

Desarrollo De Un Banco De Control Dinámico Para El Manipulador Zebra 360 Del Ambiente Tecnoacademia-Cucuta

Development Of A Dynamic Control Bench For The Zebra 360 Manipulator Of The Tecnoacademia-Cucuta Environment

Ing. Santiago Barragan Leon ¹ * 
Universidad de Pamplona

MSc. Oscar Manuel Duque Suarez² 
SENA, SENNOVA

© 2021 Universidad de Córdoba. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acreditan.

¹ Universidad de Pamplona, Facultad de ingenierías y arquitectura, Programa de ingeniería mecatrónica. Km 1 Vía Bucaramanga Ciudad Universitaria, Pamplona, Norte de Santander, Colombia. E-mail: santiagomecatronica@gmail.com . omduke@hotmail.com

² SENA, SENNOVA, Tecnoacademia Cúcuta, Cúcuta, Regional Norte de Santander, CEDRUM, (57+7) 57 7 578 3286. E-mail: oduques@sena.edu.co

RESUMEN

El control del manipulador se convierte en un problema debido a todos los aspectos que intervienen y afectan el modelo dinámico de este, por lo que este trabajo de investigación muestra el control dinámico en el manipulador (6 DOF), manipulador ZEBRA 360, además, las propiedades esenciales del modelo se analizan con fines de control.

Se describen los modelos matemáticos donde está el modelo cinemático directo e inverso, el cálculo de cada una de sus cinemáticas, todas documentadas en este papel, se implementó luego el manipulador en el banco de control dinámico donde se realiza sus respectivas pruebas, dichas pruebas usadas para escoger la mejor estrategia para los dos controles, el control cinemático y el control dinámico.

PALABRAS CLAVE: Manipulador, Control, Estrategia, Modelo, Control cinemático, Control Dinámico.

ABSTRACT

The manipulator control becomes a problem due to all the aspects that intervene and affect the dynamic model of this, so this research work shows the dynamic control in the manipulator (6 DOF), ZEBRA 360 manipulator, in addition, the essential properties of the model are analyzed for control purposes.

The mathematical models are described where is the direct and inverse kinematic model, the calculation of each of its kinematics, all documented in this paper, the manipulator was then implemented in the dynamic control bench where their respective tests are performed, these tests used to choose the best strategy for the two controls, kinematic control, and dynamic control.

KEYWORDS: Manipulator, Control, Strategy, Model, Kinematic Control, Dynamic Control.

INTRODUCCIÓN

El diseño de un banco de control dinámico para robots requiere la asignación directa de un robot, en este caso de estudio, se empleó el manipulador ZEBRA 360 del ambiente de Tecnoacademia-Cúcuta. (Gil Martínez 2008)

Se realiza esta investigación con fines académicos, donde se podrá aplicar los conocimientos efectuados en otros robots bajo el seguimiento de la misma metodología y clasificación. Se destaca su implicación en el estudio y desarrollo de la línea de control de robots, con lo que se espera crear competencias personales y permitir el desarrollo del interés en el aula sobre esta

rama específica de la robótica.

En este trabajo se encuentra el desarrollo del banco de control dinámico de manera sistemática: Iniciando con la morfología a la cual está sometido el robot, en la siguiente etapa se extraen los parámetros para el desarrollo de las cinemáticas, en este caso la cinemática directa y la cinemática inversa, siguiente se encuentra el desarrollo de las estrategias de control cinemáticos, las cuales son punto a punto y continua, finalmente se estudian las distintas estrategias de control dinámico, las cuales permitirán escoger por medio de una comparativa en su funcionalidad, cuales se adaptan al sistema

del robot ZEBRA 360.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Robot

Como dice Weik, un robot es un dispositivo mecánico que se encarga de realizar tareas específicas de manera automática (mediante programación) o manuales (remotamente).

Lo anterior se complementa con dos características que lo diferencian de otros automatismos.

Multifuncionalidad: Es la capacidad de adaptarse a un entorno que requieren tareas diferentes a las previstas.

Programabilidad: Es la capacidad de aceptar cambios en su programa.

Cabe destacar que cada robot posee en diferentes escalas, autonomía y auto planificación. El primero deriva de que tanto se necesita de un operador para cumplir la tarea. La segunda, de la retroalimentación realizada por los sensores en conjunto con el programa almacenado, para la toma de decisiones.

2. RECOMENDACIONES

2.1. Robot

En la continua búsqueda de alivianamiento del trabajo y tareas cotidianas, el ser humano ha desarrollado herramientas que le facilitan la culminación de trabajos pesados o muy expensivos y laboriosos, sin embargo, las herramientas por sí solas no tenían la habilidad de culminar las misiones asignadas, es por ello que tras la revolución industrial, se inventaron las maquinas, un término primitivo para una herramienta con capacidades de asistencia en el trabajo, pero

tenían que pasar casi doscientos años para que evolucionara desarrollando autonomía, es aquí donde la disciplina de la robótica demostró ser capaz de aislar el operario y capacitar a la máquina para desarrollar milimétricamente los trabajos asignados. A esta invención la conocemos como ROBOT.(Nevárez Toledo 2016).

“A mechanical device which can be programmed to perform some tasks of manipulation or locomotion under automatic control”.

Los usos de los ROBOTS pueden ser infinitos, ya que, al ser máquinas con propósitos específicos, puede crearse un robot hasta para la tarea más pequeña e insignificante. Podrían catalogarse en ciertas categorías distintas, aunque el más común y resaltante a lo largo de los años ha sido el de uso industrial.(Alfonso Díaz and Chaparro Amaya 2014) Este tipo de robot es uno de los que exige los más altos estándares de diseño y calidad, por consiguiente, sus parámetros y programación deben ser cuidadosamente ejecutados.

