

Robot cartesiano para el manejo de vinos en una cava

Ferran Martinez
Nicolás Piastrellini

Robótica II,
Universidad Nacional de Cuyo,
Mendoza, Argentina

Noviembre de 2024

1. Introducción

En el delicado entorno de una cava de vinos, donde las condiciones de temperatura, humedad y luz deben mantenerse controladas para preservar la calidad de los vinos. La alteración de alguna de estas condiciones pueden influir negativamente en el envejecimiento y la evolución de los vinos, afectando sus características organolépticas.

En el siguiente proyecto se desarrollará la implementación de un robot cartesiano diseñado para operar en una cava de vinos cuyo objetivo principal será optimizar el manejo de las botellas, reduciendo al mínimo la intervención humana y, por ende, las perturbaciones que podrían comprometer las condiciones internas de la cava mencionadas anteriormente.

El robot puede posicionarse con exactitud en cualquier punto dentro de su área de trabajo considerando a la cava como una matriz de puntos, donde cada punto es un espacio para la botella y la matriz la cava como tal, luego se asegura que las botellas sean manipuladas de forma óptima con un sistema de *pick and place* diseñado en función de los huecos de la cava, asegurando que las botellas sean tomadas y depositadas con precisión.

1.1. Objetivos

- Diseñar el sistema mecánico del robot cartesiano para que sea capaz de moverse con precisión dentro del espacio de trabajo.
- Asegurar una manipulación precisa y segura de las botellas mediante un sistema de *pick and place*.
- Minimizar la intervención humana en el proceso de manejo de las botellas, asegurando que el robot pueda ejecutar las tareas de almacenamiento, rotación, selección y colocación con la mínima alteración de las condiciones ambientales (temperatura, luz, y humedad).
- Garantizar un transporte suave y estable de las botellas durante los movimientos del robot, para evitar vibraciones o impactos que puedan alterar el contenido de las botellas y su calidad.
- Optimizar el tiempo y la eficiencia del manejo de las botellas, asegurando que el robot pueda realizar las tareas necesarias en el menor tiempo posible sin comprometer la calidad del vino.
- Desarrollar un sistema de monitoreo y control del robot que permita verificar en tiempo real el estado y posición del robot, asegurando una operación continua y eficiente.
- Diseñar el sistema efector del robot, garantizando que el mecanismo de *pick and place* asegure un agarre firme pero delicado de las botellas, evitando cualquier daño a las mismas.

2. Especificaciones del sistema

El sistema está compuesto por dos elementos principales: la cava de vinos y el robot cartesiano. A continuación, se detallan las especificaciones de cada elemento

2.1. Cava de vinos y dimensiones de trabajo

La cava está diseñada para mantener unas condiciones ambientales controladas, esenciales para la conservación y el envejecimiento del vino. Estas condiciones incluyen:

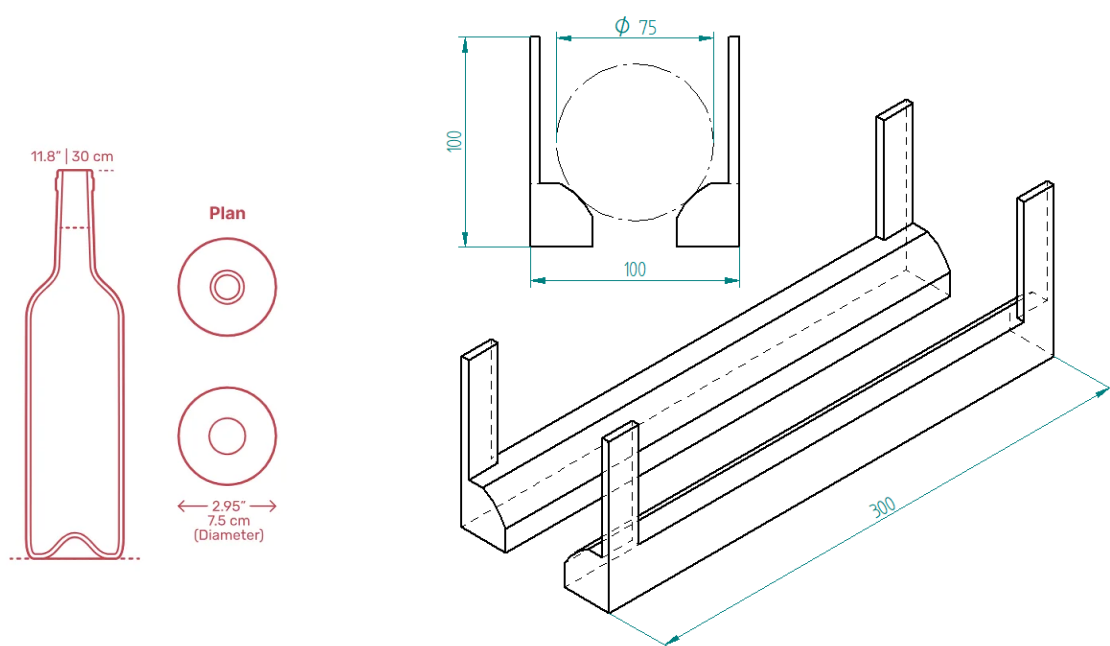
Temperatura: entre 12°C y 18°C, con una estabilidad constante para evitar alteraciones en el proceso de maduración del vino.

Humedad: mantenida entre el 60 % y el 75 %, para evitar el secado de los corchos y la entrada de oxígeno en las botellas.

Iluminación: la exposición a la luz es mínima para evitar la degradación de los compuestos químicos del vino. La luz utilizada es tenue y no emite calor.

Distribución del espacio: la cava se organiza en una matriz de celdas, donde cada celda corresponde a un espacio de almacenamiento para una botella. La cava está equipada para almacenar diferentes tipos y tamaños de botellas.

