

DISEÑO Y MODELADO DE UN ROBOT SCARA RPR DE 3 GRADOS DE LIBERTAD

DESIGN AND MODELING OF A 3 DEGREES OF FREEDOM SCARA RPR ROBOT

Rodríguez-Irinea Orlando¹, Sánchez-Sánchez Emanuel¹, Peralta-Hernández Patricia Araceli¹, Hernández-Paredes José Miguel² y Muñoz-Barrón Benigno².

¹Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido El Saucillo Huichapan, Hidalgo, México, Tel.: 01 (761) 724 80 80, CP. 42411.

²División de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Domicilio Conocido El Saucillo Huichapan, Hidalgo, México, Tel.: 01 (761) 724 80 80, CP. 42411., *jmhernandez@iteshu.edu.mx

RESUMEN. El robot SCARA RPR de 3 grados de libertad es un tipo de robot industrial con una estructura de brazo articulado que se utiliza comúnmente en aplicaciones de Pick & Place y ensamblaje. No obstante, aunque este tipo de robots son ampliamente utilizados en el a industria la adquisición de uno puede representar un gasto muy significativo para instituciones educativas, esto no debe ser impedimento para que los estudiantes puedan tener la experiencia con un prototipo funcional que les permita comprender las características, funcionamiento y limitaciones de robots con esta arquitectura. En este artículo se presenta el diseño, modelado matemático de un robot SCARA el cual se monitorea a través de una interfaz gráfica de usuario. En el diseño mecánico se presenta los dibujos CAD los cuales en su mayoría se fabrican con métodos de manufactura aditiva. Se obtienen los modelos cinemáticos directos e inversos los cuales representan la relación entre las posiciones y orientaciones de las articulaciones del robot con las coordenadas del espacio en el que opera. Los modelos se utilizan para conocer la pose del robot en coordenadas articulares y cartesianas, una vez que se conoce la ubicación del efector final se generan trayectorias que el robot debe seguir realizar tareas determinadas. Por otro lado, se obtiene el modelo dinámico del robot el cual describe las relaciones entre las fuerzas y momentos aplicados a las articulaciones, las aceleraciones y velocidades resultantes. Se presenta la interfaz gráfica que se desarrolló con AppDesigner de MATLAB, la cual permite monitorear y controlar en tiempo real al robot a través de RS232.

Palabras clave: Modelos, Cinemática, Dinámica.

ABSTRACT. The 3-degree-of-freedom SCARA RPR robot is a type of industrial robot with an articulated arm structure commonly used in Pick & Place and assembly applications. However, while these robots are widely used in the industry, acquiring one can represent a significant expense for educational institutions. Nevertheless, this should not be an impediment to students gaining experience with a functional prototype that allows them to understand the characteristics, operation, and limitations of robots with this architecture. This article presents the design and mathematical modeling of a SCARA robot that is monitored through a user interface. In the mechanical design, CAD drawings are presented, most of which are manufactured using additive manufacturing methods. Direct and inverse kinematic models are obtained, representing the relationship between the positions and orientations of the robot's joints and the coordinates of the operating space. These models are used to determine the robot's pose in both joint and Cartesian coordinates. Once the location of the end effector is known, trajectories are generated for the robot to follow and perform specific tasks. Furthermore, the robot's dynamic model is derived, describing the relationships between the forces and moments applied to the joints and the resulting accelerations and velocities. The article also introduces the graphical interface developed using MATLAB's AppDesigner, enabling real-time monitoring and control of the robot. Communication is established via RS232.

Key words: Models, Kinematic, Dynamic.

INTRODUCCIÓN

La robótica se dedica al estudio y desarrollo de robots, los cuales son máquinas que pueden llevar a cabo diversas tareas humanas. Algunos robots son autónomos, mientras que otros requieren de instrucciones previas por parte de una persona. Dentro de este campo, la robótica industrial se enfoca en la creación y diseño de robots específicamente para automatizar el trabajo en entornos industriales.

Los robots industriales son utilizados en cadenas de fabricación o producción para ejecutar movimientos y tareas de manera eficiente y precisa, ofreciendo ventajas significativas en comparación con el trabajo humano. Al realizar labores repetitivas y peligrosas con alta precisión, mejoran la calidad de la fabricación o producción. Su capacidad para trabajar sin descanso aumenta la productividad de forma exponencial, ya que pueden producir más en menos tiempo y a menor costo.

En la actualidad, podemos encontrar una amplia variedad de robots con características únicas, que difieren en tamaño, forma, materiales, autonomía, inteligencia, funcionalidad y capacidad. Debido a esta diversidad, existen diferentes formas de clasificarlos. Dos de los métodos más comunes son la clasificación por generaciones, basada en el momento histórico y la evolución tecnológica, y la clasificación por forma y estructura, que agrupa a los robots según su apariencia física y su modo de funcionamiento. Estas categorías nos permiten comprender mejor la complejidad y versatilidad de los robots modernos, impulsando su desarrollo continuo y su aplicación en diversas áreas de nuestra sociedad en constante evolución.^{1,2} A pesar de que las empresas presentan robots cada vez más sofisticados y a un costo menor, el gasto que representa adquirir uno para una institución educativa suele representar una gran carga económica que no todas las instituciones pueden cubrir con facilidad, de lo cual surge la duda de si es posible construir un robot tipo scara que sirva de herramienta para la enseñanza de robótica utilizando tecnologías accesibles como la manufactura aditiva. Para ofrecer a los estudiantes una experiencia cercana y certera de la manipulación de un robot se han presentado diversos artículos en los que se describe y detalla cómo analizar, construir, instrumentar y operar diversas arquitecturas de un robots manipuladores.

Entre los trabajos realizados con modelado y control de brazos robóticos, se destacan los aportes de G. A. Martínez, S. A. Jáquez, J. Rivera y R. Sandoval, quienes desarrollaron el robot manipulador el cual cuenta con 5 grados de libertad los cuales son suficientes para un amplio campo de acción en cuanto a sus movimientos. Así mismo, presentan la metodología del diseño propio, construcción y especificaciones básicas de un robot manipulador, usando como herramienta de diseño el software SolidWorks® por su amplia gama de comandos de diseño y análisis dentro de las tecnologías CAD³. De igual manera, se destacan los aportes de G. D. Bultrago Salazar y O. L. Ramos Sandoval, quienes presentan los resultados del diseño y desarrollo de un sistema de control para el movimiento teledirigido de un brazo robótico de 4 grados de libertad (DOF), aplicando visión de máquina. En donde determinaron

la posición del brazo robótico se utiliza un sensor Kinect y una figura de referencia situada en la posición final del espacio de trabajo, la cual se reconoce por un sistema de visión de máquina⁴.