2.2. Morfología

La morfología en la robótica hace referencia a la todas las características básicas estructurales de un robot incluyendo en este apartado a los robots móviles y a los manipuladores.(RONCALLA and GIL 2015)

2.3. Impresión 3d

Gracias al avance tecnológico, hoy en día se encuentran nuevas herramientas industriales puestas a disposición de los makers o en español “creadores” y estudiantes, entre estas destaca la Impresión 3D. (Odremán R 2014) Este tipo de impresión adiciona el uso del eje “Z”, donde se pueden componer piezas completas en 3 Dimensiones, bajo sus diferentes tipos de impresión, ya sea FDM la cual está basada en

la deposición de material sobre una base móvil o fija; O como la DLP que se basa en resinas fotosensibles capaces de lograr un gran detalle en la pieza a construir. (Chancusi and Navarrete 2014)

2.3.1. Tipos De Material

La elección de material es una de las tareas fundamentales a la hora de componer un diseño o producto, en el caso de la Impresión 3D, se ha convertido en una tarea ardua ya que, aunque no sean muchos, ya existe una considerable variedad de materias primas a utilizar para imprimir, esto sin mencionar, que al ser un mercado nuevo y en auge, cada vez están saliendo al mercado nuevas opciones de materiales de impresión. (César-Juárez et al. 2018) Históricamente, los principales materiales ofertados en esta industria y los que hoy se destacan por sus cualidades en la calidad de impresión por FDM (modelado por deposición fundida), son el PLA (ácido poliláctico) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). (Suardíaz Muro et al. 2020)

2.3.2. TIPOS DE IMPRESIÓN

Impresoras 3D por Estereolitografía (SLA)

La primera técnica en utilizarse es la Estereolitografía o SLA por sus siglas en inglés, esta técnica consiste en un cubo donde se contiene la resina líquida sensible a la luz, a esta se le aplica un haz de luz ultravioleta que capa a capa va solidificando el material, esculpiendo así la morfología deseada. Para mayor control y precisión en los detalles, una base adherente sostiene la estructura y se desplaza en el eje Z permitiendo la continua acción de la luz UV. (Terrés 2018)

Impresión por deposición de material fundido (FDM)

Este tipo de impresión nace por la necesidad del uso de materiales no fotosensibles como lo es el PLA o el ABS. Es

también llamada impresión por FFF (Fused Filament Fabrication). Esta tecnología consiste en una base plana de adherencia donde se depositará el polímero mediante fundición continua expulsado por un extrusor a través de una boquilla de diferente calibre, capa por capa de hilos que se solidifican y adhieren unos con otros se va construyendo la pieza, la materia prima es entregada en estado sólido como filamento almacenado en rollos de polímeros como ABS, PLA, etc. (SOUZA 2016)

2.4. Control Cinemático

El control cinemático es una estrategia de control que consiste en un lazo abierto variador del SetPoint de la trayectoria, esta se es entregada por puntos intermedios que se interpolan, de esta manera es posible obtener la trayectoria deseada del robot (Urquijo Pascual, Izaguirre, and Hernández Santana 2017) Su objetivo principal es establecer las trayectorias a seguir por cada una de las articulaciones que componen el robot a lo largo de un tiempo determinado para conseguir el objetivo final del usuario, esto incluye el tipo de trayectoria del extremo, el punto de destino, la cantidad de tiempo invertido, etc. (Acevedo, Mendoza, Sepúlveda (2020)

2.4.1. Tipos de trayectorias:

Para realizar una tarea determinada, el robot debe moverse por medio de cada articulación desde un punto inicial hasta el punto final. Este movimiento puede ser realizado según infinitas trayectorias espaciales. De todas las existentes se destacan por sus cualidades de sencillez a la hora de implementarlas por parte del control cinemático y por la utilidad brindada en la aplicación de las diferentes tareas, estas son las que incorporan los robots comerciales en la práctica. (INTRIAGO 2019)

2.4.2. Trayectorias punto a punto:

La trayectoria punto a punto es aquella donde cada una de las articulaciones va evolucionando desde un punto inicial a un punto final, esta no considera el estado de evolución de las otras articulaciones. En esta no es de gran importancia el camino del extremo del robot o manipulador, sino que se centra en el alcance del punto final designado. (Álvarez 2019)

2.4.3. Trayectorias coordinadas o isócronas:

Las trayectorias coordinadas o isócronas son aquellas donde le relevan importancia al camino del extremo del robot, y la centra en el movimiento simultaneo de los ejes, consecuencia de esto es la ralentización de las articulaciones que solían ser las más rápidas, pero se logra que todos los ejes culminen al unísono el recorrido. Se destaca en ellas que el tiempo total se iguala al menor tiempo posible, y se evitan las exigencias inútiles de velocidad y aceleración. (TORRES 2002)

2.4.4. Trayectorias continuas

Las trayectorias continuas son aquellas donde se busca que el extremo del robot describa una trayectoria que sea concreta y, sobre todo, conocida (cartesiana). En ésta es de gran importancia el camino, ya que, durante él, el robot realiza parte de su cometido (corte por láser, soldadura por arco, etc.) (ARVIZU 2016)

2.4.5. Cinemática directa:

La cinemática directa de un manipulador es el término que engloba el problema cinemático directo, el cual consiste en determinar cuál es la posición final del robot o manipulador así mismo como la orientación del su extremo final. Se da la solución en función de los valores articulares (traslacional o rotativo de articulaciones) con respecto al sistema de coordenadas tomado como referencia. (Rossomando, Soria, and Carelli 2010)

2.4.6. Cinemática Inversa:

La cinemática inversa de un manipulador hace referencia al problema cinemático

inverso, el cual consiste en hallar los valores requeridos para adoptar las coordenadas articulares del robot, donde su extremo se posiciona y orienta según la localización espacial determinada. (Santiago n.d.)

La cinemática inversa, al contrario del problema cinemático directo, no es sencilla, se dificulta al buscar la resolución de una serie de ecuaciones altamente dependientes de la configuración asignada del robot, a esto se le añade un grado de complejidad al existir más de una ecuación que dé solución al problema (Arias and Fonseca 2012).

2.5. Control Dinámico

El control dinámico en el marco de la ingeniería robótica hace referencia al modelo dinámico que tiene el robot, su objetivo es conocer qué relación existe entre el movimiento del robot y las fuerzas que son aplicadas a este. Se caracteriza por relacionar matemáticamente múltiples factores, entre estos están la localización del robot, tanto en coordenadas articulares como cartesianas, lo relaciona con las fuerzas y pares que hayan sido aplicados en las articulaciones, así mismo lo hace con los parámetros dimensionales del robot (aquí entra la longitud, las masas y las inercias entre otros) (Suárez, Ayala, and Suárez. 2016)

2.5.1. Control Mono-articular:

El control mono articular hace referencia al control dinámico mono articular, en él se desprecia el acoplamiento entre los grados de libertad del robot y el control multiarticular.

Es importante resaltar las características mecánicas del robot, las cuales son peso, dimensiones, tipo de actuadores, entre otras, ya que estas influirán directamente con el tipo de control a utilizar. Es necesario tener en cuenta estas recomendaciones: Primero considerar cada articulación de forma independiente, que no sea realista del todo, pero si aceptable (considerando la pérdida de

prestaciones), pues la mayoría de los robots comerciales lo usan, y finalmente hacerla más aceptable en robots con un alto factor de reducción. (Jiménez Roboayo 2013)

2.5.2. Control Multi-articular:

El control multiarticular se define por considerar al robot como un sistema multivariable. En él, la suposición de que el par P T hace referencia a la influencia del resto de las articulaciones sobre el control de una sola articulación, y no sería válida pues los accionamientos sin reductor ni velocidades elevadas, entonces se debería considerar el sistema como multivariable y acoplado, lo cual eleva la complejidad del estudio (Grado 2019)

3. Diseño De Banco En Forma De Célula De Trabajo Robotizado Para Control Cinematico De Las Trayectorias Y Selección De Software Y Hardware Para La Implementacion De Cinematicas.

