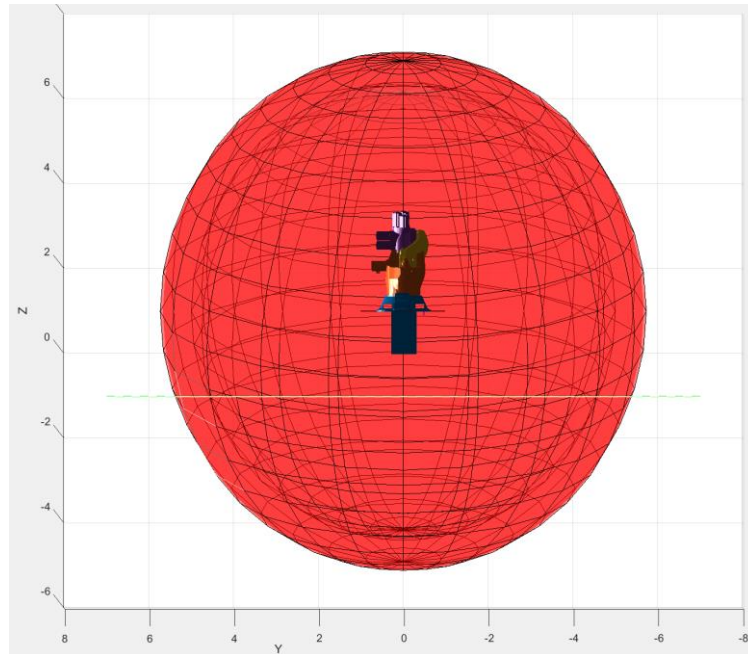


Figura 15 – Elipse de manipulabilidad en el punto de inicio de pick and place, vista desde el plano YZ

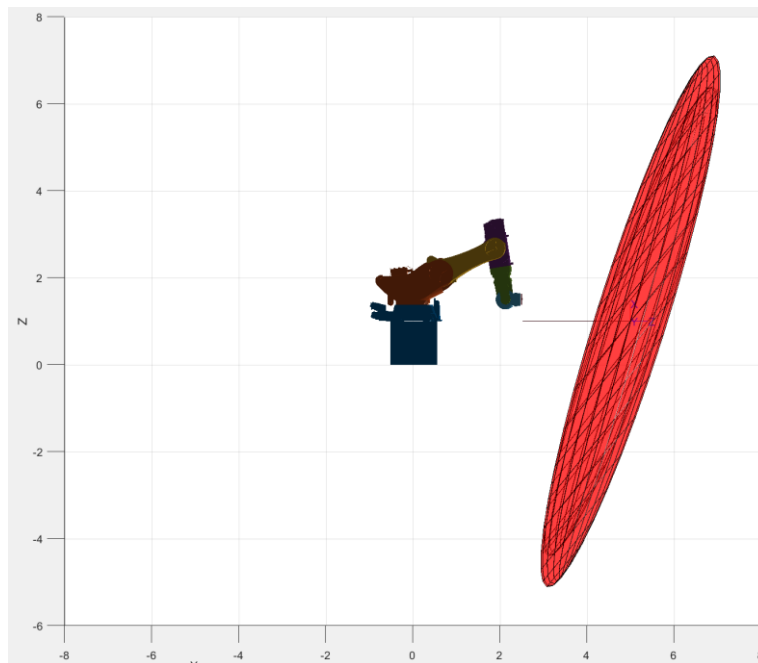


Figura 16 – Elipse de manipulabilidad en el punto de inicio de pick and place, vista desde el plano XZ