Dadas las dimensiones de una botella de vino estándar (Figura 1a), se diseña el hueco descrito en la figura 1b para la cava de vino.



(a) Medida de una botella de vino tamaño estándar.

(b) Medidas para el espacio que ocupará la botella en la cava de vino.

Figura 1

Conocidas las medidas para el espacio que ocupará una botella de vino en la cava, podemos dimensionar la cava de forma completa en función de las botellas que se deseen conservar. Se definirá para este proyecto que las dimensiones de una cava estándar cuenta con 4 metros de largo y 1,8 metros de alto (figura 2). Siendo en cantidad de botellas:

Largo de la cava = 4 m = 40 botellas
Alto de la cava = 1,8 m = 18 botellas
Cantidad total = 40 x 18 = 720 botellas

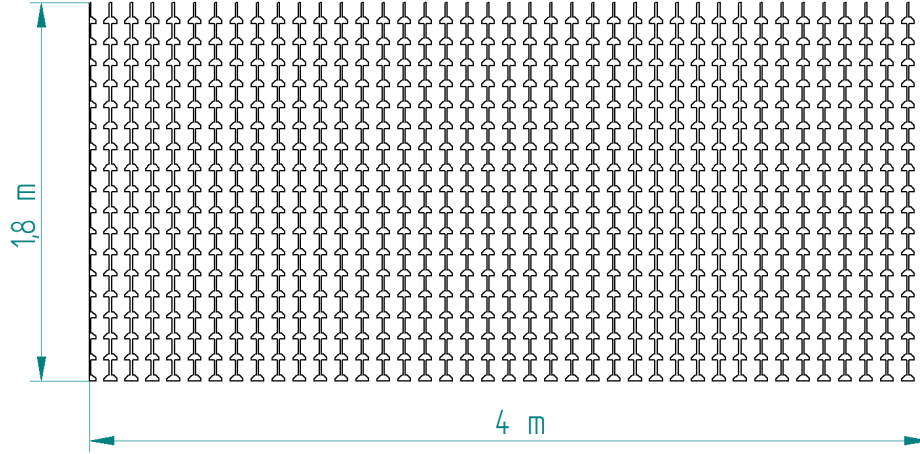


Figura 2: Dimensiones de una cava estándar

Para un mejor aprovechamiento del espacio de trabajo, se piensa en colocar otra cava mas en paralelo a la cava principal. Recordando los objetivos de este proyecto, la cava debe mantener las condiciones ideales para el estacionamiento de los vinos, por lo tanto, se decidió que las botellas que vayan a ingresar o egresar, desde fuera del ámbito de trabajo, lo hagan a través de ésta segunda cava. Para ello se secciona ésta segunda cava en 3 partes, una que llamaremos zona de picking, otra llamada zona de dropping y la última parte se llamará cava 2 (haciendo a la cava de la figura 2 la cava 1) y se puede ver en la figura .

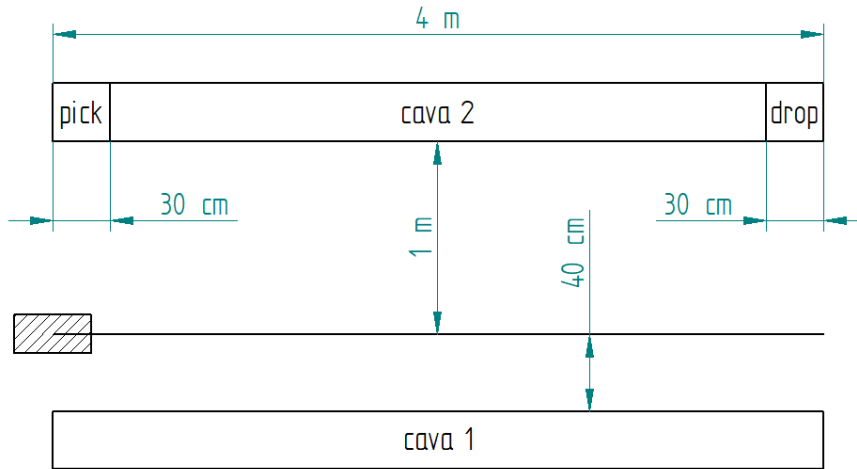


Figura 3: Espacio de trabajo del robot con las medidas de las cavas y sus respectivas zonas de picking y dropping

Se observa en la figura 3 que la distancia de la línea sobre la que trabaja el robot no esta situada simetricamente respecto de las dos cavas. Esto es así para permitir el paso de una persona entre las dos cavas y facilitar el mantemimiento, y en caso de ser necesario, arreglar cualquier tipo de falla.

2.2. Planteo del robot

El robot propuesto, como bien se indica en la sección 1, es un robot cartesiano montado en el suelo de forma adyacente a la cava, lo que le permite operar de forma precisa a lo largo del lateral para acceder a las botellas ubicadas en las diferentes celdas de la cava (véase la figura 4).