En este capítulo, se plantean las bases y delimitaciones para el diseño del banco de control dinámico y la metodología de trabajo.

Así pues, en primera instancia, se define el espacio de trabajo que determinara los alcances de movimiento del robot ZEBRA360 tanto articulares como cartesiano, posteriormente la selección de materiales y métodos a utilizar para su desarrollo, así como el software y hardware a usar.

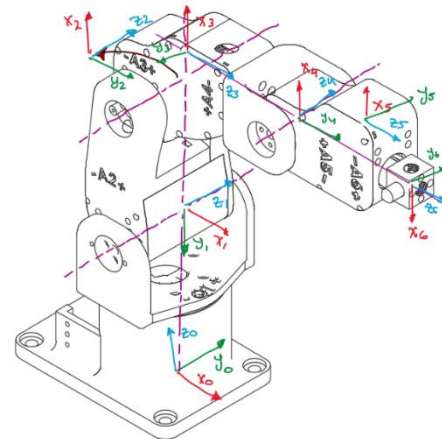
En segundo lugar, se desarrollarán teóricamente los modelos matemáticos necesarios para el control, esto comprende el modelo cinemático directo e inverso.

Se acopló esta metodología, ya que al incluir un conjunto de elementos comprendidos por, un robot (ZEBRA 360), Mesa, Zona de poder, Zona de Control, esto permite que trabaje simbióticamente en pro del control dinámico.

3.1. Implementación del manipulador Zebra 360 y sus modelos desarrollados

3.1.1. Cinemática Directa

En primera instancia, previo a la implementación, se muestra la morfología escogida para el robot, esta fue diseñada teniendo en mente que cumpliera con el parámetro principal, que fuera una morfología de 6 DOF como se muestra a continuación ejemplificado como isometría del manipulador.



Esta morfología escogida facilita su solución gracias al estudio, aun así, se realizó nuevamente sus cinemáticas (Directa e Inversa).

Para la realización de las cinemáticas en especial la cinemática directa se usó el algoritmo Denavit Hartenverg, arrojando como respuesta la matriz Denavit usada luego para hallar los cálculos de las posiciones:

Tabla 1 : Parámetros D-H

	THETA	D	A	ALPHA
1	Q1	122 mm	0	(-PI/2)

2	Q2 +PI/2	0	100 mm	0
3	Q3	0	40 mm	(-PI/2)
4	Q4	120 mm	0	(+PI/2)
5	Q5	0	0	(-PI/2)
6	Q6+PI/2	109,5 mm	0	0

Teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se calcularon las matrices de transformación homogénea para los sistemas de coordenadas.

Luego pasa por un código que me arroja las matrices

Homogéneas de cada una de las articulaciones:

$$\begin{aligned}
 A_{01} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A_{04} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 + b_1 + c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 A_{02} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 + b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A_{05} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 + b_1 + c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 A_{03} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 + b_1 + c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} & A_{06} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & d_1 + e_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a_1 + b_1 + c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

4. IMPLEMENTACIÓN DEL MANIPULADOR EN EL BANCO DE CONTROL Y SUS MODELOS MATEMÁTICOS

4.1. Análisis de Riesgo y seguridad (HAZOP)

La técnica denominada HAZOP como se indica en las siglas en inglés (Hazard and Operability) la cual fue desarrollada por la empresa Imperial Chemical Industries en 1974, y definida como: “Técnica sistemática de análisis de riesgos, que se centra en un proceso, identificando de forma cualitativa, peligros, fallos y problemas de operabilidad, evaluando las consecuencias de cada

escenario analizado”

Tabla 2 : HAZOP

NODO	DESVIACION
Sistema de comunicación	No hay transmisión de datos
Cable de alimentación eléctrica	No hay suministro de energía
Espacio Articular	Influencia externa en el espacio de trabajo definido
Sistema de control	Motores no realizar el control correctamente



El robot fue impreso en su totalidad en 3D usando un tipo de plástico bio-degradable que me genera una mayor ligereza y rigidez al momento de cualquier intervención. (Fernández, Mesa & Pérez, 2020).

4.2. Cinemática Directa Implementada

Inicialmente, se toma como referencia para poder implementar la Cinemática Directa, el robot en su forma inicial donde sus ángulos son los mostrados en la ecuación.

$$q = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Estos, arrojan los siguientes parámetros DH mostrados en la ecuación 6, basado en la ecuación anteriormente mostrada.

PARAMETROS_DH = 6x4				
0	122.0000	0	-1.5708	
-1.5708	0	100.0000	0	
0	0	40.0000	-1.5708	
0	120.0000	0	1.5708	
0	0	0	-1.5708	
3.1416	109.5000	0	0	

Posteriormente, se envían estos datos a la función Denavit, enviando las ecuaciones por articulación, donde estas se multiplicarán dando como resultado las siguientes MTH (Matriz de transformación Homogénea) mostradas en la ecuación.

$$A_{01} = 4 \times 4$$

1.0000	0	0	0
0	0.0000	1.0000	0
0	-1.0000	0.0000	122.0000
0	0	0	1.0000

$$A_{02} = 4 \times 4$$

0.0000	1.0000	0	0.0000
-0.0000	0.0000	1.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	0.0000	222.0000
0	0	0	1.0000

$$A_{03} = 4 \times 4$$

0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
-0.0000	-1.0000	0.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	262.0000
0	0	0	1.0000

$$A_{04} = 4 \times 4$$

0.0000	1.0000	0	120.0000
-0.0000	0	1.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	0.0000	262.0000
0	0	0	1.0000

$$A_{05} = 4 \times 4$$

0.0000	0.0000	1.0000	120.0000
-0.0000	-1.0000	0.0000	-0.0000
1.0000	-0.0000	-0.0000	262.0000
0	0	0	1.0000

$$A_{06} = 4 \times 4$$

-0.0000	-0.0000	1.0000	229.5000
-0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
-1.0000	-0.0000	-0.0000	262.0000
0	0	0	1.0000

De la última ecuación, se encuentran las medidas que logran evaluar y corroborar el correcto funcionamiento e implementación de la cinemática directa mostrado en la ecuación.

$$\begin{aligned} x &= 229.5 \text{ mm} \\ y &= 0 \text{ mm} \\ z &= 262 \text{ mm} \end{aligned}$$