Otra contribución fue el aporte de S. Díaz, C. Gutiérrez, J. González y J. Meza, quienes presentan a el diseño y modelo de un prototipo virtual, de un brazo de robot de 5 GDL con músculos artificiales, basados en el modelo de McKibben con técnicas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) emulando los movimientos de un brazo físico⁵.

También se destaca el aporte de C. A. Robles Algarín, D. J. Román Ortega y A. M. Polo Llanos, quienes presentan el diseño e implementación de un prototipo de brazo robótico antropomórfico y un guante electrónico que es capaz de registrar los movimientos realizados por la extremidad de una persona. Este dispositivo reconoce los movimientos de los usuarios gracias a sensores de flexión posicionados en las articulaciones de interés⁶.

Así como también se destaca el aporte de C. Vélez, F. Orosco y M. A. Álvarez, quienes presentan el control de un brazo robótico de forma inalámbrica usando software libre. Para esto un operador (usuario) será quien dé las órdenes y acciones a realizar, haciendo uso de un ordenador a través de los diferentes dispositivos de entrada y los módulos XBEE que forman parte de nuestro canal de comunicación. El hecho que el sistema incluya comunicación inalámbrica permite distanciar al operador del brazo robótico y de esta manera se pueda reducir el riesgo al momento de trabajar⁷.

Otro de los trabajos se destaca el aporte de P. A. Rey Molina y K. Urrego, quienes presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto de un prototipo de brazo robótico que permite manipular sustancias u objetos que coloquen en riesgo la vida e integridad del operario⁸.

De igual manera, se destaca el aporte de G. Gutiérrez, C. Aguirre, F. Jiménez, D. Moreno y N. Sierra, quienes presentan el diseño y fabricación de un brazo robótico con 5 grados de libertad de software y hardware libre, de bajo costo y fabricado en su mayoría por procesos de mecanizado e impresión 3D que permita operaciones de

manufactura avanzadas tales como fabricación aditiva mediante un hotenX de impresión 3D, procesos de corte y grabado laser además de un sistema de sujeción de piezas mediante pinzas ⁹.

Otro aporte a destacar es el de J. Noruega, O. García y C. Robles, quienes presentan el diseño de un control estándar basado en la norma H2 y de un control H-infinito aplicados en un manipulador de dos grados de libertad. El manipulador se modeló con las ecuaciones de Euler-Lagrange y la función de disipación de Rayleigh. Se utilizó un modelo en el Toolbox SimMechanics exportando la geometría y propiedades físicas desde SolidWorks ¹⁰.

Otro de los trabajos a destacar es el aporte de C. R. Arroyo Flores, quien presenta el modelado y simulación de un robot SCARA de 3 grados de libertad, establece los aspectos comparativos entre el método Euler-Lagrange y el uso de Solidworks para el seguimiento de trayectorias. Son presentados el modelo cinemático y dinámico del robot SCARA considerando la estructura modelada ¹¹.

Una de las aplicaciones que tiene la robótica en la industria es el pick and place, que por su traducción implica el sujetar y colocar un objeto, este proceso llega a ser repetitivo para un trabajador. El objetivo que se plantea, es realizar un robot sobre el cual se pueda diseñar un protocolo de comunicación y una interfaz de usuario, así como el desarrollar los cálculos necesarios para la elección de actuadores del modelo físico y su control respecto a los sensores añadidos. Para ello se selecciona el diseño para el posterior cálculo de las cinemáticas y la interfaz de un robot que cumpla con este propósito. Se eligió un robot SCARA debido a su gran velocidad y precisión para este tipo de trabajos. En el presente artículo se aborda el diseño, construcción y control de un brazo robótico manipulador de tipo SCARA de 3 grados de libertad RPR, así como también la elaboración de una interfaz gráfica que permita la comunicación entre el usuario y el robot.

METODOLOGÍA

El desarrollo tiene la siguiente secuencia. (Ver Diagrama 1).



Diagrama 1: Secuencia de desarrollo.

DISEÑO MECÁNICO

En la primera etapa se desarrolla el modelado tridimensional de la estructura utilizando el software de diseño SolidWorks®.

Dentro de dicho diseño y desarrollo del Robot SCARA RPR se es necesario tomar en cuenta las tolerancias geométricas. Estas son métodos eficaces para describir el tolerado dispuesto por el diseñador de la pieza. En este caso para el diseño de cada una de las piezas se determinó una tolerancia general la cual es de más 0.2 mm y menos 0.2 mm.

El diseño CAD propuesto en este trabajo se presenta en la Figura 1 explosionada donde se aprecian los elementos que lo integran. En el número 1 tenemos la base, la cual sujetará la articulación rotacional. En el número 2, se tiene una base giratoria compuesta por dos rodamientos e impulsaran la rotación en el eje z. En el número 3, se tiene el motor a pasos con rodamiento cicloidal y hará que gire la articulación por medio de poleas dentadas. En el número 4, se tiene el eslabón 1 de desplazamiento prismático dentado. En el número 5, es el eslabón 2 la base quien sujeta a la articulación 3. En el número 6, se tiene el segundo rodamiento cicloidal para mover dicha articulación. En el número 7, es el tercer motor a pasos quien la hará girar mediante un segundo juego de poleas dentadas. En el número 8, es el eslabón 3 quien contendrá el efector final. En la posición número 9, es el efector final con pinzas de engranaje.

Finalmente, en el número 10 es el servomotor el cual moverá las pinzas para su cierre y apertura.

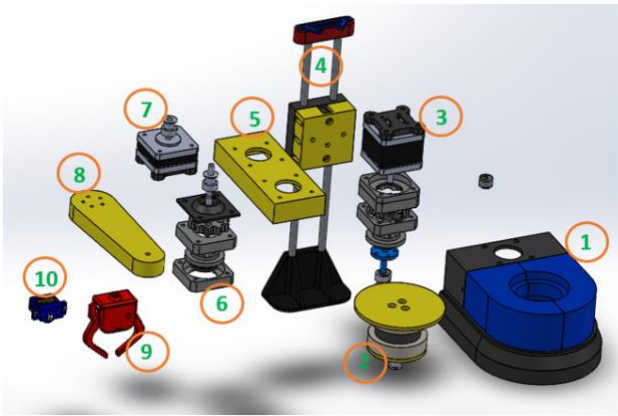


Figura 1: Vista explosionada del robot.