Con 4 grados de libertad, el robot es capaz de posicionarse y orientarse perpendicularmente sobre cualquier celda de la cava. Las características de su estructura articular se especifican en la tabla 1

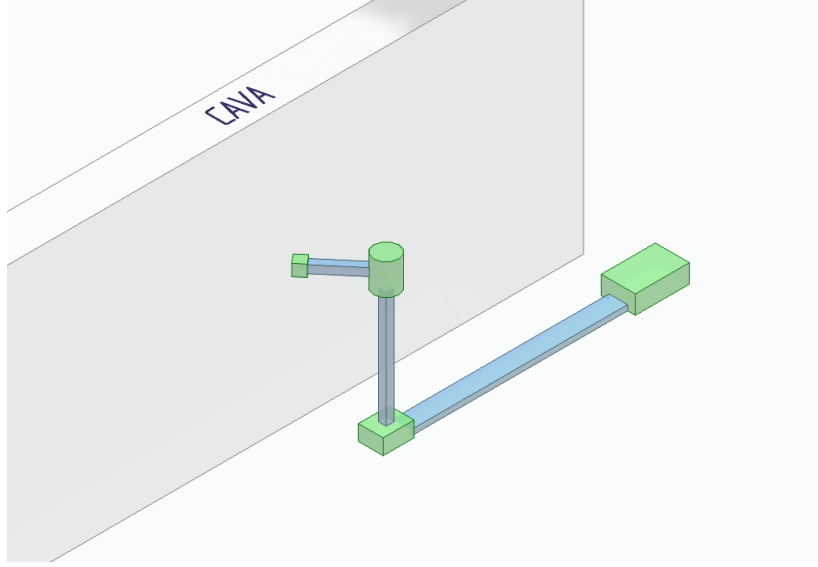


Figura 4: Modelo simplificado del robot cartesiano montado de forma adyacente a la cava de vino

Coordenada asociada	Tipo de articulacion	Funcion de la articulacion
q_1	Traslacional	Traslada el carro a lo largo de la cava
q_2	Traslacional	Traslada el carro a lo alto de la cava
q_3	Rotacional	Permite rotar el carro alrededor del eje z
q_4	Traslacional	Traslada el carro hacia las celdas de la cava

Tabla 1: Caracterización de las articulaciones del robot cartesiano

Los límites de las articulaciones q_1 y q_2 estarán limitadas por las dimensiones de la cava, sin embargo, las articulaciones q_3 y q_4 están limitadas de la siguiente forma:

180° en q_3 : debido al rango angular que existe para que el efector pueda posicionarse en cualquiera de los dos cavas paralelas.

1m en q_4 : la distancia que hay entre el eje de q_1 (a lo largo de la cava) y la cava mas lejana (véase la figura 3).

Si bien en la figura 4 se esquematizan las articulaciones del robot, para este proyecto se ha diseñado el cuerpo completo del robot, de esta forma se esperan resultados mas realistas cuando se realicen las simulaciones dinámicas. El material seleccionado para las piezas es aluminio, debido a su ligereza, alta resistencia y funcionalidad, características ideales para estructuras mecánicas de este tipo.

Gracias al software Solid Edge, podemos, además de diseñar cada una de las piezas, adaptar un material y conocer sus características físicas como el peso y los momentos de inercia. Estos valores nos servirán para generar el objeto `rigidBodyTree` en matlab.

Un elemento importantísimo para la aplicación del robot es el efector final o gripper. Éste debe diseñarse para que sea capaz de ingresar en la celda de la cava y sujetar o soltar la botella realizando un contacto lo suficientemente firme como para la botella no se suelte cuando el robot la traslade de una celda a otra. En la figura 6 se observa un diseño especial con las medidas específicas para la forma que tienen las celdas.

3. Cinemática

En esta sección no se ahondará en los principios cinemáticos del robot, sin embargo, se mostrará como se han caracterizado las diferentes articulaciones y eslabones desde matlab para poder trabajar con el objeto `rigidBodyTree` (cadena de cuerpos rígidos) y facilitar los cálculos cinemáticos y dinámicos.

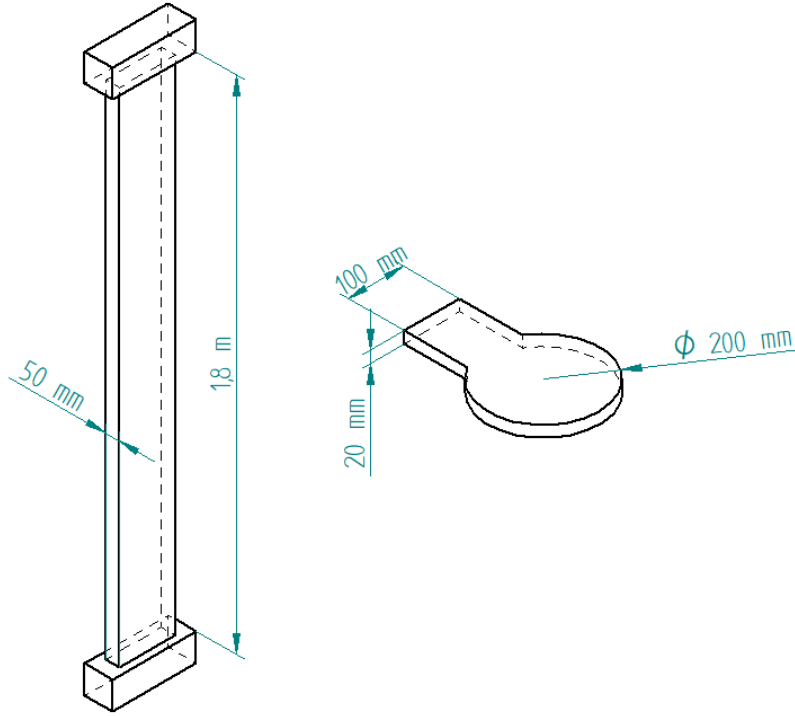


Figura 5: Cuerpos rígidos que representarán los eslabones referentes a q_1 y q_3 respectivamente.

Se puede observar en las líneas de código descritas anteriormente que tanto b_2 como b_4 carecen de masa. Esto es porque se supone todo el peso del movimiento de q_2 en b_3 , y el peso de b_4 en el efector.

Una vez contamos con el robot como una cadena de cuerpos rígidos, podemos revisar visualmente los sistemas de coordenadas de cada articulación y el montaje final con las piezas diseñadas (véase la figura 7).