Se puede observar, a través de la figura, la validación en el robot. Esta muestra al robot en su posición inicial



Luego se muestra la validación de las medidas arrojadas por la cinemática:



Eje Z



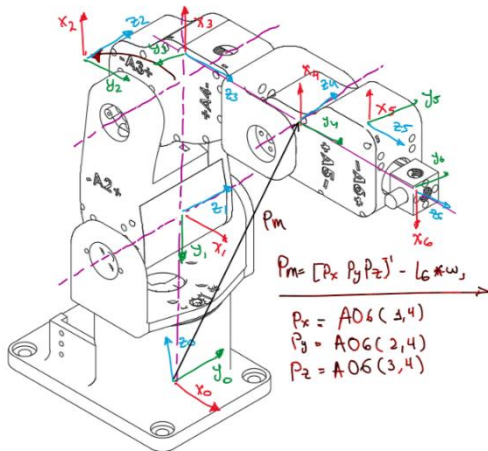
Eje X e Y

Al enviar el robot a su posición inicial se observa como cumple con las medidas esperadas, en este caso las medidas en X e Y,

que son 229 mm y 0 mm respectivamente

4.3. Cinemática Inversa implementada

En primera instancia, se comienza por una estrategia usada para la mayoría de los manipuladores de 6 GDL, llamada punto de muñeca



Retornando para una entrada de posición, una respuesta de 8 posibles soluciones donde cada una de estas evaluada en la inversa retorna la posición correcta, solo queda realizar un código que escoja la que mejor se adapte al requerimiento.

Proceso de validación:

$$q = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Luego de pasar por el código este arroja una matriz de 8 soluciones posibles, ya es deber del código escoger cual se adapta mejor al resultado

0	0	0	0	3,141	3,141	3,141	3,141
				6	6	6	6
0	0	1,417	1,417	1,417	1,417		
		3	3	3	3	0	0
0	0	3,785	3,785	0	0	3,785	3,785
		1	1			1	1
		-	-			-	-
0	6	3,141	3,141	0	0	3,141	3,141
		6	6			6	6
0	0	-	1,080	-	1,724	-	0,643
		1,080	8	1,724	3	0,643	5

		8		3		5	
0	3,141	3,141	0	3,141	0	3,141	0
	6	6		6		6	

5. Diseño de estrategia de control cinemático para la generación de trayectorias.

Para el diseño de las estrategias de control se analizó el espacio de trabajo del robot, contando con esto se procedió a calcular dos puntos donde se iban a mover estas trayectorias, se explica posteriormente la creación de cada una de las trayectorias y como es la obtención de los ángulos y el envío de estos datos a los actuadores, en este caso unos Servomotores Inteligentes XYZSmartServo A1-16

5.1. Trayectoria Punto a Punto

Este tipo de trayectorias se mueven o transportan cada articulación desde una posición inicial hasta una posición final, donde nunca se tiene consideración el estado de las demás articulaciones. Cada uno de los motores XYZ tratan de llegar al punto de destino en el menor tiempo posible, es aquí donde se distinguen dos casos puntuales: Eje a eje o simultaneo, donde en los ejes simultáneos se pueden notar, también dos tipos, donde se mueven de manera independiente o coordinada. (Martínez, Hernández & Cárdenas 2021).

$$P1 = [105,260,220]$$

$$Q = \{45 \ 38 \ 95 \ 25 \ 69 \ 42\}$$



$$P2 = [253, -70, 110]$$

$$Q = \{-18 \ 39 \ -35 \ 9 \ 46 \ 6.2\}$$



Estrategia de control de trayectoria Eje a Eje

Para la validación de la siguiente estrategia, se toman los dos puntos establecidos anteriormente y se ingresa al programa donde junto con sus otros parámetros iniciales serán procesados y arrojará como resultado graficas de los ángulos a recorrer por cada una.

Se establecen posteriormente los parámetros iniciales donde está el tiempo inicial y el número de puntos para la interpolación entre ellos, las posiciones de cada uno serán ingresadas en el programa escogido que calcula la cinemática inversa, es aquí donde se obtienen valores articulares para poder empezar el proceso de interpolación, para ello se usó el interpolador Trapezoidal. Los actuadores (motores) están dotados de estructuras de control PID para el cumplimiento de las posiciones articulares, para ello se estudió la configuración PID de trabajos como el de Alvarado y Numpaque, 2014.

Estrategia de control de trayectoria Eje simultaneo

Para la validación de esta estrategia se tienen los parámetros de entrada que son:

Tiempo inicial, posible tiempo final (esto es establecido en los parámetros de diseño del banco, no es un parámetro necesario), los puntos en los cuales será interpolada la trayectoria, y parámetros de localización. (Rodríguez, Cortés & Peña 2021).

Estrategia de control de trayectoria Isócrona

En este tipo de trayectoria, la cuestión será solo enviar los datos y hacer que los robots se muevan de manera simultánea, es importante aclarar que deberían de moverse libremente, sin tener que forzar su velocidad por esperar la articulación más lenta, igual que las anteriores estrategias donde se tiene un interpolador trapezoidal, los parámetros de entrada son los mismos

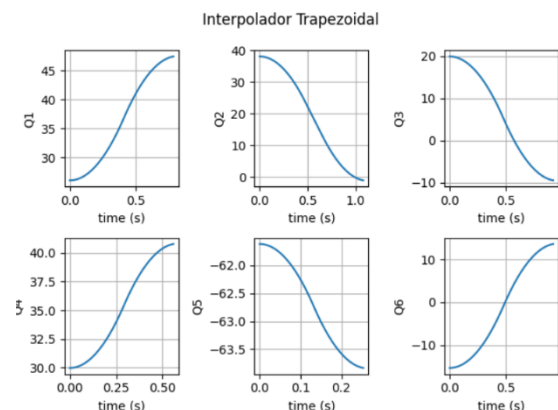
Luego de esto se ingresan los datos al software para hallar cada una de las trayectorias.

```
# Parametros de localizacion
# ANGULOS 0 0 0 0 0 0
MTH1 = [[0, 0, 1, 253],
         [0, 1, 0, 70],
         [-1, 0, 0, 120],
         [0, 0, 0, 1]]
MTH1 = np.array(MTH1)

# ANGULOS 40 13 -36 45 -50 10
MTH2 = [[0.262546777, -0.722739657, 0.63930945, 143.579264],
         [0.964909975, 0.199557175, -0.170662454, 61.0803375],
         [-0.00423426, 0.661682947, 0.749771798, 366.125767],
         [0, 0, 0, 1]]
MTH2 = np.array(MTH2)

Angulos1 = inv(MTH1)
Angulos2 = inv(MTH2)
```

Y obtengo lo siguiente



Unos valores articulares para que cada uno de los motores puedan ejecutarse bien sea el caso de manejo de los ángulos según la trayectoria.