El robot SCARA RPR, es un tipo de robot industrial con una configuración específica de sus articulaciones. Su espacio de trabajo se refiere al volumen tridimensional en el cual el robot puede llevar a cabo sus movimientos y realizar tareas. El espacio de trabajo de un robot SCARA RPR está limitado por los rangos de movimiento de sus articulaciones. Este tipo de robot cuenta con tres grados de libertad, lo que significa que tiene tres articulaciones que le permiten moverse en tres direcciones independientes.

MODELO CINEMÁTICO DIRECTO E INVERSO

La segunda etapa consta de los cálculos del modelo cinemático del robot SCARA RPR.

La cinemática de un autómatas se define como el estudio de los movimientos del robot, respecto a un sistema de coordenadas ¹². En este tipo de análisis, la posición, velocidad, y aceleración se calculan sin tener en cuenta las fuerzas que lo generan, ya que dicho campo es propio de un análisis dinámico. Dentro de un estudio cinemático del robot, se puede calcular su cinemática directa e inversa. La cinemática directa proporciona la información necesaria para transformar los valores de posición, velocidad y aceleración angular o articular del robot, en las variables análogas en coordenadas cartesianas. Mientras que la cinemática inversa proporciona las herramientas necesarias para calcular las transformaciones que el robot debe tomar para alcanzar dicho punto o velocidad ¹³.

- Modelo Cinemático Directo

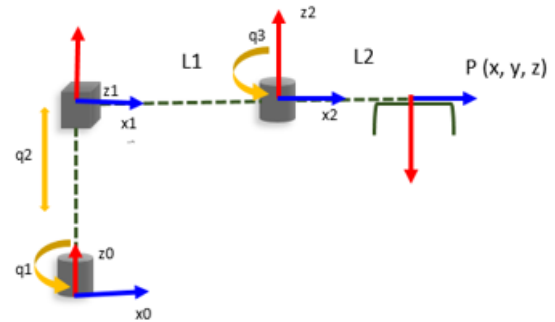


Figura 2: Representación funcional MCD.

Para obtener el modelo cinemático directo se realiza una representación funcional (Figura 2) del sistema de coordenadas generalizadas.

Tabla 1: Parámetros D-H del robot SCARA RPR.

Articulación	Z		X		q
	θ_i	d_i	a_i	α_i	
1	0	-q2	0	0	θ_1
2	q1	0	L1	0	θ_2
3	q3	0	L2	180	θ_3

Luego se establecen los parámetros de Denavit-Hartenberg mostrados en la Tabla 1.

Posteriormente, se realizan las matrices homogéneas y para ello se hace una sustitución de los valores obtenidos anteriormente dentro de la matriz homogénea de D-H para cada articulación.

Matriz homogénea de D-H:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i}C_{\alpha_i} & S_{\theta_i}S_{\alpha_i} & a_iC_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i}C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i}S_{\alpha_i} & a_iS_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matrices homogéneas de las tres articulaciones respecto a la Ec. 1:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -q2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & L1C1 \\ S1 & C1 & 0 & L1S1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C3 & S3 & 0 & L2C3 \\ S3 & -C3 & 0 & L2S3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Una vez hecho esto, se obtiene la matriz de transformación que va de 0-3 multiplicando las Ecs. (2)-(4) y así finalmente obtener las coordenadas de posición del efector final con respecto a la base.

Matriz de transformación de 0-3:

$${}^0_3H = A01 \cdot A12 \cdot A23 \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(q1 + q3) & \sin(q1 + q3) & 0 & L2 * \cos(q1 + q3) + L1 * \cos(q1) \\ \sin(q1 + q3) & -\cos(q1 + q3) & 0 & L2 * \sin(q1 + q3) + L1 * \sin(q1) \\ 0 & 0 & -1 & -q2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta a la matriz de transformación, de esta se obtiene la matriz de rotación y por consiguiente el vector de posición.

Coordenadas de posición:

$$Px = L2 * \cos(q1 + q3) + L1 * \cos(q1) \quad (7)$$

$$Py = L2 * \sin(q1 + q3) + L1 * \sin(q1) \quad (8)$$

$$Pz = -q2 \quad (9)$$

• Modelo Cinemático Inverso

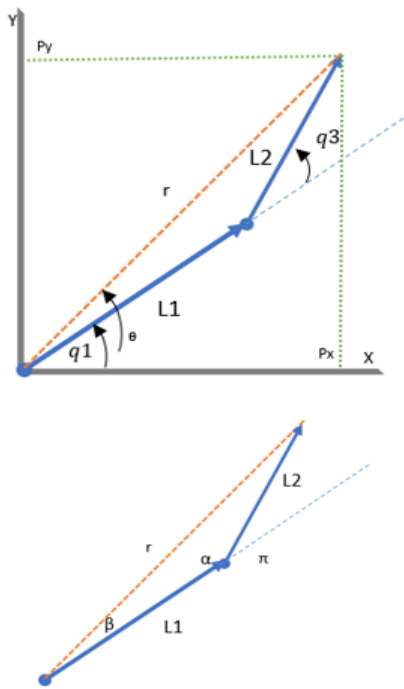


Figura 3: Configuración codo abajo MCI

Para la obtención del modelo cinemático inverso, de igual manera se realiza una representación funcional empleando el método geométrico por su simplicidad resulta práctico para pocos grados de libertad y proyectando el robot sobre el plano xy. Aquí se deben encontrar los valores de las coordenadas articulares del robot. Dada la configuración de la Figura 3, se tiene la siguiente relación geométrica.

$$r = \sqrt{Px^2 + Py^2} \quad (10)$$

Luego en la Ec. 11 se determina el valor de θ debido a su estructura plana, se obtiene de la relación de P_x y P_y .

$$\theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{Py}{Px}\right) \quad (11)$$

Respecto al método geométrico y los datos que se tienen, se determina el valor de q_1 y q_3 .

$$q1 = \theta - \beta \quad (12)$$

$$q3 = \pi - \alpha \quad (13)$$

Aplicando el teorema de los cosenos a los elementos L_1 y L_2 , se obtiene el valor para beta y alfa.