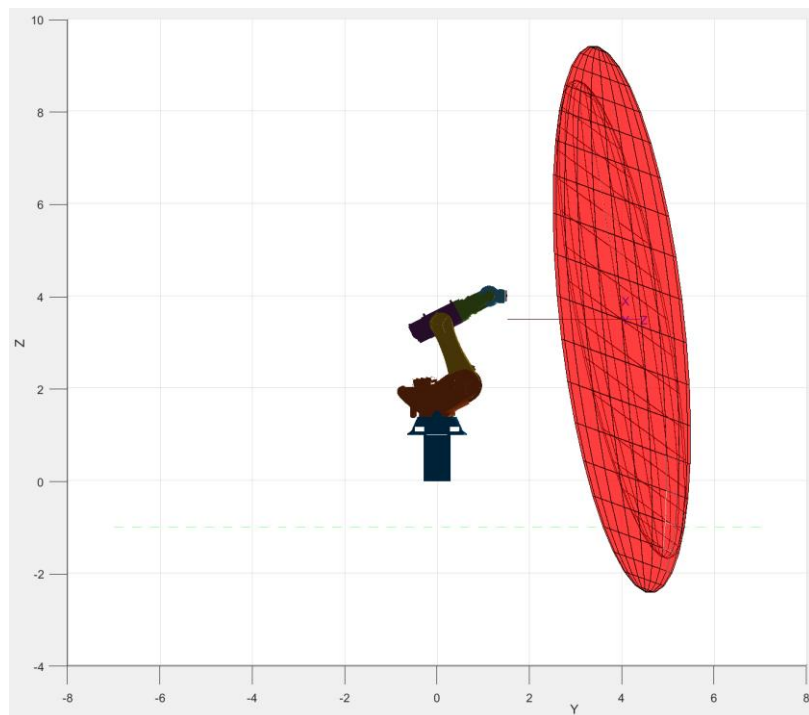


Figura 17 – Elipse de manipulabilidad en el punto final de la trayectoria, vista desde el plano YZ

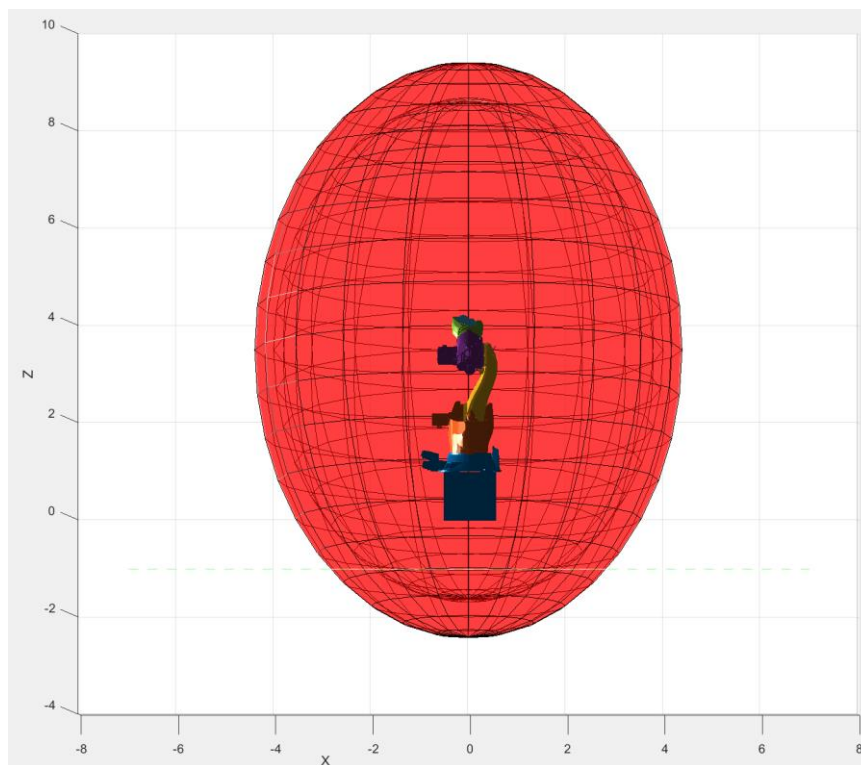


Figura 18 – Elipse de manipulabilidad en el punto final de la trayectoria, vista desde el plano XZ



Se puede observar que dichas posiciones son consistentes desde el punto de vista del análisis de manipulabilidad, porque los ejes de los elipsoides son finitos y distintos de 0. Como son posiciones cercanas al límite del espacio de trabajo del robot, se observan mayores velocidades alcanzables en los ejes Y1 y Z1, que en el eje X1 (Sistema 1 de convención DH).