3.1. Trayectorias importantes

Las posiciones articulares del robot estarán descritas por las coordenadas de una celda respecto del sistema de referencia de la base. Al tratar con un robot cartesiano, obtener los valores articulares para lograr una determinada posición del efector en el espacio es relativamente sencillo.

Por ejemplo, si queremos alcanzar la celda N° 350 de la cava 1 (la cava cuenta con 720 celdas como se menciona en la sección 2 y se enumeran empezando desde la parte mas baja y cercana a la base). Esta celda se encuentra en la fila 9 y la columna 30 de la cava 1, por lo que si tenemos en cuenta las medidas de la cava de la figura 1b esta celda se encuentra en el espacio segun:

Columna N° x Largo de la celda $\Rightarrow 30 \times 100 \text{ mm} = 3000 \text{ mm}$ (largo en la cava respecto de la base)

Fila N° x Alto de la celda $\Rightarrow 9 \times 100 \text{ mm} = 900 \text{ mm}$ (altura en la cava respecto de la base)

La longitud a lo largo de la cava respecto de la base está relacionada con la posición articular q_1 y la altura con q_2 . Luego la posición articular q_3 tomará los valores de 0 o π según la zona donde queda la botella (recordemos que son dos cavas enfrentadas y el robot se encuentra entre ellas) y el valor de q_4 dependerá también de cual de las dos cavas queremos acceder.

Con la función `trapVelTraj` es posible generar una trayectoria entre dos posiciones, calculando los valores articulares correspondientes como la posición y aceleración bajo un perfil de velocidad trapezoidal.

Entonces, se generarán dos trayectorias con perfil trapezoidal, donde una primer trayectoria se realiza de la zona de picking hacia la cava 1 y la segunda trayectoria desde la cava 1 hasta la zona de dropping.

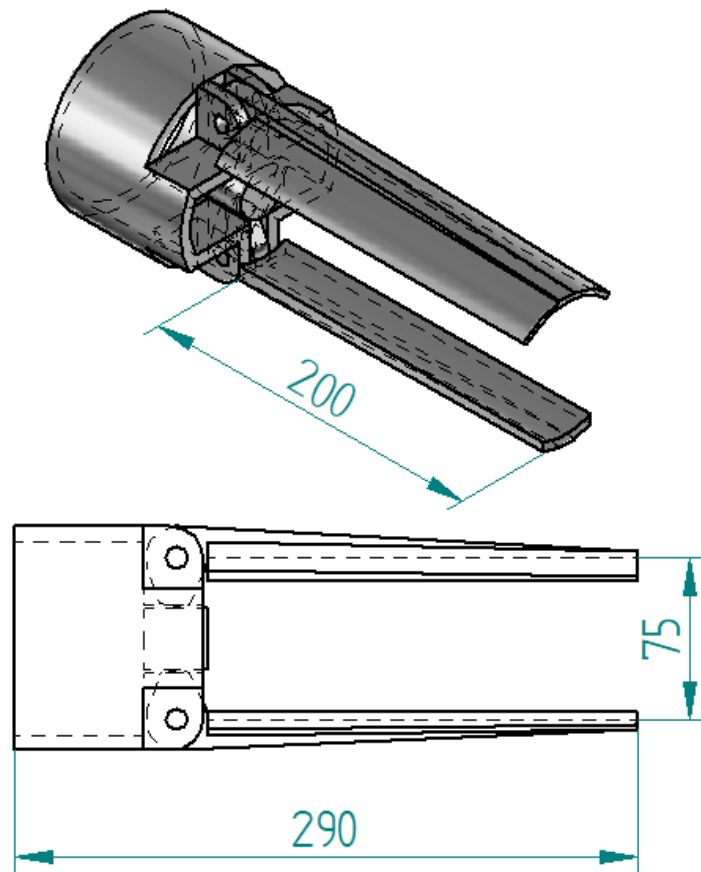


Figura 6: Dimensiones del gripper

```
% Primer cuerpo rigido + articulacion q1 prismatica
b1 = rigidBody('b1');
b1.Mass = 65; % Masa m1 [kg]
b1.CenterOfMass = [0 0.9 0]; % Centro de masa
b1.Joint = rigidBodyJoint('q1','prismatic'); % Traslacional
b1.Joint.setFixedTransform(dh(1,:), 'dh'); % DH
b1.Joint.JointAxis = [1 0 0]; % q1 lo largo de x
b1.Joint.PositionLimits = [0 cava1.largo]; % limite de largo de cava
b1.Joint.HomePosition = 0; % home en 0

% Segundo cuerpo rigido + articulacion q2 prismatica sobre b1
b2 = rigidBody('b2');

b2.Joint = rigidBodyJoint('q2','prismatic'); % Traslacional
b2.Joint.setFixedTransform(dh(2,:), 'dh'); % DH
b2.Joint.JointAxis = [0 1 0]; % q2 a lo largo de z
b2.Joint.PositionLimits = [0 alto]; % limite a altura de cava
b2.Joint.HomePosition = alto/2; % home al medio de la altura de la cava
```

```

% Tercer cuerpo rigido + articulacion q3 rotativa sobre b2
b3 = rigidBody('b3');
b3.Mass = 2.27; % Masa del disco
b3.CenterOfMass = [0.0368 0 0]; % Centro de masa
b3.Inertia = [0.005 0.017 0.022 0 0 0]; % Inercia del disco [kg m^2]
b3.CenterOfMass = [0 0 0]; % Centro de masa en el propio centro
b3.Joint = rigidBodyJoint('q3','revolute'); % Rotacional
b3.Joint.setFixedTransform(dh(3,:), 'dh'); % DH
b3.Joint.JointAxis = [0 0 1]; % q3 alrededor de z
b3.Joint.PositionLimits = [-pi pi]; % giro completo
b3.Joint.HomePosition = pi/2; % home en 90° (apunta a la base)

% Cuarto cuerpo rigido + articulacion q4 prismatica sobre b3
b4 = rigidBody('b4');

b4.Joint = rigidBodyJoint('q4','prismatic'); % Traslacional
b4.Joint.setFixedTransform(dh(4,:), 'dh'); % DH
b4.Joint.JointAxis = [1 0 0]; % q4 a lo largo de x
b4.Joint.PositionLimits = [0 c2_dist]; % limite distancia a la cava mas lejana
b4.Joint.HomePosition = 0; % home en 0

%% Efector
ef = rigidBody('ef');
ef.Mass = 4; % Masa del efector + botella
ef.Joint = rigidBodyJoint('ef','fixed'); % Fijo (coord del efector)
tf_hom = eul2tform([-pi/2 0 -pi/2], 'XYZ'); % Matriz de transformacion homog
ef.Joint.setFixedTransform(tf_hom); % Por transformacion homogenea