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L2^2 - L1^2 - r^2}{-2L1r}\right) \quad (14)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{r^2 - L1^2 - L2^2}{-2L1L2}\right) \quad (15)$$

Finalmente, se realiza la sustitución de datos, la Ec. 11 y Ec. 14 se sustituyen dentro de la Ec. 12. De igual manera, la Ec. 15 se sustituye dentro de la Ec. 13 y así es como se obtiene q_1 y q_3 respectivamente.

$$q1 = \left(\text{tg}^{-1}\left(\frac{py}{px}\right)\right) - \left(\cos^{-1}\left(\frac{L2^2 - L1^2 - r^2}{-2L1r}\right)\right) \quad (16)$$

$$q3 = \pi - \left(\cos^{-1}\left(\frac{r^2 - L1^2 - L2^2}{-2L1L2}\right)\right) \quad (17)$$

ENSAMBLE

La tercera etapa es el desarrollo mecánico el cual consistió en imprimir el diseño mecánico. Los componentes se fabricaron con material PLA. Las piezas impresas con PLA son resistentes, flexibles y tienen una baja inflamabilidad. Tienen unas propiedades muy similares a las de los plásticos PET, pueden soportar los rayos ultravioletas y son inodoras y fáciles de manipular ¹⁴.

Por consiguiente, se mencionan los materiales electrónicos que se ocuparon.

- 2 motores a pasos Nema 17
- 1 motor a pasos 28byj-48
- 2 encoder magnéticos AS56000
- 1 sensor laser de proximidad TOF200C-VL53L0X
- 3 limit swithch
- 3 controladores A4980
- 1 microcontrolador ATmega2560
- 1 microcontrolador ATmega328P

Posteriormente, se realizó el ensamble del robot, implementando tanto la parte mecánica como la parte electrónica. En la Figura 4, se muestra el robot RPR SCARA armado en su totalidad y cabe mencionar que para empalmar cada elemento se hizo uso de tornillos M4 y para embonar los motores a pasos se ocupó tornillos M3.

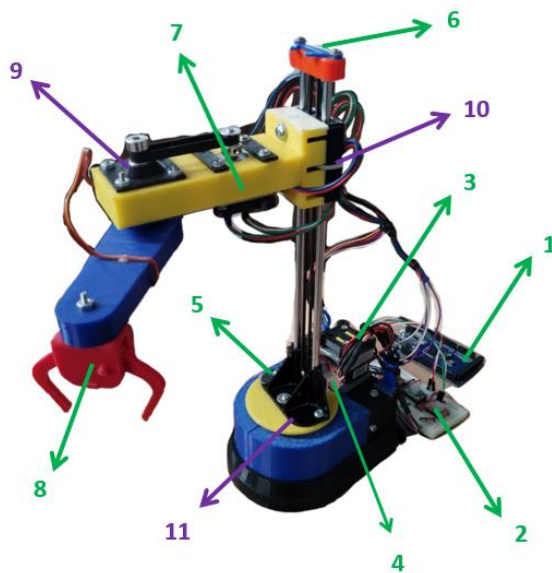


Figura 4: Ensamble completo.

En donde 1 son los microcontroladores (2); en el 2 son los controladores (3); en el 3 motor nema 17 (1); en el 4 motor 28byj-48 (1); en el 5 limit swithch (3); en el 6 sensor laser de proximidad (1); en el 7 motor nema 17 (1); en el 8 efector final (1); en el 9 y 11 articulación rotacional; en el 10 articulación prismática.

MODELO DINÁMICO

En la cuarta etapa se determinó el modelo dinámico que es una representación matemática que describe el comportamiento y las interacciones de un robot con su entorno en términos de fuerzas, aceleraciones y momentos. El modelo dinámico de un sistema como el de un robot manipulador consiste en el conjunto de ecuaciones, basadas en las leyes de la mecánica clásica, que relacionan los parámetros cinemáticos y sus derivadas con las fuerzas y pares aplicados sobre él con el fin de describir su movimiento ¹⁵.

Para determinar el modelo dinámico de nuestro robot se implementó la formulación de Euler-Lagrange.

La formulación de Lagrange-Euler presenta un modelo simple y elegante, dando como resultado una serie de ecuaciones diferenciales no lineales de 2º orden acopladas útiles para el estudio de estrategias de control en el espacio de estados de las variables articulares del robot ^{16, 17}.

Modelo Dinámico (Formulación de Euler-Lagrange)

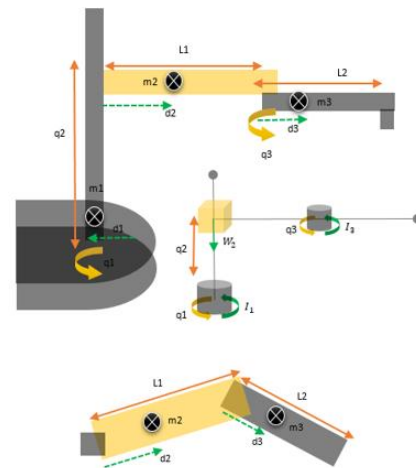


Figura 5: Sistema de referencia

Para la obtención del modelo dinámico mediante la formulación de Euler-Lagrange se realiza una representación del sistema de referencia con respecto al centro de masa de cada eslabón (Ver Figura 5). Luego se realiza la respectiva formulación:

Antes de comenzar para emplear el método de Euler-Lagrange siendo este basado en la energía, se emplean las siguientes ecuaciones:

a. Energía Cinética

Debida al movimiento de un cuerpo rígido.

$$E_c = \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (18)$$

b. Energía Potencial

Debida a la posición o a la configuración del cuerpo.

$$E_p = mgh \quad (19)$$

c. Lagrangiano

$$L = E_c - E_p \quad (20)$$

a. Formulación de Euler-Lagrange termino a termino.

$$\psi = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (21)$$

Conociendo las ecuaciones a emplear, se presenta a continuación el desarrollo matemático del modelo dinámico del robot.

En el primer eslabón se tiene un movimiento rotacional primero se debe determinar las energías tanto potencial como cinética. Se emplea la Ec. 18 para la energía cinética y para obtener la energía potencial se emplea la Ec. 19.

• Eslabón 1: Rotacional

Energía Cinética

$$E_{c1} = \frac{1}{2} m_1 d1^2 \dot{q}1^2 \quad (22)$$

Energía Potencial

$$E_p = -mgh \quad (23)$$

$$E_{p1} = 0 \quad (24)$$

Para el segundo eslabón se tiene un movimiento lineal y de igual manera se determinan las energías cinética y potencial respectivamente.

