Revista UNIDA Científica
e-ISSN:2520-9213

Publicación periódica de acceso abierto, financiada y editada por la Universidad de la Integración de las Américas

Artículo original

Diseño y simulación de un manipulador robótico de 5 GDL para rovers y otros vehículos menores según lineamientos del concurso European Rover Challenge

Design and simulation of a 5 DOF robotic manipulator for rovers and other smaller vehicles according to European Rover Challenge competition guidelines

Giuseppe Alexander Mendoza Vargas[1], Arturo Flores Alvarez[2]

[1]Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. e-mail: g.a.mendoza.vargas@gmail.com
[2]Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica. Lima, Perú. e-mail: amfloresa@uni.pe

RESUMEN

Actualmente existe una creciente necesidad de robots que se desempeñen en el campo aeroespacial. La *European Space Foundation* mediante el concurso *European Rover Challenge* (ERC) promueve el desarrollo tecnológico de manipuladores que se desempeñen en situaciones inspiradas en tareas necesarias para la exploración planetaria, por ello en este artículo se propone el diseño y simulación de un manipulador robótico de 5 grados de libertad diseñado y simulado por computadora, cuyos actuadores son motores paso a paso para que su programación y control sea más sencillo y entendible. El resultado del diseño es un manipulador robótico con la suficiente versatilidad para ejecutar las tareas requeridas por el concurso.

Palabras clave: Rover, manipulador robótico, Denavit-Hartenbeg, microcontroladores.

ABSTRACT

Nowadays, space agencies have an increasing need for robots to perform in the aerospace field. The European Space Foundation, through the European Rover Challenge (ERC), promotes the technological development of manipulators that can perform in situations inspired by tasks necessary for planetary exploration. Therefore, in this article, we proposed the design and simulation of 5 degrees of freedom robotic manipulator designed and simulated by computer, whose actuators are stepper motors to make their programming and control easier and more understandable. The result is a well-performance robotic manipulator with enough versatility to perform the tasks required by the contest.

Keywords: Rover, robotic manipulator, Denavit-Hartenbeg, microcontrollers.

INTRODUCCIÓN

El *European Rover Challenge* (ERC Space & Robotics Event, 2020) es un concurso internacional que promueve el desarrollo tecnológico, trabajo grupal y convergencia de diversos campos de la ingeniería y ciencias para el desarrollo de vehículos espaciales llamados Rovers. Para ello el concurso desarrolla una serie de pruebas inspiradas en tareas que los Rovers deben realizar en la realidad, restringiendo ciertos aspectos de la exploración del terreno marciano solo a recolección de muestras de tierra, perforación de suelos y manipulación de paneles con botones. En el aspecto relacionado a manipuladores robóticos éstos deben ser capaces de recoger muestras de 300 g de peso, almacenarlas en un contenedor hermético y posteriormente posicionarlo en una zona designada.

Las soluciones aeroespaciales conocidas más famosas (Ellery, 2016) son las usadas por los Rovers Spirit y Opportunity, los cuales usan un Dispositivo de Despliegue de Instrumentos (IDD en inglés), el cual consta de un manipulador de 5 GDL con un alcance de 0.75m y hace uso de motores DC con cajas de reducción de 100:1 junto con una cantidad notable de cableado (1 kg neto de cables). Su estructura es en base a aleaciones de Titanio y su peso total de 4 kg, ofreciendo una precisión de 4mm y 5°. Solo los reductores cuestan cerca de 300 euros cada uno según la página oficial del fabricante, lo cual lo hace de costo elevado y poco accesible.

Para correspondencia dirigirse a: g.a.mendoza.vargas@gmail.com
Recibido: Abril 04, 2020 - Aceptado: Febrero 02, 2021.
Conflictos de interes: Ninguna que declarar.

Este es un artículo publicado en Acceso Abierto bajo Licencia Creative Commons CC-BY, que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite debidamente la obra original.