```

3.1.1. Primer trayectoria - Picking a cava 1

En esta trayectoria el robot recogerá una botella de la zona de pick y la llevará hasta la cava 1, pero recorriendo una gran distancia lateral. Los valores articulares en estas posiciones y sus trayectorias son:

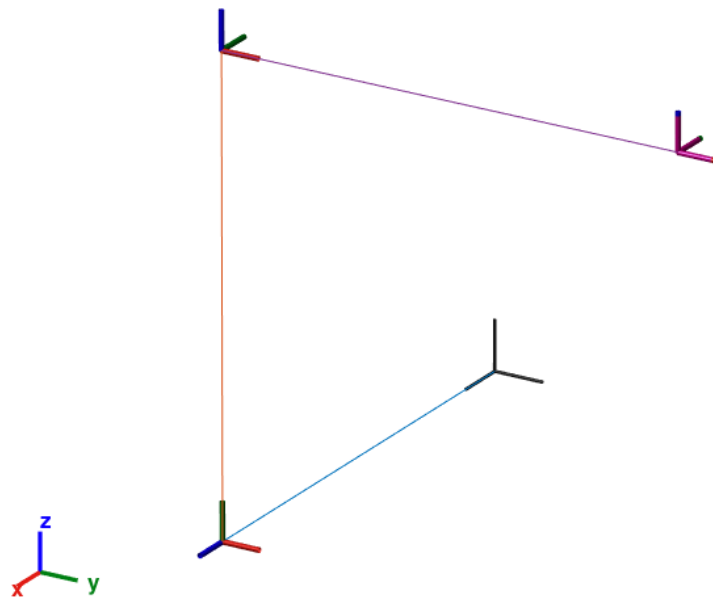
	q_1 [m]	q_2 [m]	q_3 [°]	q_4 [m]
Pick	0,05	0,05	0	0.7
Cava 1	3,95	0,85	180	0.1

En la tabla se puede observar que los valores articulares q_4 no representan la distancia que hay desde la base del robot hasta cualquiera de las cavas, y esto es así porque estas trayectorias se generan con la botella sujeta fuera de la celda, es decir, con el efector fuera, y según las dimensiones dadas en la figura 6 esto representa unos 30 cm.

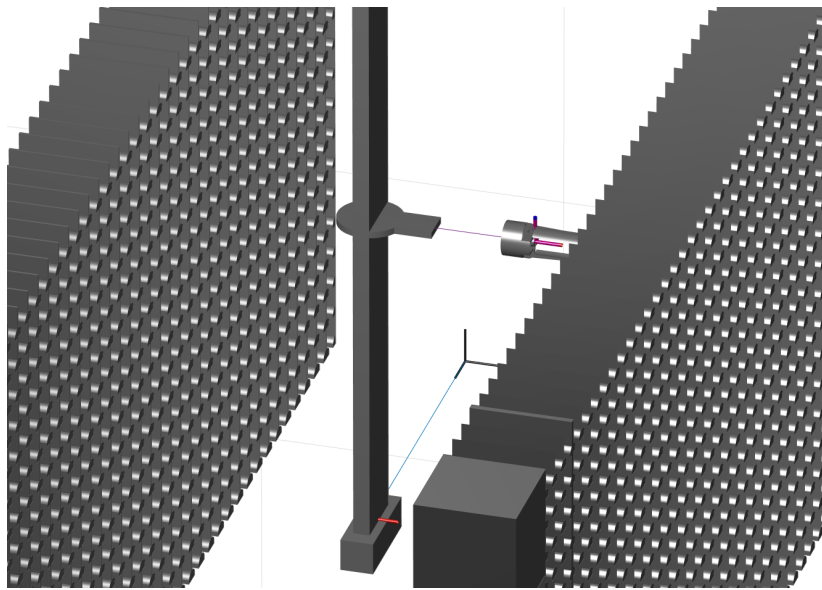
3.1.2. Segunda trayectoria - Cava 1 a drop

En esta trayectoria el robot recogerá una botella de la zona de la cava 1 y la llevará hasta la zona de drop, pero recorriendo una menor distancia lateral para evaluar y comparar las velocidades con la primera trayectoria. Los valores articulares en estas posiciones y sus trayectorias son:

	q_1 [m]	q_2 [m]	q_3 [°]	q_4 [m]
Cava 1	3,95	0,85	180	0.1
Drop	3,91	1,265	0	0.7



(a) Vista de las coordenadas articulares del robot.



(b) Robot con las piezas diseñadas en el espacio de trabajo (cavas de vino)

Figura 7

Cabe destacar que, a diferencia de la primer trayectoria prevista, las articulaciones traslacionales apenas sufren cambio alguno. Sin embargo, la articulación rotacional q_3 , siempre que se requiera ir de una cava a la otra, es la que mantiene una trayectoria similar en la mayoría de las trayectorias previstas. Es por eso que en los valores de posición y velocidad de q_3 es donde se debe prestar mayor atención, ya que será repetitiva en la tarea del robot y además puede generar un movimiento brusco del vino cuando gira de 0 a 180°.