Planificación y Generación de Trayectorias

El robot debe trasladar el chasis de un auto, provisto por otro robot, desde una posición a 1m del suelo hasta una celda especial con rieles para continuar la línea de producción. Esta celda se encuentra a 3m de altura y a un giro de 90 grados respecto de la primera posición.

A la hora de generar la trayectoria se deben tener en cuenta ciertos aspectos específicos de la aplicación, que deben ser respetados para no generar accidentes ni dañar el producto:

- Las dimensiones del producto: Por el gran tamaño de los chasis que se deben trasladar, se debe liberar la zona de trabajo del robot o diseñar la trayectoria de modo tal que no existan colisiones con otros elementos del área de trabajo.
- La orientación del extremo: Debido a que el manipulador final es una simple pala que sujeta los chasis por la zona inferior, inclinaciones respecto al plano x-y podrían causar un desliz del objeto. Por lo tanto, es imperativo que el eje perpendicular al plano de la herramienta final coincida con el eje z del espacio de trabajo.

Se presentan a continuación 2 trayectorias:

- Una resuelta con interpolación multipunto (mstraj) con 2 puntos intermedios
- Otra resuelta con interpolación articular entre el punto inicial y el segundo punto intermedio, y con interpolación cartesiana para el tramo final

Interpolación Multipunto

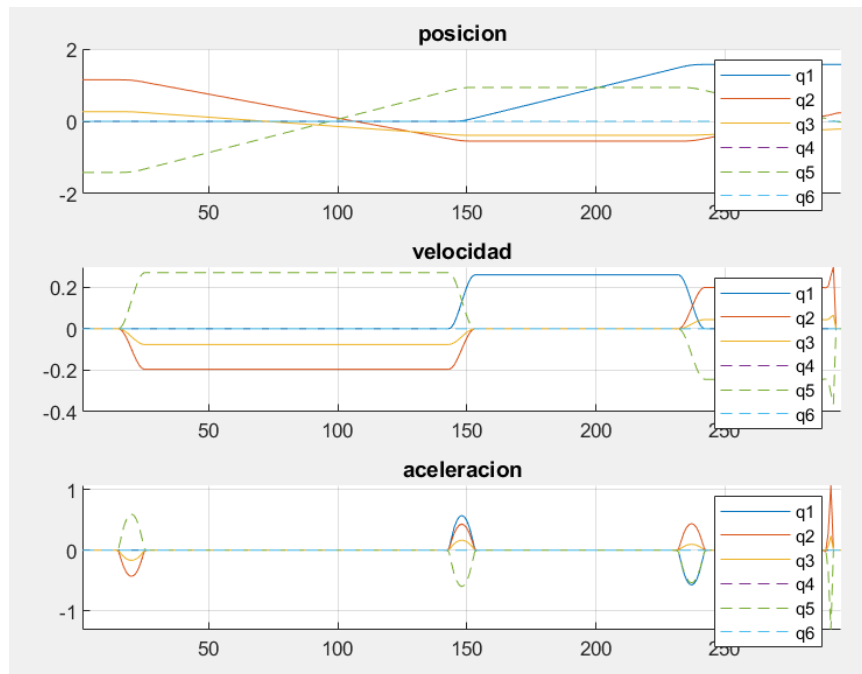


Figura 19 – Posición, velocidad y aceleración rotacional de cada articulación con mstraj