Para ofrecer una solución, en este artículo se ha propuesto diseñar un manipulador robótico que pueda sostener cargas de hasta 1500 g mediante un efector final de tipo garra con rango de trabajo efectivo de un metro. La propuesta considera utilizar materiales y equipos económicos, genéricos, de fácil construcción y capaces de ser implementados por estudiantes técnicos y universitarios. Se espera que el manipulador desarrollado sirva como modelo para la fabricación de nuevos robots pequeños, sencillos, notablemente más baratos que los del mercado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del manipulador se divide en 4 etapas

A. Diseño preliminar. Consiste en cálculos a mano para determinar las longitudes de las partes principales del manipulador, es decir de los eslabones y la garra. Posteriormente se realiza un análisis de cuerpo libre usando estas dimensiones y asumiendo los pesos de éstos junto con los de los motores y la carga. De esta forma se puede calcular el torque necesario que deben entregar. Para este robot se asumirán longitudes que permitan un alcance de 1 metro con una carga efectiva de 1.5 kg. Cada junta del robot deberá moverse a 2 RPM, velocidades mayores requerirán motores más pesados y potentes.

B. Diseño mecánico. En base a los datos de longitudes y pesos se procede a diseñar el manipulador robótico en software CAD, probando diferentes materiales que aseguren una buena relación entre rigidez y peso. Los materiales recomendados son Aluminio 6063 y sintéticos como ABS o PLA.

C. Diseño electrónico y selección. Con los datos de torque del diseño mecánico se procede a seleccionar los motores necesarios para el control del manipulador, incluyendo drivers, límites de carrera, encoders, baterías, controladores y acondicionadores de señal. Finalmente se realiza una lista de los materiales y equipo necesario junto con una estimación del precio.

D. Control y simulación. Es una etapa crucial, puesto que las condiciones restrictivas de la situación actual hacen difícil tener acceso a un taller o laboratorio de pruebas. Para ello el software Matlab y su entorno gráfico Simulink permiten simular la acción independiente de los motores junto con la lógica de control del manipulador completo.

RESULTADOS

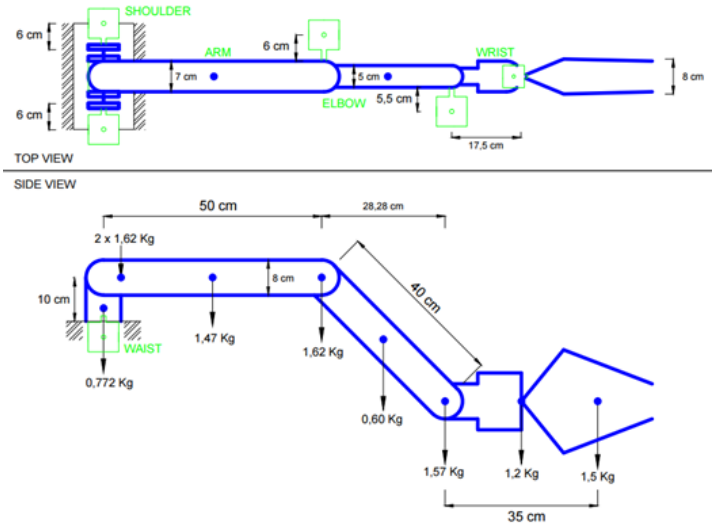


Figura 1. Diagrama de cuerpo libre del manipulador, con las cargas y longitudes principales.

A. Diseño preliminar. Para el diseño preliminar se asumió que la estructura del manipulador estaba hecha completamente de Aluminio, y que los motores usados eran paso a paso ya que su control es más sencillo: directamente se controla la posición más que el torque. Los motores paso a paso son Nema 23 de 1.62 kg cada uno para los 3 primeros grados de libertad (la junta del hombro usa dos), en la muñeca se usa un Nema 23 de 1.57 kg para la orientación y un Nema 14 de 400 g para el giro. La posición de máximo estrés para los motores es con el manipulador semi extendido con el codo arriba (Fig. 1).