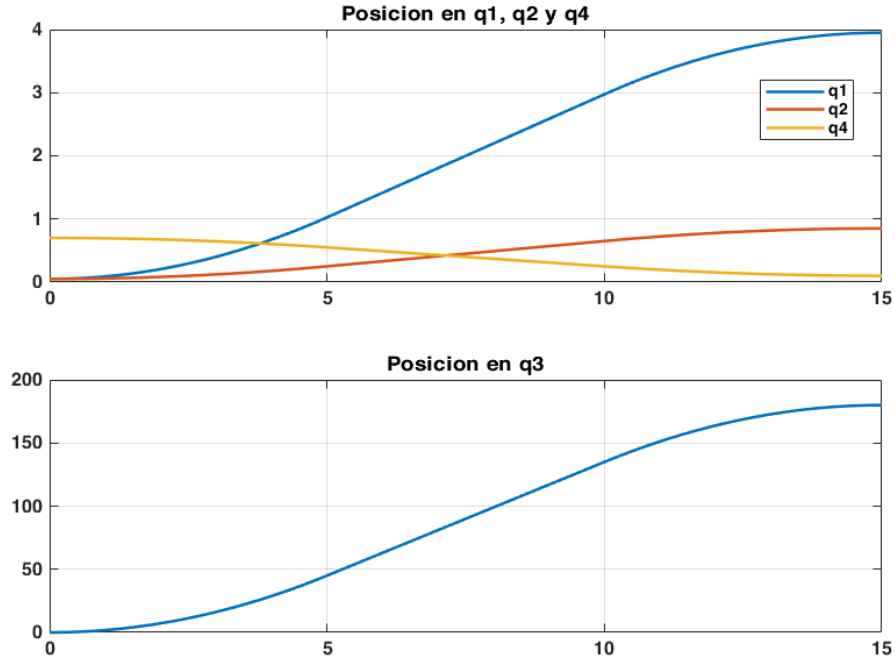


Figura 8: Valores articulares para cumplir la trayectoria 1 prevista en 15 segundos

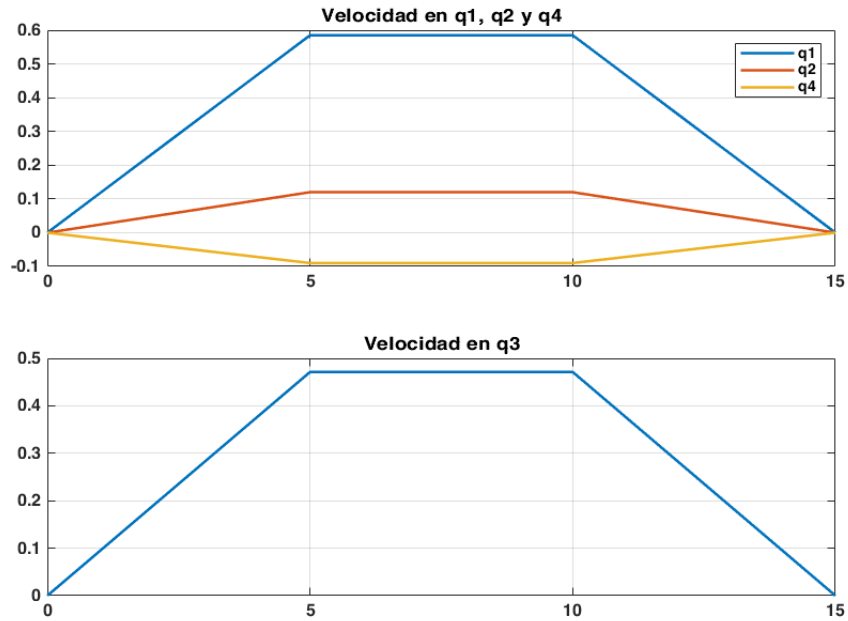


Figura 9: Velocidades articulares trapezoidales para cumplir con la trayectoria 1

4. Dinámica

Dada la complejidad que supone el análisis dinámico por alguno de los métodos previstos como Newton - Euler o por Lagrange, en este proyecto se ha decidido utilizar la función `inverseDynamics`, que simplifica el proceso. Esta función permite trabajar directamente con el objeto `rigidBodyTree` creado en la sección 3 y analizar las trayectorias generadas pasando los vectores de posición, velocidad y aceleración.