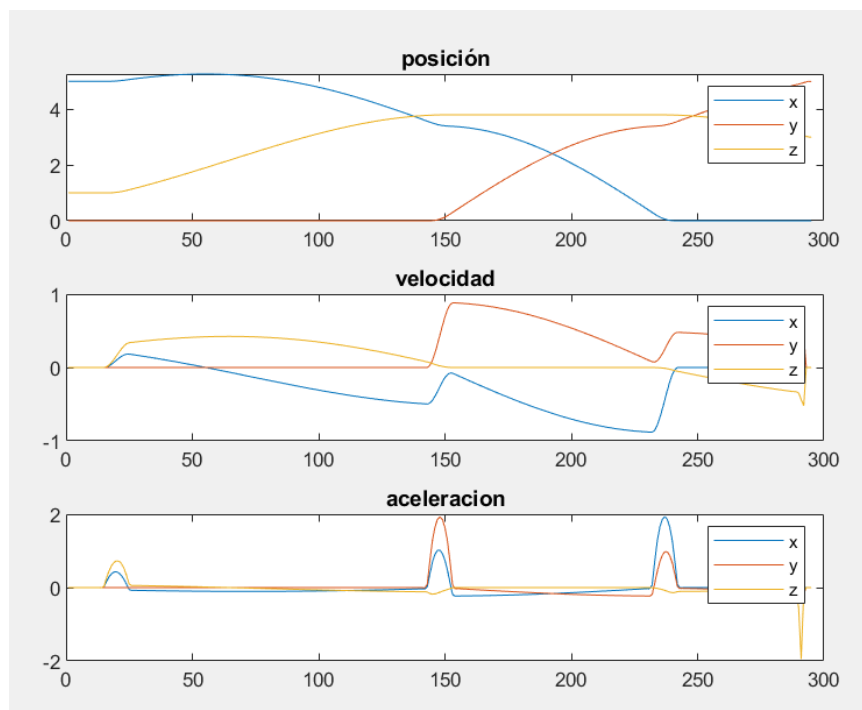


Figura 20 – Posición, velocidad y aceleración en coordenadas cartesianas con mstraj

Interpolación Articular y Cartesiana

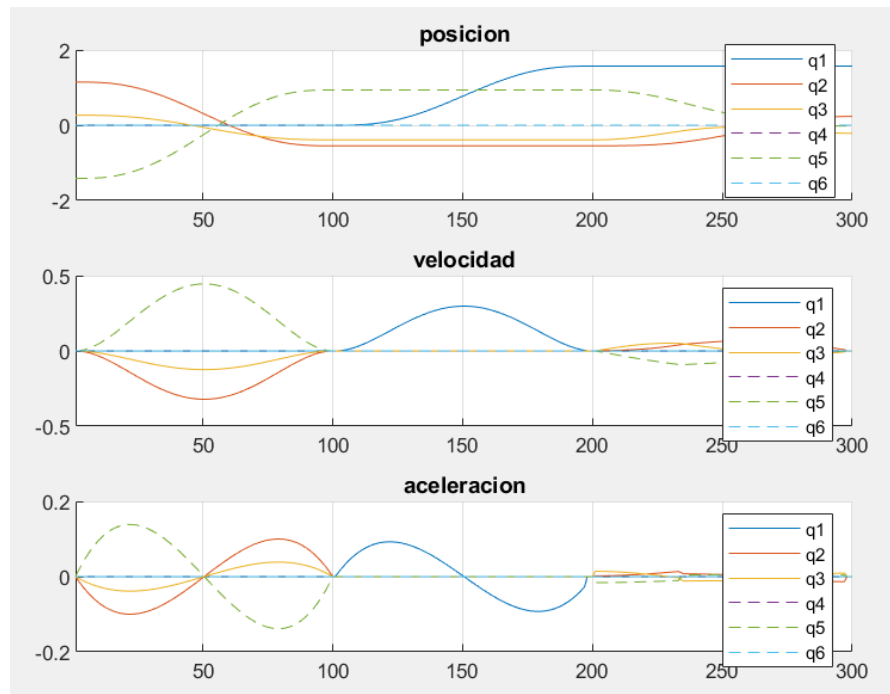


Figura 21 – Posición, velocidad y aceleración rotacional de cada articulación con ctraj y jtraj