Tabla 1. Torques necesarios en cada articulación.

Torques necesarios		
Junta	**Kg.cm**	**N.m**
Cintura - Waist	258	25.3
Hombro - Shoulder	590	57.9
Codo - Elbow	203	19.9
Orientación - Wrist	74	7.2
Giro	6	0.6

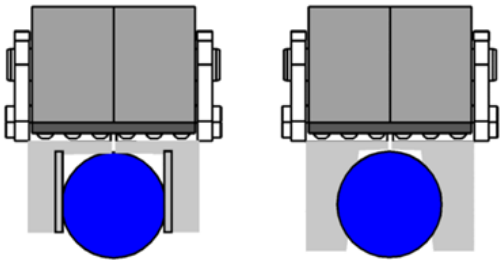


Figura 2. Modos de sujeción de la garra. A la izquierda, por fricción. A la derecha, abarcando o colgando.

Usando las ecuaciones de Newton se hallaron los torques necesarios que debe proveer cada motor, pero hubo un problema en la junta de la cintura: como el eje de rotación es paralelo a la dirección de la gravedad en teoría este motor no debería soportar torsión. Por ello se asumió otro enfoque (Amanta, Endara, Bastidas, Proaño, & Villareal, 2017): como los motores Nema se mueven por pulsos de 0.02 segundos de duración con una velocidad promedio de 2 RPM a la salida de su reducción, entonces en promedio el motor acelera durante ese tiempo desde el reposo. Usando la segunda ley de Newton para la rotación, esto es se puede aproximar el torque necesario. En la Tabla 1 se lista los resultados.Para el diseño de la garra se tomó en cuenta la teoría de Zaytran Automation (Zajac Jr, 1996) para el dimensionado y selección de servomotor. De acuerdo con sus ecuaciones el uso de un servomotor de 1 kg de peso entregaría el torque suficiente para mantener sujeto una carga de 1500 g solo con fricción. Por ello se decidió usar un servo más pequeño para la manipulación de cargas de hasta 600 g, con lo cual el servomotor debe entregar un torque de 3.5 N.m. Para mayores se optó que “cuelguen” del mismo gripper tal como se ve en la Fig. 2 en la vista de perfil.

B. Diseño mecánico

En un principio se planteó diseñar el manipulador completamente de material sintético imprimible n 3D, usando el software Solidworks junto con su herramienta Solidworks Simulation para el análisis estático y pruebas de esfuerzo del material. Lamentablemente la rigidez del ABS y PLA era tan pequeña que se producían pandeos de 5 mm o más en sus componentes, así que las partes principales que componen la cintura, hombro, brazo y antebrazo (eslabones) del robot fueron diseñados en Aluminio 6063 T5, mientras que la muñeca y garra en ABS imprimible. Además, que estos dos últimos poseen formas geométricas complejas que son complicadas de doblar o maquinar en aluminio. Es de notar que el peso de cada eslabón es cercano al asumido y menor en algunos casos (Tabla 2). Las dimensiones principales del robot se aprecian en la Figura 3.

Tabla 2. Comparativa de los pesos de cada eslabón.

Comparativa de pesos en el manipulador en kg		
Eslabón	**Peso asumido**	**Peso final**
Hombro	0.77	0.99
Brazo	1.47	1.16
Antebrazo	0.60	0.50
Muñeca + gripper	1.20	1.00