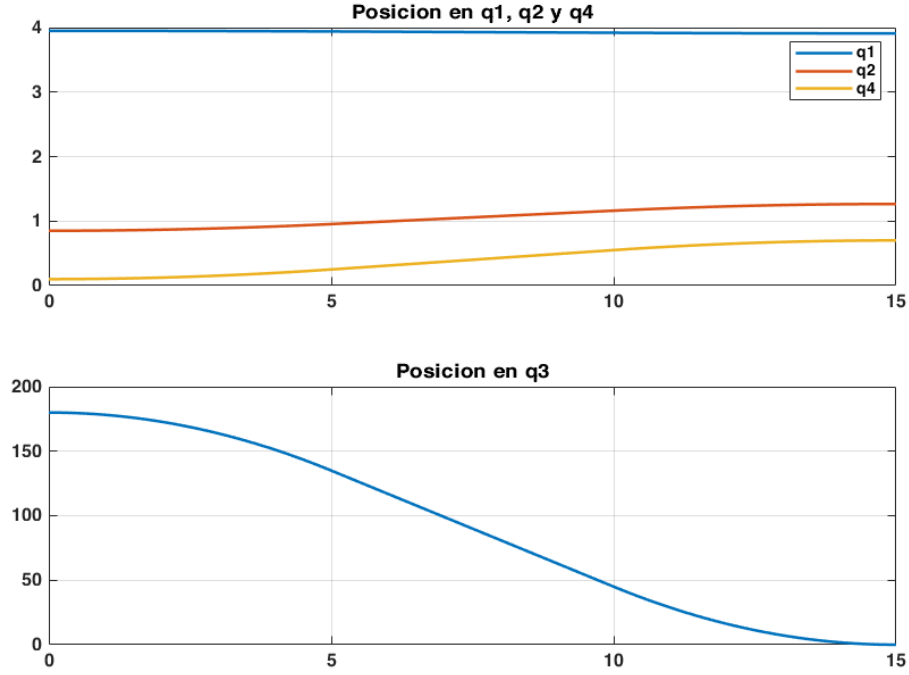


Figura 10: Valores articulares para cumplir la trayectoria 2 prevista en 15 segundos

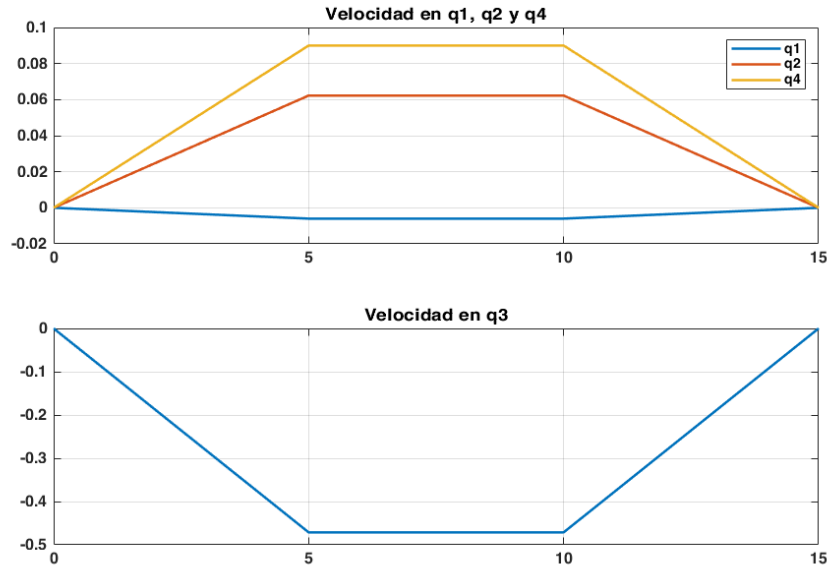


Figura 11: Velocidades articulares trapezoidales para cumplir con la trayectoria 2

4.1. Dinámica de la trayectoria 1

Las gráficas muestran transiciones importantes alrededor de los tiempos $t = 5$ y $t = 10$, donde se observan cambios abruptos en las fuerzas de la articulación $q1$ y en el torque de la articulación $q3$. Esto podría estar relacionado con los cambios de velocidad variable a velocidad constante generados por el perfil trapezoidal.

En $q1$ se generan los mayores esfuerzos, y esto es debido a que es la articulación que soporta el resto del cuerpo del robot, recordando a la matriz de masas donde todas las masas están directamente relacionadas con la primer articulación de un robot serie.

Por otro lado, las fuerzas en las articulaciones $q2$ y $q4$ presentan magnitudes considerablemente

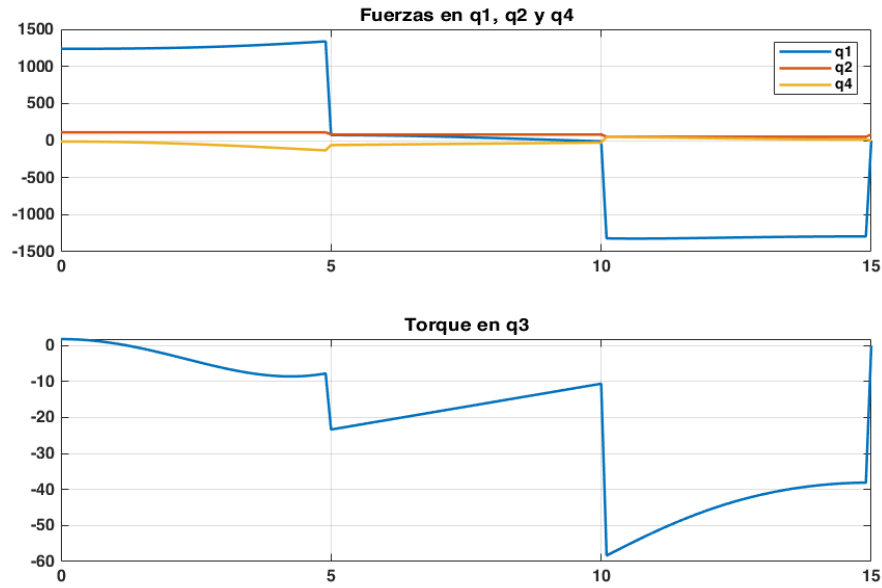


Figura 12: Fuerzas y torques para la trayectoria 1

menores y un comportamiento más estable. En particular, la fuerza en $q2$ permanece casi constante a lo largo del tiempo. Esto se debe a que dicha fuerza es necesaria para mantener la altura del gripper. Sin embargo, en un sistema real, esta altura podría mantenerse bloqueada sin necesidad de generar esfuerzos continuos, utilizando un freno mecánico en el motor para reducir el consumo energético y evitar esfuerzos innecesarios en el actuador.