• Eslabón 2: Lineal

Energía Cinética

Para la obtención de las velocidades se determinan dependiendo en donde se ubique el centro de masa.

Para ello se determina la derivada con respecto al tiempo en x, y, z.

$$V_2^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (25)$$

$$\dot{x} = \frac{\partial}{\partial t} (d2 \cos(q1))$$

$$= -d2 \sin(q1) \dot{q}1 \quad (26)$$

$$\dot{y} = \frac{\partial}{\partial t} (d2 \sin(q1))$$

$$= d2 \cos(q1) \dot{q}1 \quad (27)$$

$$\dot{z} = \frac{\partial}{\partial t} (q2)$$

$$= \dot{q}2 \quad (28)$$

Las velocidades quedan expresadas de la siguiente manera:

$$V_2^2 = (-d2 \sin(q1) \dot{q}1)^2 + (d2 \cos(q1) \dot{q}1)^2$$

$$+ (\dot{q}2)^2$$

$$= d2^2 \cos^2(q1) \dot{q}1^2 + d2^2 \sin^2(q1) \dot{q}1^2$$

$$+ \dot{q}2^2 \quad (29)$$

Finalmente, la obtención de la energía cinética del eslabón dos es:

$$E_{c2} = \frac{1}{2} m_2 (d2^2 \dot{q}1^2 + \dot{q}2^2) \quad (30)$$

En cuanto a la energía potencial es la masa por la gravedad y por la altura, empleando la Ec. 19.

Energía Potencial

$$E_{p2} = -m_2 g q2 \quad (31)$$

Para el tercer eslabón se tiene un movimiento rotacional así que de igual manera se emplea la Ec. 18.

• Eslabón 3: Rotacional

Energía Cinética

$$V_3^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (32)$$

$$\dot{x} = \frac{\partial}{\partial t} (L1 \cos(q1) + d3 \cos(q1 + q3))$$

$$= -d3 \sin(q1 + q3) (\dot{q}1 + \dot{q}3)$$

$$- L1 \sin(q1) \dot{q}1 \quad (33)$$

$$\dot{y} = \frac{\partial}{\partial t} (L1 \sin(q1) + d3 \sin(q1 + q3))$$

$$= d3 \cos(q1 + q3) (\dot{q}1 + \dot{q}3)$$

$$+ L1 \cos(q1) \dot{q}1 \quad (34)$$

$$\dot{z} = \frac{\partial}{\partial t} (q2)$$

$$= \dot{q}2 \quad (35)$$

Determinando la velocidad y de haber obtenido las derivadas con respecto del tiempo en x, y, z se tiene la Ec. 36.

$$\begin{aligned}
 V_3^2 &= (-d3 \sin(q1 + q3) (\dot{q}1 + \dot{q}3) \\
 &\quad - L1 \sin(q1) \dot{q}1)^2 \\
 &\quad + (d3 \cos(q1 + q3) (\dot{q}1 \\
 &\quad + \dot{q}3) + L1 \cos(q1) \dot{q}1)^2 \\
 &\quad + (\dot{q}2)^2 \\
 &= \dot{q}2^2 + L1^2 \dot{q}1^2 + d3^2 \dot{q}1^2 + d3^2 \dot{q}3^2 \\
 &\quad + 2d3^2 \dot{q}1 \dot{q}3 \\
 &\quad + 2L1d3 \cos(q3) \dot{q}1^2 \\
 &\quad + 2L1d3 \cos(q3) \dot{q}1 \dot{q}3
 \end{aligned} \quad (36)$$

Donde la energía cinética para el eslabón 3 es la Ec. 37.

$$\begin{aligned}
 Ec_3 &= \frac{1}{2} m_3 (\dot{q}2^2 + L1^2 \dot{q}1^2 + d3^2 \dot{q}1^2 \\
 &\quad + d3^2 \dot{q}3^2 + 2d3^2 \dot{q}1 \dot{q}3 \\
 &\quad + 2L1d3 \cos(q3) \dot{q}1^2 \\
 &\quad + 2L1d3 \cos(q3) \dot{q}1 \dot{q}3)
 \end{aligned} \quad (37)$$

Energía Potencial

$$Ep_3 = -m_3 g q_2 \quad (38)$$

Para determinar el Lagrangiano de realiza la suma de las tres energías cinéticas de los tres eslabones y de igual forma se realiza la suma de las tres energías potenciales. Una vez hecho esto se emplea la Ec. 20.

- Lagrangiano

$$L = Ec - Ep \quad (39)$$

$$\begin{aligned}
 Ec &= \left(\frac{1}{2} m_1 d1^2 \dot{q}1^2 \right) \\
 &\quad + \left(\frac{1}{2} m_2 (d2^2 \dot{q}1^2 + \dot{q}2^2) \right) \\
 &\quad + \left(\frac{1}{2} m_3 (\dot{q}2^2 + d3^2 \dot{q}3^2 \right. \\
 &\quad + (d3^2 + L1^2 \\
 &\quad + 2L1d3 \cos(q3)) \dot{q}1^2 \\
 &\quad + (2d3^2 \\
 &\quad \left. + 2L1d3 \cos(q3)) \dot{q}1 \dot{q}3 \right)
 \end{aligned} \quad (40)$$

$$Ep = -(m_2 g + m_3 g) q_2 \quad (41)$$

Finalmente, para tener la formulación de Euler-Lagrange se emplea la Ec. 21.