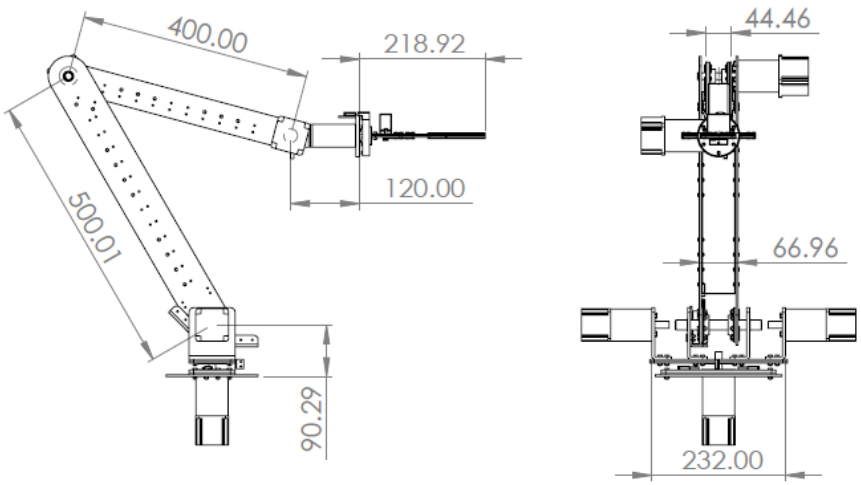


Figura 3. Dimensiones principales del manipulador robótico en milímetros.

C. Diseño electrónico y selección. Con los torques calculados previamente se seleccionan los motores y servos necesarios para el robot, los que se resumen en la Tabla 3.

Para el servo se escoge el modelo FEETECH FT5335M de 3.89 N.m de torque y alimentado con 7.4 V. Además, son necesarios otros elementos para el control del manipulador. Para medir la posición de las juntas los motores Nema tienen encoders de cuadratura de 12 pasos por revolución y alimentados por 12 V, además que necesitan de drivers para su control: el TB6560 bastará ya que los motores tienen bajo consumo de corriente (menos de 3 A). También son necesarios límites de carrera que indiquen al robot cuando se ha llegado a una posición de sobre extensión, en total son 7, dos para la cintura, dos para el hombro u uno para cada uno de las juntas que queden.

El control de posición del manipulador se realizará mediante una placa Teensy 3.6 la cual cuenta con 40 pines digitales, todos con interrupciones y la mitad de ellos PWM para el control por pulsos de los motores. Este se planea conectar a una computadora Jetson TX2 para el control autónomo, pero también puede conectarse a la PC mediante un cable USB y controlarlo de forma estacionaria.

Para cumplir con el requerimiento de portabilidad se requiere de una fuente de baterías. Para ello se planea construir un banco de baterías Samsung 18650 de 3.7V. Considerando los valores nominales de los elementos usados extraídos de sus datasheets se calcula la capacidad total de carga necesaria:

Con un cálculo rápido se tiene que un pack de 6x6 baterías Samsung 18650 Ion Litio de 3.6 V colocadas 6 en serie por 6 en paralelo entregarán el voltaje y capacidad de carga necesaria, además que soportará picos de corriente. Para evitar problemas de sobrecarga y sobrevoltaje se usará un BMS (Battery Management System) para baterías de litio de 24 V en total, el modelo BMS HX-6S-12 usado para scooters soporta 15 A de carga y descarga, tiene un voltaje de carga de 25.4 V con un voltaje de sobrecarga de 4.25, más que suficiente para una carga nominal de las baterías.

Además, se debe considerar que las señales del encoder deben acondicionarse para no quemar los puertos del Teensy, para ello se diseñó un conjunto de acondicionadores en base al opamp LM339 (Texas Instrument Incorporated, 2018). Finalmente, con los materiales y equipos necesarios se procede a listar el precio total del manipulador robótico. El precio incluyendo un excedente del 10% es de 18641 dólares. El cual se reduce a 1092 dólares si no se desea utilizar la tarjeta Jetson.

Tabla 3. Características principales de los motores paso a paso utilizados en el robot.

MOTORES NEMA PARA EL MANIPULADOR ROBOT					
	Cintura	**Hombro**	**Codo**	**Orientación**	**Giro**
Modelo	57BYGH51(M)-144-4A/B	57BYGH51(M)-144-4A/B	57BYGH51(M)-144-4A/B	57BYGH41(M)-144-4A/B	35BYGH20-073-4A/B
Descripción	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 14
Reducción	72:1	72:1	72:1	36:1	27:1
Cantidad	1	2	1	1	1
Torque salida	450 kgf.cm	450 kgf.cm	450 kgf.cm	123 kgf.cm	14 kgf.cm

Tabla 4. Presupuesto necesario para la construcción del manipulador robot.