5.2. Estrategia de control de trayectoria Continua

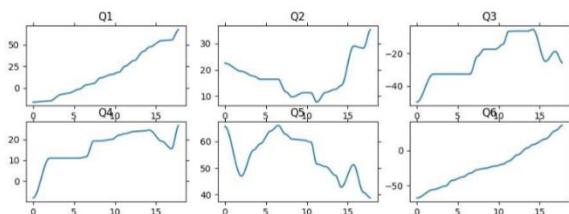
Para esta trayectoria que es quizás una de las más complejas al momento de trabajarse, se tienen los parámetros de entrada los dos puntos en el espacio articular donde el robot ejecutó dicha trayectoria, se creó una línea recta entre esos dos puntos la cual luego fue interpolada para poder tener la mayor cantidad de puntos sobre ella, para que el robot la siguiera en su totalidad con la mayor precisión

```
# Parametros de localizacion
# ANGULOS 0 0 0 0 0
MTH1 = [[0, 0, 1, 253],
        [0, 1, 0, 70],
        [-1, 0, 0, 120],
        [0, 0, 0, 1]]
MTH1 = np.array(MTH1)

# ANGULOS 40 13 -36 45 -50 10
MTH2 = [[0.262546777, -0.722739657, 0.63930945, 143.579264],
        [0.964909975, 0.199557175, -0.170662454, 61.0803375],
        [-0.00423426, 0.661682947, 0.749771798, 366.125767],
        [0, 0, 0, 1]]
MTH2 = np.array(MTH2)

Angulos1 = inv(MTH1)
Angulos2 = inv(MTH2)
```

Luego de pasados los datos se pudo observar los valores articulares dado por el algoritmo.



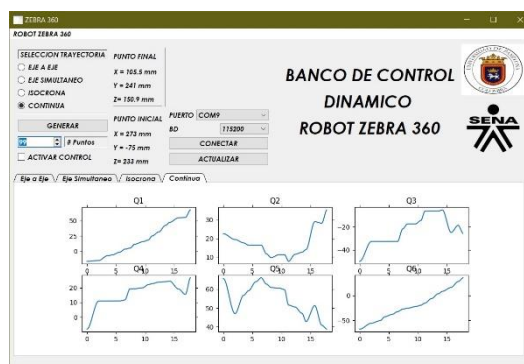
5.3. Interfaz gráfica del robot 360 y sus trayectorias

Fue desarrollada en PyQt5 con el fin que tuviera todo de manera accesible para su manejo, donde se muestran cada una de las trayectorias a desarrollar y los planos articulares, los cuales fueron calculados con las estrategias halladas anteriormente.

(Bayona & Ricon.2020)

Contiene una parte donde está la conexión con la placa controladora permitiendo así conectar con cualquier placa de desarrollo, y también poder seleccionar la velocidad de conexión. (Ospina, Toro & Gallego, 2020)

Tiene también un apartado diseñado con interfaz de pestañas donde se observan las gráficas de las salidas articulares de cada una de las articulaciones



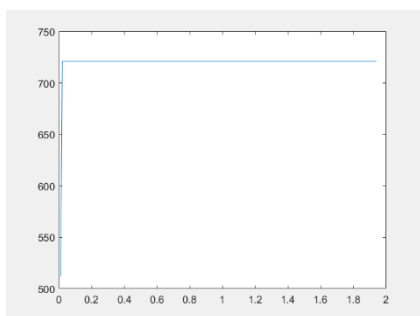
6. SINTONIZACION CONTROLADOR PARA EL CONTROL DINAMICO

6.1. Cálculo de función a lazo cerrado y abierto

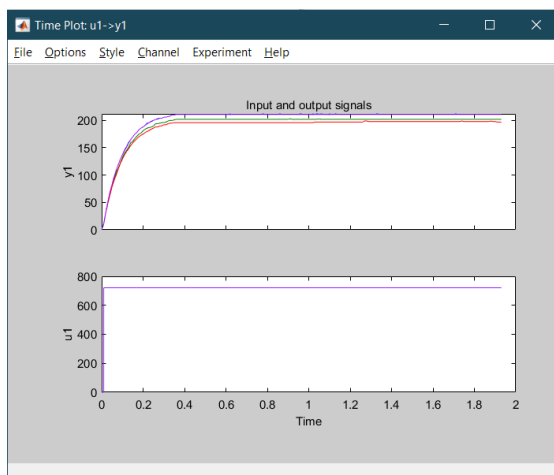
De los motores XYZ Smart Servo, se pueden extraer los coeficientes internos del motor los cuales ayudan a controlar el robot.

Se procede entonces a aplicar un escalón sobre cada uno de los motores y se obtiene la siguiente curva, mostrado en las siguientes figuras.

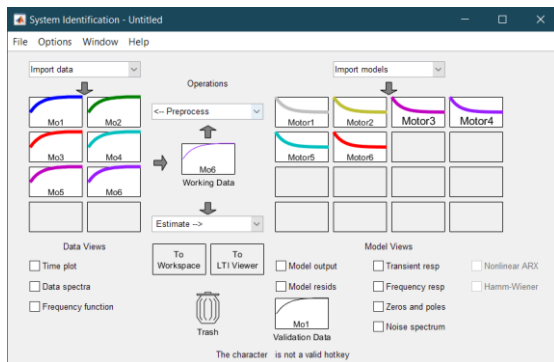
ENTRADA ESCALON



Obtengo como salida



Luego de obtener esas gráficas, se usó la Toolbox System Identificación, para obtener funciones que me describieran la planta



6.2. Controlador Ziegler & Nichole 2do método

Valores Dentro del motor
Envié de grado 90 a 25

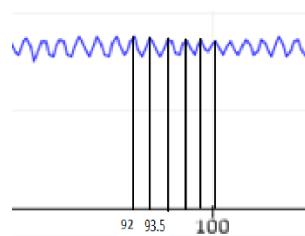
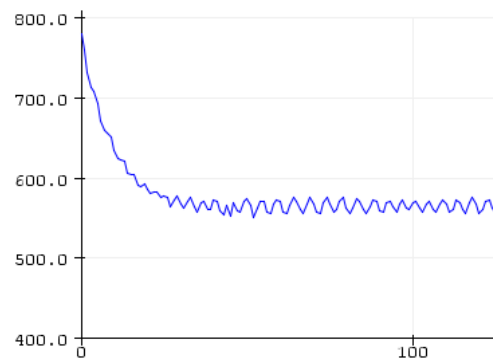
PRUEBA 1 PARA SINTONIZAR MOTOR :