- Euler-Lagrange

Empezamos de derecha a izquierda esto por conveniencia. Así que primero determinamos las derivadas parciales de Lagrangiano respecto a qi.

$$\psi = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (42)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = -gm_2 - gm_3 \quad (43)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial q_3} &= -L1d3m_3 \dot{q}1^2 \sin(q3) \\
 &\quad - L1d3m_3 \dot{q}1 \dot{q}3 \sin(q3)
 \end{aligned} \quad (44)$$

Lo siguiente es determinar la derivada parcial con respecto a qi

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \dot{q}1} &= d1^2 m_1 \dot{q}1 + d2^2 m_2 \dot{q}1 + d3^2 m_3 \dot{q}1 \\
 &\quad + L1^2 m_3 \dot{q}1 \\
 &\quad + 2L1d3 m_3 \dot{q}1 \cos(q3) \\
 &\quad + L1d3 m_3 \dot{q}3 \cos(q3)
 \end{aligned} \quad (45)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}2} = m_2 \dot{q}2 + m_3 \dot{q}2 \quad (46)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}3} = d3^2 m_3 \dot{q}3 + L1d3 m_3 \dot{q}1 \cos(q3) \quad (47)$$

Luego se vuelve a derivar el segundo término, pero ahora con respecto al tiempo como se muestra en la Ec. 48.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} &= d1^2 m_1 \ddot{q}1 + d2^2 m_2 \ddot{q}1 + d3^2 m_3 \ddot{q}1 \\
 &\quad + L1^2 m_3 \ddot{q}1 \\
 &\quad + 2L1d3 m_3 \cos(q3) \dot{q}1 \\
 &\quad - 2L1d3 m_3 \sin(q3) \dot{q}1 \dot{q}3 \\
 &\quad + L1d3 m_3 \cos(q3) \dot{q}3 \\
 &\quad - L1d3 m_3 \sin(q3) \dot{q}3 \dot{q}3 \\
 &\quad + m_2 \ddot{q}2 + m_3 \ddot{q}2 + d3^2 m_3 \ddot{q}3 \\
 &\quad + L1d3 m_3 \cos(q3) \ddot{q}1 \\
 &\quad - L1d3 m_3 \sin(q3) \dot{q}1 \dot{q}3
 \end{aligned} \quad (48)$$

- Euler-Lagrange termino a termino

$$\begin{aligned}
 \varphi = & (d1^2 m_1 \ddot{q}_1 + d2^2 m_2 \ddot{q}_1 + d3^2 m_3 \ddot{q}_1 \\
 & + L1^2 m_3 \ddot{q}_1 \\
 & + 2L1d3m_3 \cos(q3) \ddot{q}_1 \\
 & - 2L1d3m_3 \sin(q3) \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\
 & + L1d3m_3 \cos(q3) \ddot{q}_3 \\
 & - L1d3m_3 \sin(q3) \dot{q}_3 \dot{q}_3 \\
 & + m_2 \ddot{q}_2 + m_3 \ddot{q}_2 + d3^2 m_3 \ddot{q}_3 \\
 & + L1d3m_3 \cos(q3) \ddot{q}_1 \\
 & - L1d3m_3 \sin(q3) \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\
 & - (-gm_2 - gm_3 \\
 & - L1d3m_3 \dot{q}_1^2 \sin(q3) \\
 & - L1d3m_3 \dot{q}_1 \dot{q}_3 \sin(q3))
 \end{aligned} \quad (49)$$

Finalmente se tiene la expresión Euler-Lagrange termino a término como se muestra en la Ec. 49.

PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

En la quinta etapa, se describe el código base que sirvió como punto de partida en este caso para el envío de datos al Robot RPR SCARA. Este código es una implementación en MATLAB para la comunicación serial con un dispositivo externo.

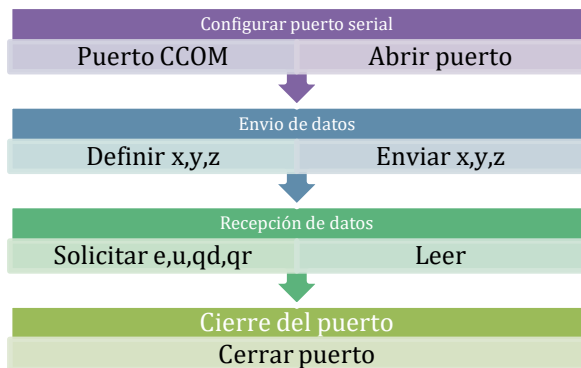


Diagrama 2: Pseudocódigo

1. Primer paso: Configuración del puerto serial

Se inicia limpiando las variables y cerrando todos los puertos serie abiertos previamente. Se define el nombre del puerto 'port' al que está conectado el dispositivo externo ('CCOM5' en este caso). Se crea un objeto 's' para representar el puerto serial. Después se establece la velocidad de comunicación (BaudRate) del puerto a 9600 baudios y se abre el puerto serie utilizando 'fopen(s)'.

2. Segundo paso: Envío y recepción de datos

Se definen tres valores de punto flotante (x, y, z) que representan coordenadas o setpoints para el dispositivo externo (robot). Se crea un vector de 15 elementos llamado 'msg' que se utilizará para enviar datos al dispositivo externo a través del puerto serial. Se configuran los primeros dos elementos de 'msg': msg(1) = 255: un byte de inicio que puede ser un valor arbitrario utilizado para indicar el inicio del mensaje. msg(2) = 241: un comando específico (comando setpoint) que el dispositivo externo entiende para recibir los datos de setpoint. Luego se convierten los valores de x, y, z en una representación de 4 bytes (32 bits) cada uno utilizando la función 'typecast'. Estos valores de 4 bytes se almacenan en 'byte_x', 'byte_y' y 'byte_z', respectivamente. Se copian los bytes de x, y, z en los elementos adecuados del vector 'msg', que es el mensaje que se enviará al dispositivo externo. Finalmente, se escribe el mensaje 'msg' en el puerto serie utilizando 'fwrite(s, msg, 'uint8')', lo que envía los datos de setpoint al dispositivo.

3. Tercer paso: Recepción de datos

El código realiza una serie de lecturas desde el dispositivo externo, esperando recibir datos específicos como respuesta. Cada lectura se realiza enviando un mensaje de solicitud (comando) al dispositivo externo a través del puerto serial y luego esperando a que el dispositivo envíe los datos de respuesta que se leen y almacenan en las variables correspondientes.

Los comandos enviados y las respuestas esperadas son:

- Comando 100: Solicita el valor de la primera coordenada de referencia (q1d) desde el dispositivo externo.
- Comando 101: Solicita el valor de la segunda coordenada de referencia (q2d) desde el dispositivo externo.
- Comando 102: Solicita el valor de la tercera coordenada de referencia (q3d) desde el dispositivo externo.
- Comando 103: Solicita el valor de la primera coordenada real (q1r) desde el dispositivo externo.