Materiales-equipo	Cantidad		Precio total
Aluminio	10 m^2	$	120.00
Barra de acero	1 m	$	10.00
Pernos y tuercas	60 pares	$	40.00
Rodamientos	5 un	$	14.00
Motores paso a paso	6 un	$	240.00
Servomotor	1 un	$	30.00
Encoders	6 un	$	60.00
Limit switch	7 un	$	5.25
Drivers	6 un	$	36.00
Baterías	40 un	$	300.00
BMS	1 un	$	7.00
Tarjeta Teensy	1 un	$	30.00
Jetson TX2	1 un	$	700.00
Otros	-	$	100.00
	TOTAL	**$**	**1692.25**
	+10%	**$**	**1861.48**

D. Control y simulación. Debido a la coyuntura actual es difícil tener acceso a un laboratorio, por ello Simulink ofrece herramientas de simulación de motores paso a paso con su librería Simscape (The MathWorks, Inc., 2020). Primero se modeló la respuesta de los motores paso a paso a determinadas velocidades de rotación. Se debe tener en cuenta que para éstos el torque cae de forma abrupta con la velocidad. Las pruebas con motor cargado demostraron que a una velocidad de 150 RPM a la salida del eje los motores de cintura y giro de muñeca comienzan a respaldar y perder posición, Figura 5. Por ello a estos motores se les redujo la velocidad a 120 RPM. Los otros motores sí soportan la velocidad inicial.

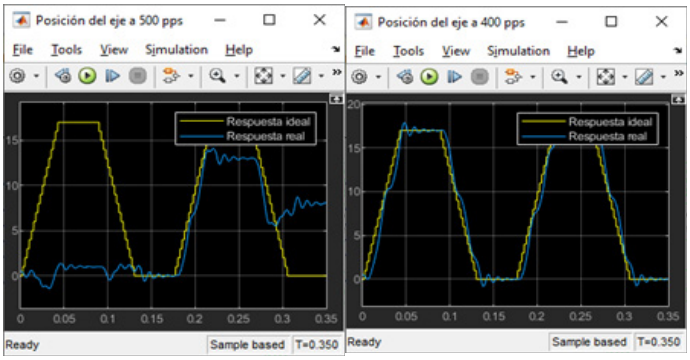


Figura 5. Izquierda, respuesta del motor de la cintura a 150 RPM: el motor pierde posición. Derecha, respuesta del mismo motor a 120 RPM: la respuesta es rápida y prácticamente no hay retraso.

Con las velocidades de los motores determinadas se procedió a modelar la respuesta dinámica del motor a posiciones y velocidades aleatorias que caigan dentro del rango presentado en la Tabla 6. Notar que en el codo la posición solo toma valores negativos. Esto es debido a que el manipulador se posiciona con el codo arriba.

Antes de presentar los resultados se debe hacer una aclaración: Matlab presenta herramientas que facilitan el cálculo dinámico y cinemático del robot, para ello solo se deben marcar los ejes coordenados de las juntas en nuestro modelo de Solidworks y exportarlo en formato URDF (Universal Robotic Description Format), para ello previamente se instaló el complemento SolidWorks to URDF. No es necesario seguir el formato Denavit-Hartenberg puesto que el software se encargará de los cálculos, así que por facilidad de elección los sistemas coordenados se alinearon de forma conveniente. Eso sí, siempre se recomienda que los ejes Z sean paralelos a las juntas de revolución, Figura 6.

Tabla 6. Restricciones de posición y velocidad en las juntas del manipulador.