Se realiza el cambio de las constantes en el motor, en

este caso se ponen K_d y K_i como 0 y K_p se varia levemente hasta que se den oscilaciones contantes:

$$\begin{aligned} K_p &= 30000 \\ K_d &= 0 \\ K_i &= 0 \end{aligned}$$

```
uint16_t Kp = 30000;
uint16_t Kd = 0;
uint16_t Ki = 0;
```



$$\begin{aligned} K_u &= 30.000 \\ P_u &= 1.5 \end{aligned}$$

Control P

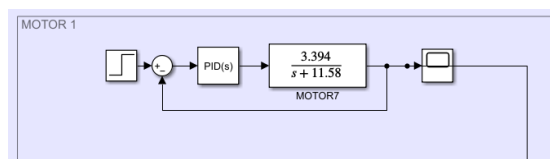
$$K_p = 0.5 * 30.000 = 15000$$

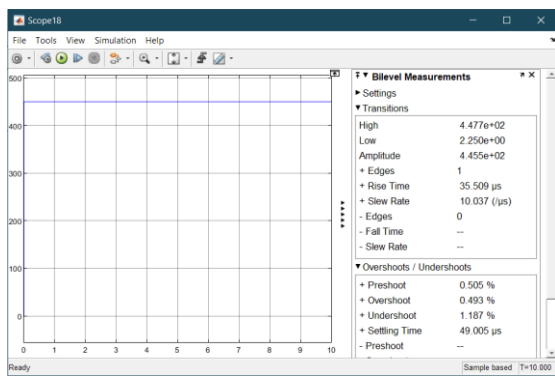
Control PI

$$\begin{aligned} K_p &= 0.45 * 30.000 = 13500 \\ \tau_i &= \frac{1.9}{1.2} * 1.5 = 2,375 \end{aligned}$$

Control PID

$$\begin{aligned} K_p &= 0.6 * 30.000 = 18000 \\ \tau_i &= 0.5 * P_u = 0.75 \\ \tau_d &= 0.125 * P_u = 0.1875 \end{aligned}$$

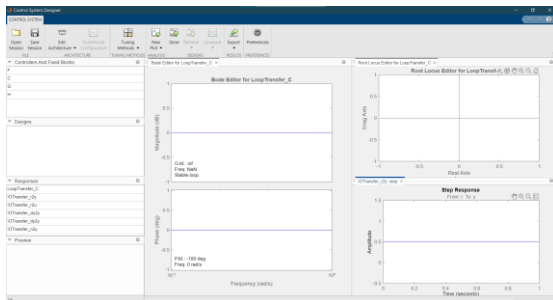




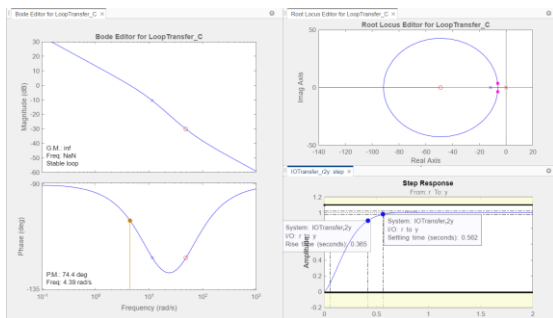
6.3 Sintonización de controlador usando la Toolbox SISOTOOL

FmM1	1x1 tf
FmM2	1x1 tf
FmM3	1x1 tf
FmM4	1x1 tf
FmM5	1x1 tf
FmM6	1x1 tf

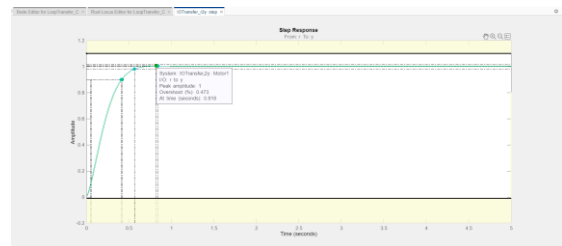
Ingreso por medio del Works pace las funciones de transferencia de cada una de mis plantas (Motores)



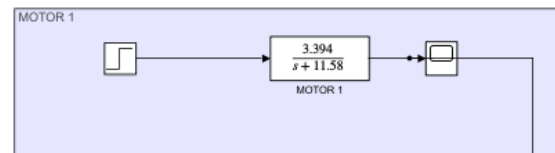
Toolbox SisoTool



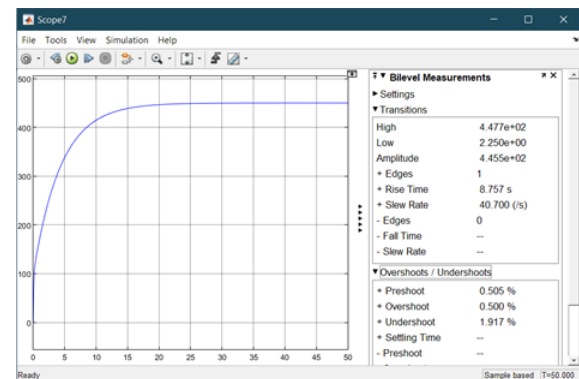
Esta Toolbox me arroja una función de transferencia en el controlador para luego integrarla al sistema.



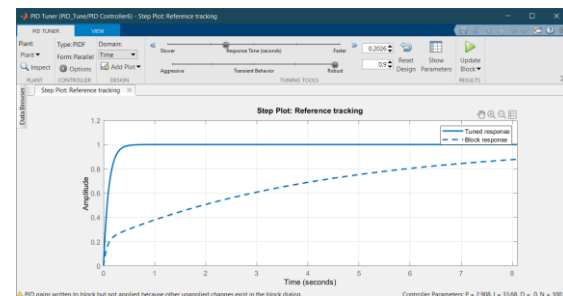
6.3. Sintonización de controlador por el método de tune Matlab



A continuación, se observa la salida de cada uno de los motores ante un escalón de 450 para luego aplicar el tune y mejorar la salida



Luego de aplicar el tune se obtiene que el software arroja unas constantes para cada uno de los motores



$$K_p = 2.90846817$$

$$K_i = 33.68007$$

Donde se observa que la línea punteada es la respuesta antes del tune y la línea sólida es

la respuesta luego del tune.

6.4. Sintonización controladora por medio de síntesis de controlador

Para el cálculo del controlador se usa este método que permite arrojar valores de acuerdo con el comportamiento que se requiera del sistema.

Para el motor #1 se realizó el cálculo del controlador arrojando un controlador tipo PI como se puede observar a continuación.