4.2. Dinámica de la trayectoria 2

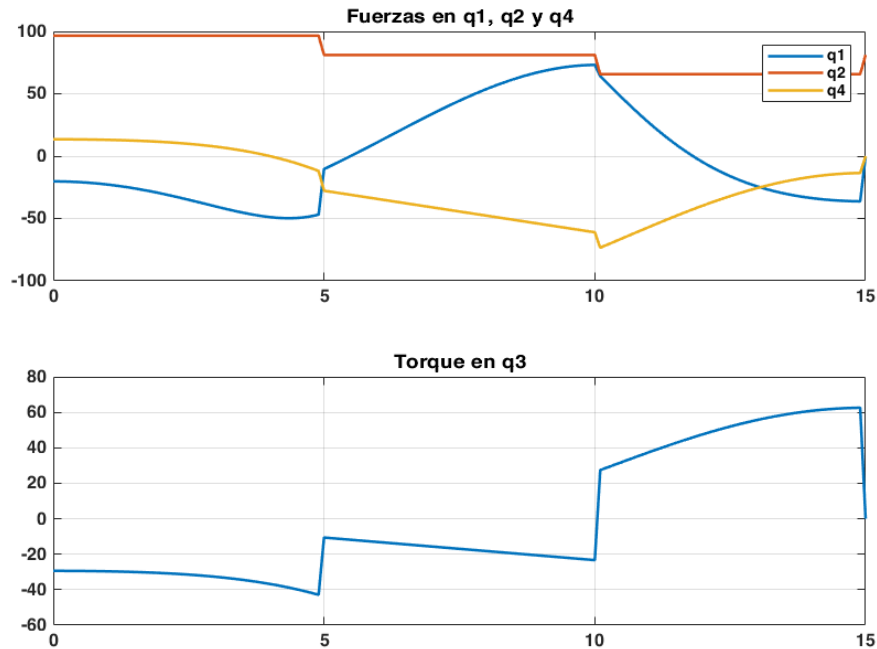


Figura 13: Fuerzas y torques para la trayectoria 2

Aquí la fuerza en $q1$ tiene valores mucho menores respecto a la anterior trayectoria, justamente por la diferencia en el trayecto lateral que debe recorrer el robot. Aquí se nota mejor el hecho de que

la fuerza en q_2 tiene valores casi constantes a lo largo del tiempo, nuevamente, debido a que se debe mantener el cuerpo del gripper a cierta altura.

Algo interesante de ver es como el torque en q_3 es una replica espejada del torque obtenido en la trayectoria 1. Y esto se debe a que justamente el perfil de velocidad en q_3 en la trayectoria 1 es el mismo que el de la trayectoria 2 pero con valores negativos.

4.3. Selección de componentes

La selección de componentes como los motores y el tren de engranajes se realiza a partir de los valores de fuerzas y torques calculados en las simulaciones dinámicas. Es fundamental asegurar que los actuadores sean capaces de generar el par requerido con un margen de seguridad adecuado, considerando tanto las condiciones nominales como las situaciones de máxima carga y las pérdidas por rozamiento.

Para las articulaciones como q_1 , que experimenta picos de fuerza elevados, es necesario elegir un motor con un torque nominal que, bajo la selección de un adecuado tren de engranajes, sea capaz de satisfacer el torque necesario para mover la estructura.

En el caso de q_2 , donde la fuerza es relativamente constante y de menor magnitud, el diseño puede optar por un motor de menor potencia. Sin embargo, se podría incluir un mecanismo pasivo, como un freno mecánico, para mantener la posición del gripper sin que el motor deba estar constantemente activo. Esto no solo optimiza el consumo energético, sino que también reduce el desgaste del actuador.

En el caso de la articulación q_3 , es esencial tener en cuenta las características particulares del movimiento que realiza. Esta articulación tiene la tarea de girar de 0° a 180° y viceversa cuando la trayectoria lo requiere. Es fundamental que este giro se realice de manera suave y controlada para evitar que la botella de vino que se transporta se agite durante el trayecto o se desprenda del gripper. Este movimiento debe completarse en un tiempo de 15 segundos, lo que implica que la velocidad angular debe mantenerse constante y sin fluctuaciones que puedan generar vibraciones o movimientos indeseados en la botella.

Dado que el motor de la articulación q_3 no debe ser demasiado grande, ya que se encuentra montado en el segundo eslabón del robot, la selección de un motor adecuado debe considerar no solo el torque necesario para realizar el giro, sino también el espacio disponible y las limitaciones de peso. Es importante elegir un motor de tamaño compacto pero capaz de generar suficiente torque para mover la carga (la botella de vino) de manera precisa. El tren de engranajes debe estar diseñado para proporcionar el torque necesario sin afectar la capacidad de rotación suave.

Finalmente, no se va a realizar una proyección de los costos debido a que el robot cuenta con muchos elementos mecánicos como poleas, cadenas, estructura completa del espacio de trabajo además de los mencionados anteriormente como motores y trenes de engranaje. Sin embargo, se puede tener un estimativo a partir de una solución similar como lo es el robot de farmacia, que ya existe en la industria y tiene un costo aproximado de 120000 USD. Sin embargo, este precio es meramente orientativo, debido a que los esfuerzos y velocidades en los motores cambian mucho.



5. Conclusiones

Si bien falta un proceso iterativo bastante importante, donde podemos considerar algunas mejoras como tomar a la botella por el cuello (lo que infiere en un cambio en el diseño del gripper y de las celdas), o el rediseño de toda la estructura del robot, el proyecto resulta interesante y satisfactorio.

La parte mas importante para lograr buenos resultados es lograr la mejor especificación posible en los datos del robot, donde se definen dimensiones, masas, etc. Después, como se ha visto, usando funciones provistas por matlab, los cálculos cinemáticos y dinámicos son relativamente sencillos de obtener. Esto nos ayuda a dimensionar el equipo necesario para el robot como el propio espacio de trabajo.