- Comando 104: Solicita el valor de la segunda coordenada real (q2r) desde el dispositivo externo.
- Comando 105: Solicita el valor de la tercera coordenada real (q3r) desde el dispositivo externo.
- Comando 106: Solicita el valor del primer error (e1) desde el dispositivo externo.
- Comando 107: Solicita el valor del segundo error (e2) desde el dispositivo externo.
- Comando 108: Solicita el valor del tercer error (e3) desde el dispositivo externo.
- Comando 109: Solicita el valor de la primera señal de control (u1) desde el dispositivo externo.
- Comando 110: Solicita el valor de la segunda señal de control (u2) desde el dispositivo externo.
- Comando 111: Solicita el valor de la tercera señal de control (u3) desde el dispositivo externo.

4. Cuarto paso: Cierre del puerto serial

Finalmente, se cierra el puerto serial utilizando 'fclose(s)'.

Este código se utiliza para enviar datos de setpoint al dispositivo externo y recibir datos de referencia, datos reales, errores y señales de control desde el dispositivo. La comunicación se realiza a través de la comunicación serial con comandos específicos y respuestas estructuradas.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Como parte de la quinta etapa se presenta la descripción del programa, esta se divide en dos partes. Para la primera parte se presenta sobre el control del robot y en la segunda parte se describe la interfaz la cual es una interacción con el usuario.

- Parte 1: Tarjeta de control

Aquí se utilizaron dos microcontroladores en relación esclavo-maestro, de modo que el esclavo lee dos de los tres sensores de posición y controla el motor de la articulación prismática y el motor de la articulación rotatoria con efector final. El maestro se encarga de leer el tercer sensor de posición y controla de igual manera el motor de la base del robot. Así mismo,

envía y recibe datos de la interfaz de Matlab para las instrucciones en base a los actuadores y realiza los cálculos matemáticos de los movimientos del robot. Para el microcontrolador maestro (ATmega2560) se utiliza la librería wire para la comunicación i2c con el encoder de posición que administra. Luego se implementan dos comunicaciones seriales, una para el envío y recepción de datos de Matlab y la otra para el intercambio de información con el microcontrolador esclavo (ATmega328P). El microcontrolador maestro recibe paquetes de datos de coordenadas para el movimiento del robot constantemente, las cuales transforma datos flotantes para su posterior uso. Cuando envía la información, esta se manda a imprimir en el serial correspondiente y mediante funciones (comandos) de Matlab lo descifra como datos numéricos.

En el caso del microcontrolador ATmega328P se utiliza la librería wire para la lectura del encoder, una librería spi para el sensor de proximidad el cual monitorea la articulación prismática. Luego se le especifica su dirección para la comunicación serial con el microcontrolador maestro, y recibe los datos necesarios hacia el control de los actuadores de las articulaciones.

- Parte 2: Interfaz

La interfaz utilizada para el control de robot se desarrolló con la herramienta App Designer de MATLAB, esta se divide en 2 secciones principales: una parte aloja la interacción con el microcontrolador y la otra las gráficas como se puede ver en la Figura 6.

En la parte superior del panel izquierdo 1.1, se puede encontrar las configuraciones para iniciar la comunicación con el microcontrolador. Primero se encuentra un menú desplegable que tiene los puertos disponibles, en primera instancia se mostrara "vacío", se debe presionar el botón "Actualizar" para que con ello se actualice el menú desplegable con el puerto al que está conectado el microcontrolador. Se hizo de esta forma debido a que sería más practico la selección de puertos, a comparación de buscar el puerto y escribirlo de forma manual. En este apartado también se encuentra un pequeño listado de los Baudios que se pueden ocupar para el programa, se eligió hacerlo de esta forma para darle mayor

dinamismo a diferencia de programar directamente o escribirlo en la interfaz. Y por último para iniciar la comunicación hay un switch que permite abrir y cerrar el puerto serial. En la parte central 1.2 se encuentra unos cuadros numéricos editables que permiten establecer a que coordenadas que se desean para mover el robot.

En la parte de abajo 1.3 se encuentra un grupo de botones junto a un cuadro numérico editable, el cual permite el tiempo de muestreo, los botones que se muestran son los de "Inicio" que como su nombre lo dice inicializa el proceso de tanto envió como recepción de datos. El botón "Guardar datos" permite el almacenamiento de datos en un archivo, el botón "Parar" detiene el proceso que se esté realizando en ese momento y el botón de "Circulo" almacena la parte de programación que hace que el robot siga una trayectoria siendo esta una circunferencia ya establecida previamente.

Y por último en la parte derecha 2.1 de la interfaz se muestran las gráficas que permiten ver visualmente

cómo va el proceso del robot dirigiéndose a las coordenadas que el usuario estableció, esto mediante el error, la comparación entre los ángulos reales y deseados, la u de control y la trayectoria.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se desarrolló el diseño y modelado del robot manipulador tipo SCARA RPR, como procedimiento para desarrollar conocimientos, habilidades y destrezas profesionales en relación a la modelación. Se realizaron los modelos cinemáticos y el modelo dinámico para plantear el seguimiento de trayectorias, esto debido a que la cinemática del robot describe la relación entre el movimiento de las articulaciones del robot y el movimiento resultante de los cuerpos rígidos que conforman el robot. El proceso de diseño y modelado de un robot tipo SCARA RPR es crucial para garantizar un rendimiento adecuado y una precisión en sus movimientos. La elección adecuada de materiales, actuadores y componentes mecánicos asegura la estabilidad y la rigidez necesaria para ejecutar las tareas de manera confiable y precisa.