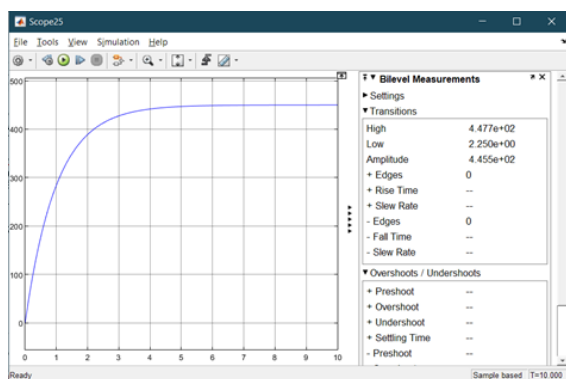
$$C(s) = \frac{s + 11.58}{3.394} * \frac{1}{s}$$

$$C(s) = \frac{1}{3.94 * s} + \frac{3.394 * s}{3.394 * s}$$

$$C(s) = \frac{1}{3.394} + \frac{11.58}{3.394} * s$$

$$Kp = \frac{3.394}{11.58}$$

$$Ki = \frac{11.58}{3.394}$$



Dando como resultado un controlador tipo PI.

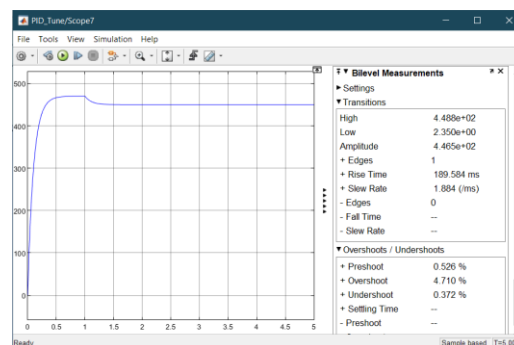
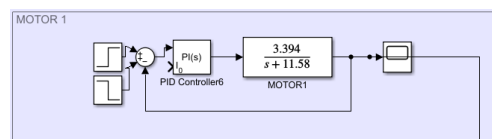
7. VALIDACION CONTROL DINAMICO CON EL METODO SELECCIONADO (RESULTADOS)

Para realizar la validación del método se usaron 3 pruebas, la primera aplicando perturbaciones al controlador seleccionado para observar la respuesta del sistema, la segunda se realizó directamente en el robot, realizando una oposición al movimiento y

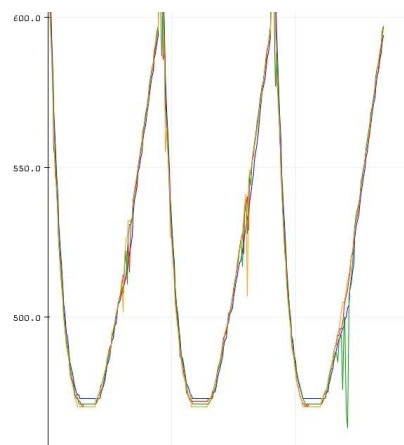
observando como este regresa a cumplir la trayectoria prevista.

7.1 Validación del sistema aplicando perturbación, usando Simulink Matlab

Se aplico un escalón en el tiempo de 1 segundo y este fue el comportamiento del controlador y su salida

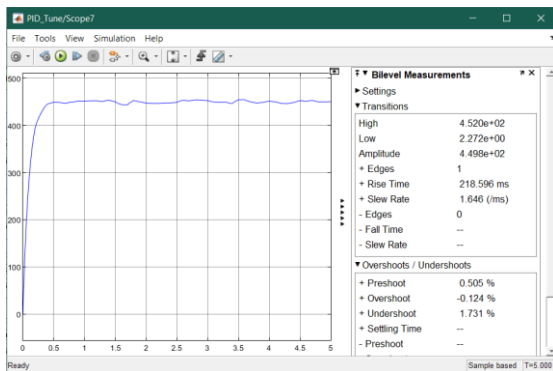


Se pudo observar en la grafica anterior como el controlador ayuda de manera eficiente, regresando nuevamente al SetPoint deseado.



Grafica real de los motores ante perturbaciones con el control activado, se pudo observar como regresa a la trayectoria.

Ahora se prueba contra el ruido generado por distintos factores en una escala de 2 y observo como se comporta la gráfica.



8. CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño del banco de control dinámico en forma de célula de trabajo robotizada con todos sus modelos matemáticos necesarios, concluyendo que el brazo robótico puede realizar todos sus movimientos dentro del espacio de trabajo articular respetando las medidas propuestas en el diseño inicial.

- Los modelos implementados en el manipulador demostraron ser factibles a la hora de realizar el cálculo de cada uno de los puntos definidos para su validación.

- Al diseñar la estrategia de control cinemático para la generación de trayectorias, se concluyó que el uso de los motores inteligentes contribuyó para poder cumplir a cabalidad cada uno de los puntos que el programa de generación de trayectorias retornaba.

- Luego de realizar la validación del control dinámico, se observó que un sistema PI es suficiente para lograr un control de trayectoria sobre los motores, siendo de mucha ayuda al momento de la respuesta a cualquier cambio de los motores.

REFERENCIAS

- [1]. Alfonso Díaz, Iván Darío, and Leonardo Andrés Chaparro Amaya. 2014. "Desarrollo de Una Plataforma Robótica Multipropósito A.G.V.F. (Automatic Guide Vehicle Forklift)." ALONSO, Antonio. El buen rumbo de los vehículos guiados, En: siglo XXI, España, 2008.
- [2]. Álvarez, Santiago. 2019. "NAVEGACIÓN AUTÓNOMA DE UN ROBOT MÓVIL OMNIDIRECCIONAL EN TRAYECTORIAS PREDETERMINADAS CON EVITACIÓN DE OBSTÁCULOS." : 215.
- [3]. ALVARADO JD, NUMPAQUE H. Control PID de temperatura y dosificación de ph para la producción de gas metano a partir de la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. 2014. Revista Tecnologías de Avanzada - Uipamplona - Journal Vol. 2, Núm. 24 (2014)
- [4]. Arias, José Luis Ramírez, and Astrid Rubiano Fonseca. 2012. "Modelamiento Matemático de La Cinemática Directa e Inversa de Un Robot Manipulador de Tres Grados de Libertad." Ingeniería solidaria 8(15): 46–52. <https://revistas.ucc.edu.co/index.php/in/artic/e/view/47/48>.
- [5]. ARVIZU, POR CARLOS VARGAS. 2016. "ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DE ROBOTS MÓVILES Y CONTROL DE TRAYECTORIAS."
- [6]. Bayona Ibáñez, E. ., & Ricon Parada, I. K. . (2020). Hábitos de estudio y rendimiento académico en los estudiantes de ingeniería mecánica. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 1(29), 64-69. <https://doi.org/10.24054/16927257.v29.n29.2017.191>