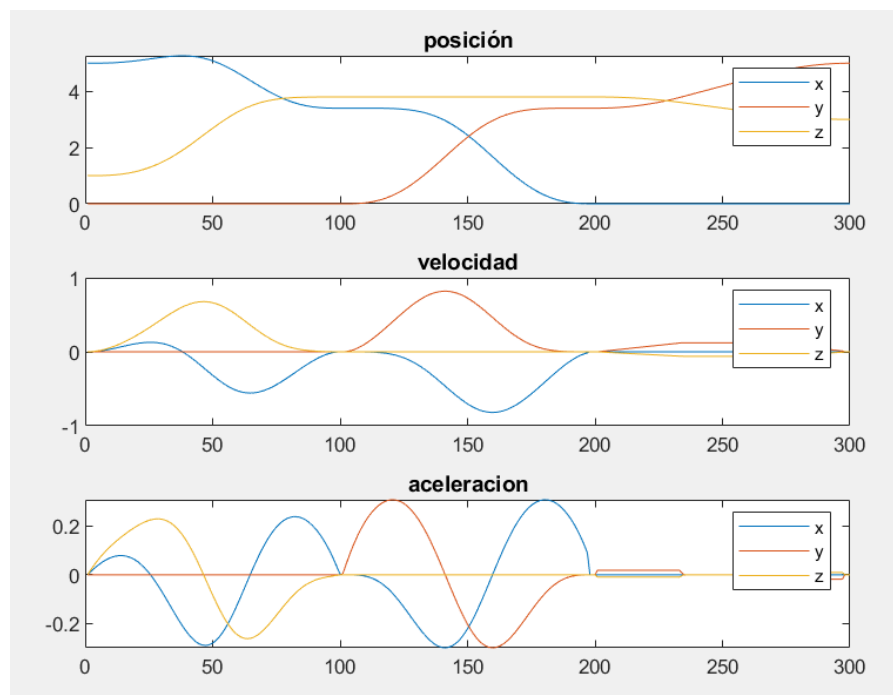


Figura 22 – Posición, velocidad y aceleración en coordenadas cartesianas con ctraj y jtraj

Se puede observar la diferencia en la suavidad de las curvas entre la primera mitad del recorrido (interpolación articular) y la segunda (interpolación cartesiana). Cualquiera de las 2 opciones es adecuada para la aplicación, que es un pick and place cuyos requisitos de orientación se obedecen en ambas.

La ventaja de la interpolación articular es que se resuelve fácilmente y no requiere un estudio previo sobre el área de trabajo.

La interpolación cartesiana permite trayectorias rectas, pero es más difícil de trabajar. Para este caso se debe interpolar con un punto intermedio porque la trayectoria recta entre los puntos inicial y final incluye zonas fuera del espacio de trabajo del robot para la orientación necesaria. Además, resulta en mayores aceleraciones y velocidades en muchos casos.