Junta	Posición (deg)	Velocidad (RPM)
Cintura	-90° a 90°	< 1.67
Hombro	0 a 135°	< 2.01
Codo	-135° a -45°	< 2.01
Orientación-Muñeca	-90° a 90°	< 4.17
Giro-Muñeca	-30° a 270°	< 4.44

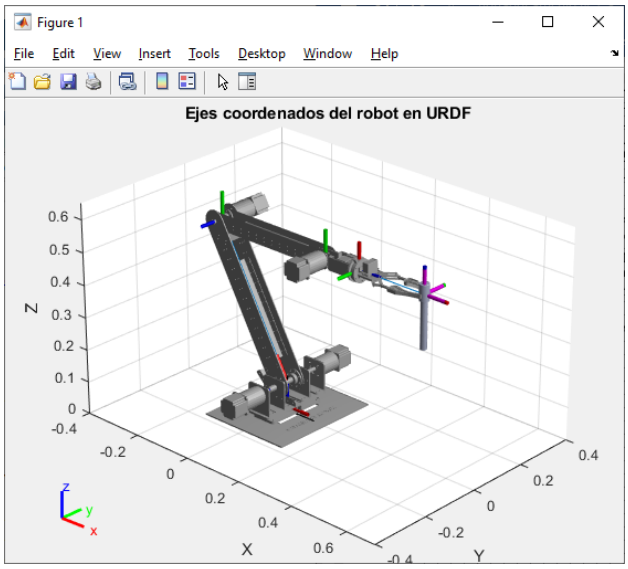


Figura 6. Diseño final del manipulador robótico en formato URDF. En granate se ubica el sistema coordenado del efector final.

Para la respuesta dinámica del motor se modelaron señales senoidales que estén en los rangos de posición mostrados (amplitud + bias) mientras que ajustar la frecuencia permite restringir la velocidad angular a los rangos mostrados. Es importante mencionar que no se modela la aceleración porque primero, la aceleración es notable solo al inicio y al final del movimiento de los motores, en el resto del trayecto la velocidad es prácticamente constante; y segundo, la aceleración varía por saltos bruscamente, lo cual genera un alto procesamiento en la computadora. Los resultados se muestran en las Figuras 7 y 8.

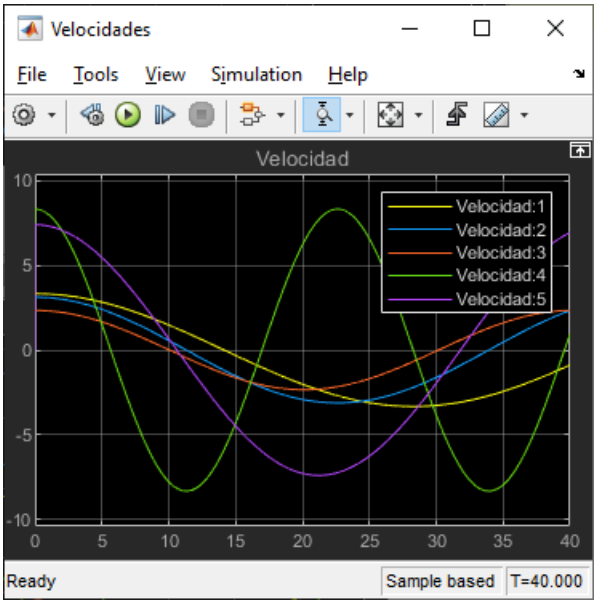


Figura 7. Velocidad angular de las juntas del manipulador en RPM. Todas ellas varían de forma senoidal, aunque en algunos casos se sobrepasa el límite establecido.