- [7]. César-Juárez, Ángel Adrián et al. 2018. "Uso y Aplicación de La Tecnología de Impresión y Bioimpresión 3D En Medicina." *Revista de la Facultad de Medicina (México)* 61(6): 43–51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0026-17422018000600043&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [8]. Chancusi, S, and P Navarrete. 2014. "Diseño Y Construcción de Una Impresora 3D Auto-Replicable Controlada Inalámbricamente Para El Prototipado de Piezas Plásticas, Mediante Software Libre." *Departamento deficiencias de la Energía y Mecánica. Ingeniería Mecatrónica*.
- [9]. Fernández Samacá, L. ., Mesa Mesa, L. A. ., & Pérez Holguín, W. J. . (2020). Investigación formativa para estudiantes de ingeniería utilizando robótica. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(28), 30-38. <https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.203>
- [10]. Gil Martínez, M. 2008. Síntesis de Controladores Robustos Mediante El Análisis de La Compatibilidad de Especificaciones e Incertidumbre.
- [11]. Grado, Trabajo Fin De. 2019. "Control Dinámico Multiarticular Con Optimización Aplicado Al Robot TIAGo."
- [12]. INTRIAGO, CARLOS JAVIER BRAVO. 2019. Universidad Ute ANÁLISIS DE ALGORITMOS DE PLANIFICACIÓN DE TRAYECTORIAS PARA NAVEGACIÓN DE ROBOTS MÓVILES.
- [13]. Jiménez Roboayo, César Eduardo. 2013. "Diseño Y Construcción De Un Robot Tipo Scara Con Sistema De Visión De Máquina, Que Pueda Ser Utilizado Como Herramienta Didáctica En Asignaturas De Robótica Y Control." *Facultad de Ingeniería. Universidad Militar Nueva Granada* 53(9): 1689–99. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/6684/JimenezRobayoCesarEduardo2009.pdf?sequence=2&isAllowed=y>.
- [14]. M. Solarte, G. A. Ramírez and D. A. Jaramillo, "Hábitos de ingreso y resultados en las evaluaciones en cursos en línea masivos con reconocimiento académico," *Ing. E Innov.*, vol.5, 1, 2017.
- [15]. Martínez, F. ., Hernandez , D., & Cárdenas Herrera, P. F. . (2021). Máquina clasificadora de flores: diseño y construcción. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(27), 40-45. <https://doi.org/10.24054/16927257.v27.n27.2016.309>
- [16]. Nevárez Toledo, Manuel. 2016. "La Robótica Educativa Como Herramienta de Aprendizaje Colaborativo En Estudiantes de Educación General Básica Superior." : 92. <https://repositorio.pucese.edu.ec/handle/123456789/625>.
- [17]. Odremán R, José. 2014. "Impresión 3D En La Industria: Un Acercamiento a La Tecnología y Su Influencia En La Industria Petrolera." *Universidad, Ciencia y Tecnología* 18(73): 166.
- [18]. Ospina Toro, D. ., Toro Ocampo, E. M. ., & Gallego Rendón, R. A. . (2020). Solución del MDVRP usando el algoritmo de búsqueda local iterada. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(31), 120-127. <https://doi.org/10.24054/16927257.v31.n31.2018.139>
- [19]. Rodríguez Gasca, E. A., Cortés Torres, E. de J. ., & Peña Cortés, C. A. (2021). Aplicación de la metodología QFD en el desarrollo de una impresora 3D. *Revista Colombiana de*

- Tecnologías de Avanzada, 2(28), 47-54.
<https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.289>
- [20]. Roncalla, Victor Raul Quispe, and Ricardo German Escobedo Gil. 2000. "Desarrollo e implementación de un módulo de entrenamiento de brazo robótico de cinco grados de libertad monitorizado mediante redes zigbee." : 2006–11.
- [21]. Rossomando, Francisco G., Carlos Soria, and Ricardo Carelli. 2010. "Control de Robots Móviles Con Incertidumbres Dinámicas Usando Redes de Base Radial." RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial 7(4): 28–35.
- [22]. Salas, D. (2016). Revolución 4.0. RIINN: Revista Ingeniería e Innovación, 4(2). Recuperado de <http://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/rii/article/view/1174/1452>.
- [23]. Santiago, Alejandra Sánchez Flores. "Cálculo de Fa Cinematica Inversa y El Espacio de Trabajo de Un Manipulador Paralelo de 6 GOL."
- [24]. SOUZA, DRIELE ROSA DE. 2016. "La Impresión 3D Y Su Aplicación En Los Servicios Médicos (Prótesis, Fármacos, Órganos)." IOSR Journal of Economics and Finance 3(1): 56. [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf%0Ahttp://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%2C_society_and_inequalities%28%29.pdf%0Ahttps://www](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf%0Ahttp://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%2C_society_and_inequalities%28%29.pdf%0Ahttps://www.quora.com/What-is-the)
- .quora.com/What-is-the.
- [25]. Suardíaz Muro, Juan, Mario Pérez Gomáriz, Andrés Cabrera Lozoya, and René Ove Do Carmo Trolle. 2020. "Combinando Impresión 3D y Electrónica Como Estrategia Para Mejorar La Experiencia de Aprendizaje." RIED. Revista Iberoamericana de Educación a Distancia 24(1): 115.
- [26]. Suárez, Ing. María Carolina Duque, Ing. Diana Marcela Rodríguez Rodríguez. Esp. Sergio Iván Quintero Ayala, and MSc. Oscar Manuel Duque Suárez. 2016. "PROPUESTA DE UNA METODOLÓGICA FORMAL PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL CINEMÁTICO Y DINÁMICO EN MANIPULADORES INDUSTRIALES SERIALES PROPOSAL." : 1–6.
- [27]. Terrés, María Cristina. 2018. "La Impresora 3D Innovadora Herramienta Frente Al Cáncer." : 21. <http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/MARIA CRISTINA TERRES SANCHEZ.pdf>.
- [28]. TORRES, ALEJANDRO B. IRRIB. 2002. "SISTEMA DE PLANEACIÓN DE TRAYECTORIAS DE MÍNIMO TIEMPO PARA ROBOTS BAJO EL CRITERIO DE FAULT TOLERANCE TESIS."
- [29]. Urquijo Pascual, Orlando, Eduardo Izaguirre, and Luís Hernández Santana. 2017. "Control de Trayectoria En El Espacio Cartesiano de Robot Paralelo de 2GDL Usando Modelo Cinemático Vectorial." Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones 38(2): 72–82.
- [30].