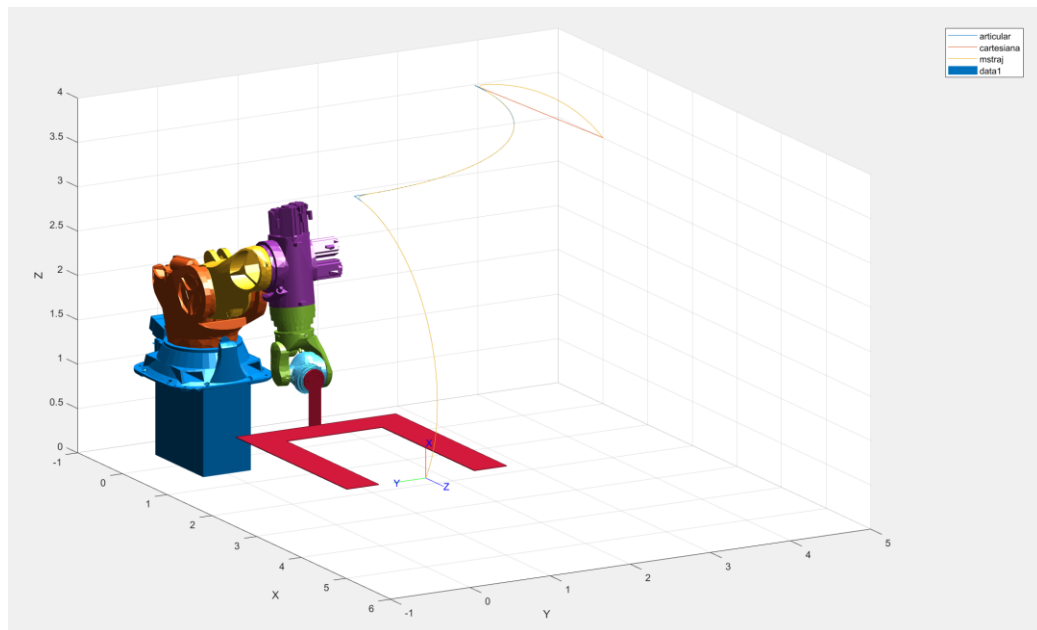


Figura 23 – Trayectorias en el espacio cartesiano

Selección de Sensores y Actuadores

Actuadores

Las características principales necesarias para esta aplicación son: Bajo peso, alta precisión y alto torque. Se van a utilizar actuadores eléctricos, que son más adecuados en una tarea que requiere precisión. Con estos se facilita el control y la repetitividad de la tarea.

Específicamente se utilizarán servomotores síncronos CFM/AV1H (fabricante SEW) de alto torque debido al gran peso y dimensiones de los objetos que se desea trasladar. En caso de necesitar un mayor torque, se podrían utilizar 2 servomotores para un mismo eje, y/o combinarlos con servorreductores (cónicos, de ejes perpendiculares, planetarios, etc.).



Figura 24 – Servomotores síncronos de catálogo SEW

Además, se pueden colocar dichos motores en eslabones anteriores al eje correspondiente y utilizar un sistema de transmisión de energía (por ejemplo, correas dentadas), para conseguir menores momentos resistentes en las articulaciones finales.

Por último, se deberá seleccionar un dispositivo de control para los mismos, como puede ser un servocontrolador multieje SIEMENS SINAMICS S210 o similar.