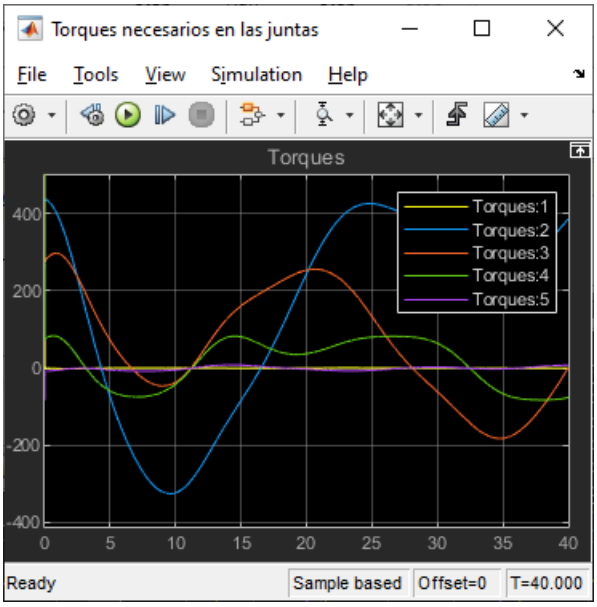


Figura 8. Torques actuantes que los motores deben entregar. Este diagrama incluye las pérdidas debido a los engranajes planetarios, cuyas eficiencias oscilan entre 80 y 90%. Notar que el torque de la junta de la cintura es casi imperceptible. Las unidades son de kgf.cm.

Finalmente se modela la respuesta del robot a una trayectoria y posición predefinida. En este ejemplo se desea que la garra completamente cargada se mueva desde su posición de reposo hasta una distancia de 1 metro con el manipulador completamente extendido. Para ello se tabula una serie de 5 puntos con diversas posiciones intermedias, todas ellas en teoría deben mantener el gripper en horizontal, y también se calcula las posiciones angulares respectivas de las juntas en esas posiciones. La respuesta del manipulador fue la siguiente:

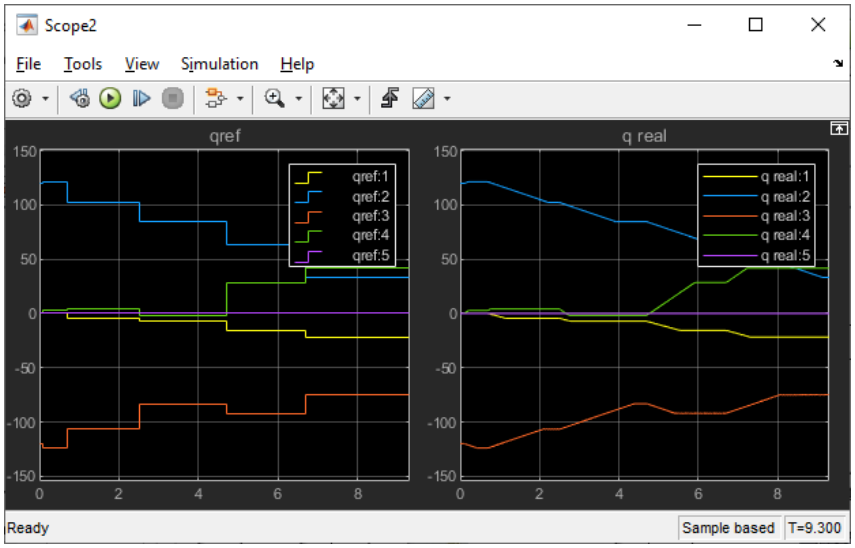


Figura 9. Posición deseada de las juntas vs posición real. Notar que, aunque la respuesta es notablemente lenta, no existe sobre impulso y el error de posición es muy pequeño.

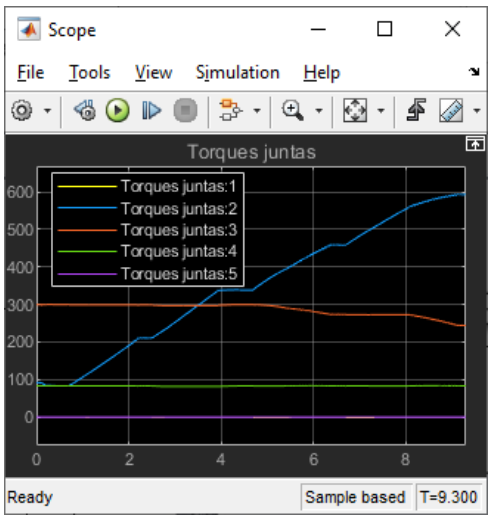


Figura 10. Torques actuantes que los motores deben entregar durante todo el trayecto, incluida pérdidas.