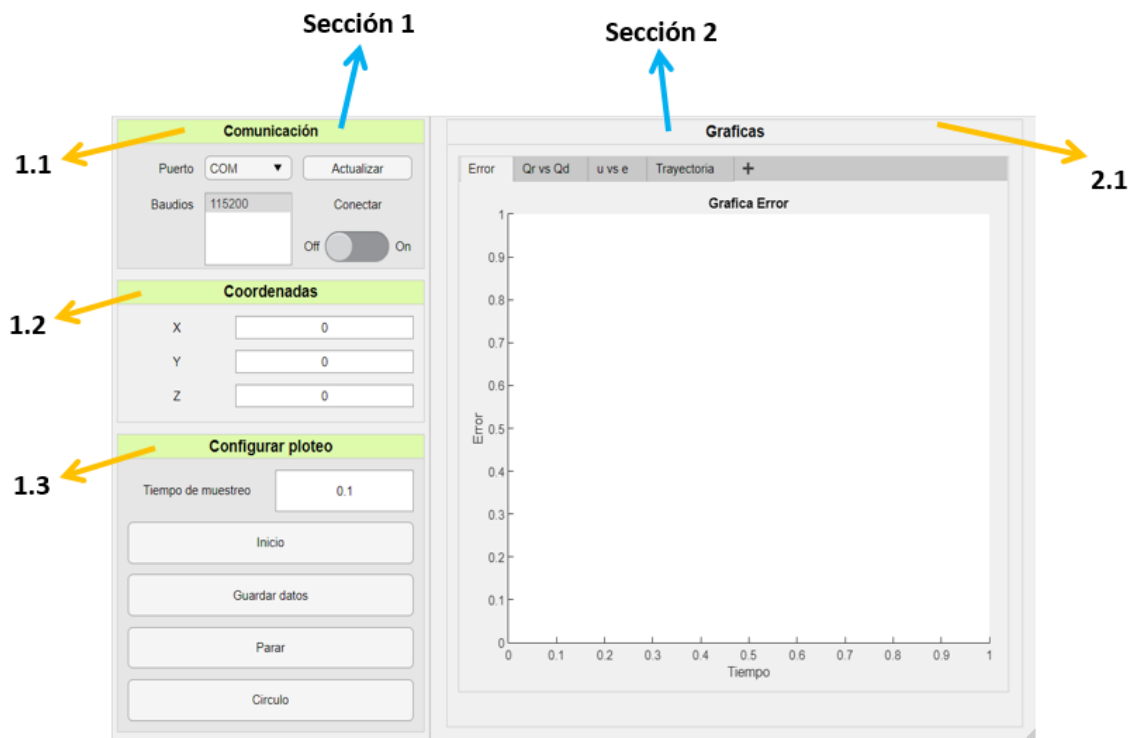


Figura 6: Interfaz de control

REFERENCIAS

1. "Qué es la robótica y cuáles son sus principales usos - Universidad ORT Uruguay". Facultad de Ingeniería - Universidad ORT Uruguay. <https://fi.ort.edu.uy/blog/que-es-la-robotica-y-cuales-son-sus-usos> (accedido el 11 de julio de 2023).
2. "¿Qué es robótica industrial? Concepto y aplicaciones | UNIR México". UNIR México. <https://mexico.unir.net/ingenieria/noticias/que-es-robotica-industrial/> (accedido el 11 de julio de 2023).
3. G. A. Martínez, S. A. Jáquez, J. Rivera y R. Sandoval, "Diseño propio y Construcción de un Brazo Robótico de 5 GDL", RIEE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, vol. 4, n.º 1, pp. 9, 2008. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/documents/v4/art2junio08.pdf>
4. G. D. Bultrago Salazar y O. L. Ramos Sandoval, "SISTEMA TELEDIRIGIDO DE UN BRAZO ROBÓTICO DE 4 GRADOS DE LIBERTAD APLICANDO VISIÓN DE MÁQUINA", Revista EIA, vol. 12, n.º 24, p. 121–219, 2015. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149244222007.pdf>
5. S. Díaz, C. Gutierrez, J. González y J. Meza, "Diseño y simulación de un brazo de robot con músculos artificiales de McKibben utilizando CAD", Revista de Ingeniería Mecánica, vol. 1, n.º 1, p. 1–9, 2017. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: https://www.ecorfan.org/spain/researchjournals/Ingenieria_Mecanica/vol1num1/Revista_de_Ingenieria_Mecanica_V1_N1_1.pdf
6. C. A. Robles Algarín, D. J. Román Ortega y A. M. Polo Llanos, "Brazo robótico con dieciocho grados de libertad tele-operado por un guante electrónico", Revista ESPACIOS, vol. 38, n.º 3, pp. 22, 2017. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n03/a17v38n03p22.pdf>
7. C. Vélez, F. Orosco y M. A. Álvarez, "Control de los movimientos de un brazo robótico desde un computador utilizando software libre de control y comunicación inalámbrica con módulos X-BEE", AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍAS, 2014. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/181/183>
8. P. A. Rey Molina y K. Urrego, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ROBÓTICO EN 3D PARA LA MANIPULACIÓN DE CAJAS EN UNA MATRIZ DE ALMACENAMIENTO", Redes de Ingeniería, vol. 3, n.º 2, p. 32–40, 2012. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/6380/7898>
9. G. Gutiérrez, C. Aguirre, F. Jiménez, D. Moreno y N. Sierra, "Brazo Robótico de 5 Ejes para Uso Didáctico Parte I: Diseño y Fabricación", Revista INGENIO MAGNO, vol. 13, n.º 2, 2022. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2593/2103>
10. J. Noruega, O. García y C. Robles, "Modelado y control de un robot manipulador utilizando las técnicas de control estándar y H infinito", Revista ESPACIOS, vol. 38, n.º 58, pp. 25, 2017. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.revistaespacios.com/a17v38n58/a17v38n58p25.pdf>
11. C. R. Arroyo Flores, "Modelamiento y simulación de un robot SCARA de tres grados de libertad empleando SolidWorks y Matlab/Simulink", Revista ActaNova, vol. 10, n.º 3, 2022. Accedido el 12 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892022000100318&script=sci_arttext
12. J. J. Craig, Robótica, 3a ed. México: PEARSON Educación, 2006.
13. "Brazos Roboticos Industriales ¿Que son y Cómo Funcionan?" Ripipsa Cobots. <https://ripipsacobots.com/brazos-roboticos-industriales/> (accedido el 11 de julio de 2023).
14. "Curso Basico de Blender". ESI Ciudad Real - Escuela Superior de Informática de UCLM. <https://www.esi.uclm.es/www/cglez/fundamentos3D/04.05.FKIK.html> (accedido el 11 de julio de 2023).
15. "¿Qué es el PLA en impresión 3D y para qué se utiliza? | Sicnova". Sicnova. <https://sicnova3d.com/blog/experiencias-3d/que-es-el-pla-en-impresion-3d-y-para-que-se-utiliza/> (accedido el 11 de julio de 2023).
16. P. Abia Morán, "Modelo Dinámico y Simulación de un Robot Manipulador IRB 120", Tesis de Maestría, Universidad de Valladolid, 2020. Accedido el 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42407/TFM-I-1638.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=El%20modelo%20dinámico%20de%20un,fin%20de%20describir%20su%20movimiento.>
17. "Dinámica de Robots", Prácticas de Robótica, pp. 29. Accedido el 13 de julio de 2023. [En línea]. Disponible: <https://nbio.umh.es/files/2012/04/practica3.pdf>.