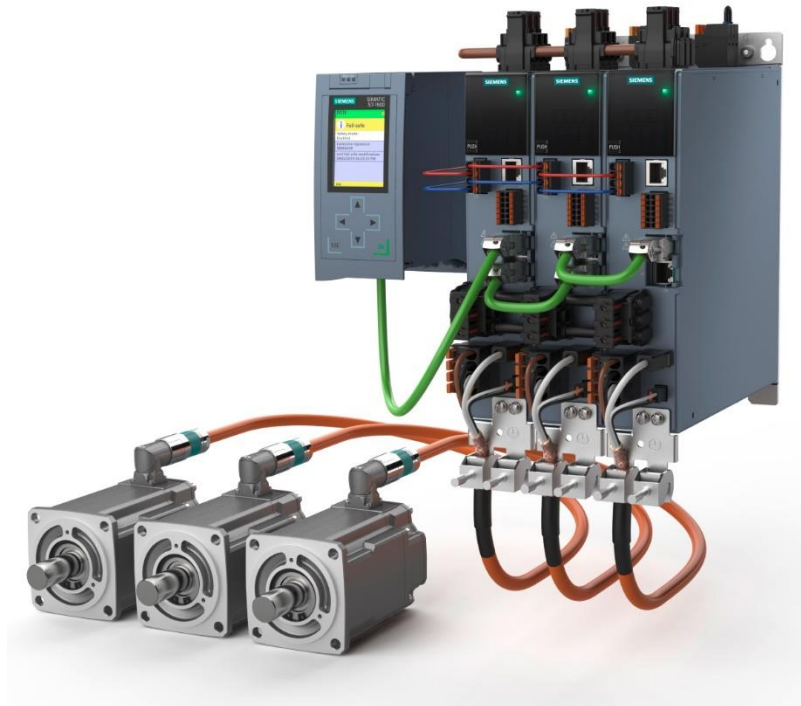


Figura 25 – Servocontrolador multieje SINAMICS S210

Sensores

Se necesitarán sensores internos para medir ciertas variables, como la posición, aceleración y velocidad de los diferentes eslabones del robot. Los servomotores seleccionados poseen un encoder de tecnología HIPERFACE desarrollados por SICK, cuyas características principales según el fabricante son las siguientes:

- Velocidad máxima: 6.000 rpm
- Montaje sencillo sin necesidad de herramientas de montaje especiales
- Gran resistencia a choques y oscilaciones

Como sensores externos se podrían utilizar sensores de colisiones y sensores de fuerza y torque multieje del fabricante ATI.

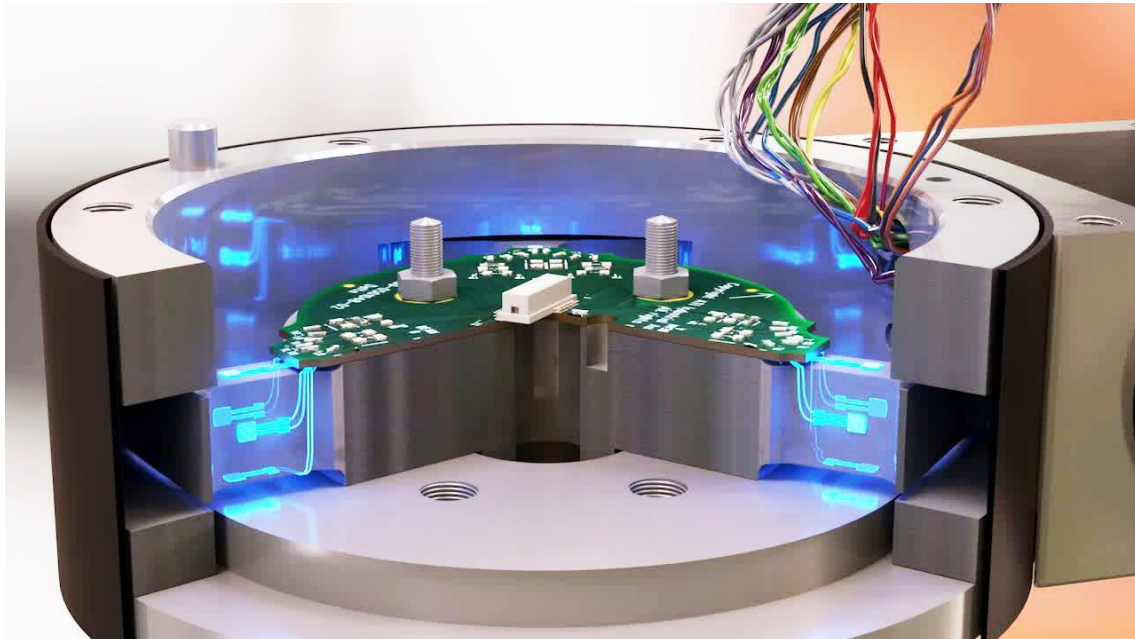


Figura 26 – Sensor Fuerza/Torque ATI

Fuente

Como fuente se utilizaría la red eléctrica trifásica (380V) tanto para el motor como para los drivers. También se realizaría una derivación de la misma con rectificadores y reductores para obtener los 24V DC de alimentación de los sensores externos.



Conclusión

En el desarrollo de este proyecto se logró una integración de los conceptos teóricos y los aspectos prácticos relacionados a la robótica y al estudio cinemático de un robot serie. Se analizaron los fundamentos matemáticos necesarios para modelar el manipulador y finalmente se simuló el comportamiento del mismo en MATLAB.