El manipulador responde de forma rápida al cambio de posición y prácticamente no existe sobre impulsos puesto que la aceleración es baja. Lo que si se debe destacar es el lento proceso para llegar a una posición intermedia: solo es posible realizar un control e proporcional en lazo cerrado con ganancia igual a uno, ya que la velocidad de los motores es constante, en otras palabras se alcanzó una buena precisión a costa de la velocidad. En el caso de los torques la Figura 10 muestra que ésos no gozan de muchos sobresaltos y que se mantienen en el rango esperado según la hoja de datos del fabricante.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran una gran precisión en el posicionamiento del efector final incluso al estar cargado, cosa que es de esperarse por el uso de motores paso a paso, además que no fue necesario el control por torque. Por otro lado, el peso del robot se vuelve notablemente alto: solo en motores se tiene una masa de 8 kg ya que las reducciones son de acero puro: la capacidad de carga del manipulador se ve mermada debido al peso del mismo. Comparando 4 kg del robot IDD (Ellery, 2016) con los cerca de 12 kg de este robot se nota una gran diferencia. Esto es debido principalmente al alcance del mismo, que vuelve una necesidad el usar motores más grandes y potentes para contrarrestar el efecto de palanca. Pero en lo que concierne a la precisión este manipulador lo supera con creces, ya que la precisión es de 0.1°, comparado con los 5° del manipulador del Opportunity. La mayor dificultad encontrada radicó en el modelamiento matemático de los motores, puesto que su respuesta real en el tiempo es compleja, para ello las herramientas de la plataforma Simscape permitieron simplificar el modelo, pero a futuro y con mayores recursos computacionales se espera volver a realizar la simulación teniendo en cuenta estos aspectos.

CONCLUSIONES

El manipulador robótico diseñado cumple con los objetivos de manipulación y precisión superando los del IDD, pero su peso superior limita su aplicación a vehículos muy pequeños. El control de posición se simplificó muchísimo debido a que el control del robot ya no es por torque, sino directamente por posición, aunque el modelamiento del mismo motor resultó ser más complejo que el de un DC ordinario. El precio del robot sin incluir la tarjeta Jetson es de aproximadamente $ 1000 dólares, cumpliéndose las expectativas de ser barato, y el control y simulación mediante el software Matlab y el entorno de Simulink prácticamente eliminó la necesidad de escribir el código de las ecuaciones de cinemática y dinámica. Finalmente, quisiéramos dar agradecimientos a nuestro mentor en tópicos de materiales aeroespaciales, Víctor Manuel Gonzaléz Noriega, por las asesorías técnicas durante el diseño del Rover Habich del equipo PumiiPeru.

REFERENCIAS

Amanta, Endara, Bastidas, Proaño, & Villareal (2017) *CONSTRUCCIÓN DE LA BASE PARA EL BRAZO ROBÓTICO "UTN*. Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador: Universidad Técnica del Norte.

Ellery, A. (2016). *ROVERS Robotic Exploration of the Solar System*. Chichester, United Kingdom: Springer.

ERC Space & Robotics Event. (27 de Enero de 2020). *ERC 2020 RULES student*. Obtenido de European Rover Challenge: http://roverchallenge.eu/about-erc/

Texas Instrument Incorporated. (Noviembre de 2018). *LM339 Quad differential comparator*. Obtenido de Texas Instrument: https://www.ti.com/product/LM339

The MathWorks, Inc. (18 de Junio de 2020). *Simscape, Model and simulate multidomain physical systems*. Obtenido de MathWorks: https://www.mathworks.com/products/simscape.html

Zajac Jr, T. (07 de Noviembre de 1996). *ZAYTRAN AUTOMATION. (ZAYTRAN, Inc)* Recuperado el 17 de Junio de 2020, de http://www.grippers.com/size.htm