Se tuvieron en cuenta diferentes métodos de resolución para cada etapa del estudio del robot y se seleccionaron según fue conveniente, lo cual es muy importante para obtener mayor versatilidad a la hora de afrontar nuevos problemas.

También se rediseñaron los modelos de base y efector final en CAD.

Por último, se realizó un estudio sobre posibles elementos comerciales a utilizar en una futura implementación real del proyecto, como tipo de motores, drivers, sensores, etc.

En el futuro se podrían implementar los obstáculos en la simulación para observar que no haya colisiones.



Referencias

KUKA KR 1000 TITAN

<https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial/kr-1000-titan>

Servomotores síncronos SEW

<https://www.sew-eurodrive.com.ar/products/motors/servomotors-synchronous-servomotors.html>

SIEMENS SINAMICS S210 Drive

<https://new.siemens.com/global/en/products/drives/sinamics/low-voltage-converters/servo-converter/sinamics-s210.html>

Encoder SICK

<https://www.sick.com/cl/es/>

Sensor de fuerza torque multieje ATI

<https://www.ati-ia.com/products/ft/sensors.aspx>

Sensor de colisiones ATI

https://www.ati-ia.com/products/collision_sensor/robot_collision_sensor.aspx

Robotics Toolbox para MATLAB de Peter Corke

<https://petercorke.com/toolboxes/robotics-toolbox/>

Modelo STL

<https://github.com/4rtur1t0/ARTE>



Anexo

Hoja de datos KUKA KR 1000 1300 TITAN PA

KR 1000 1300 titan PA



Datos técnicos

Alcance máximo	3202 mm
Carga máxima	1300 kg
Carga nominal	1300 kg
Carga adicional nominal columna giratoria/brazo de oscilación/brazo	0 kg / 0 kg / 50 kg
Repetibilidad de posición (ISO 9283)	± 0,1 mm
Número ejes	4
Posición de montaje	Suelo
Superficie de colocación	-
Peso	aprox. 4690 kg

Datos de los ejes

Rango de desplazamiento	
A1	±150 °
A2	-130 ° / 17,5 °
A3	62 ° / 145 °
A4	-
A5	±118 °
A6	±350 °
Velocidad con carga nominal	
A1	58 °/s
A2	50 °/s
A3	50 °/s
A4	-
A5	60 °/s
A6	72 °/s

Condiciones de servicio

Temperatura ambiente durante el ser-	-5 °C hasta 55 °C (278 K hasta 328 K)
vicio	

Tipo de protección

Tipo de protección (IEC 60529)	IP65
Tipo de protección muñeca de robot (IEC 60529)	IP65

Unidad de control

Unidad de control	KR C4
-------------------	-------

Dispositivo de mando manual

Dispositivo de mando manual	KUKA smartPAD
-----------------------------	---------------

Gráfica del campo de trabajo

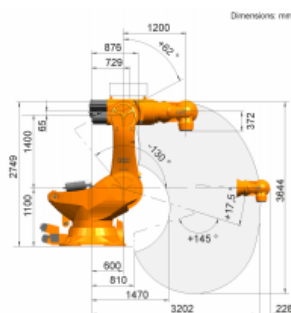
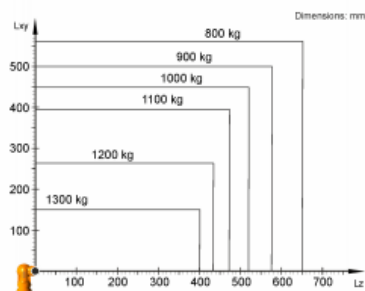


Diagrama de cargas



El KR 1000 1300 titan PA está diseñado para una carga nominal de 1300 kg para aprovechar de forma óptima el rendimiento y la dinámica del robot. Con intervalos de carga reducidos también se pueden aplicar cargas superiores hasta la capacidad de carga máxima. La situación de carga concreta debe controlarse con KUKA.Load. Para un asesoramiento individual, póngase en contacto con KUKA Support.

Brida de acople

