

Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL

Design and construction of a 6 DOF robotic arm

Diego N. Cuesta C.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
dncuestac@correo.udistrital.edu.co

Jeison R. Huerfano G.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jrhuerfanog@correo.udistrital.edu.co

Este artículo propone el diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL (6 DOF). El perfil de diseño (tamaño, capacidad de movimiento y tipo de interacción) sigue la línea de otros prototipos robóticos del grupo de investigación, en particular la mano robótica y sensores ópticos. La intención de este prototipo es que sirva como banco de prácticas para comprobar el desempeño de esquemas de control. El prototipo se diseñó mediante software asistido por computador CAD, y para su construcción se usó una impresora 3D. Las pruebas de desempeño fueron orientadas a establecer sus límites funcionales.

Palabras clave: Actuadores, brazo robótico, CAD, control, GLD, modelado, planta robusta, prototipo

This paper proposes the design and construction of a 6 DOF robotic arm. Profile design (size, range of motion and interaction type) follows the line of other robotic prototypes of the research group, including robotic hand and optical sensors. The spirit of this prototype is to serve as test bank to check the performance of control schemes. The prototype was designed using CAD computer-aided software, and to build a 3D printer was used. Performance tests were designed to establish its functional limits.

Keywords: Actuators, CAD, control, DOF, modeling, prototype, robotic arm, robust plant

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Mayo 2, 2016

Fecha aceptación del manuscrito: Junio 6, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/756>

Cómo citar: Cuesta, D. y Huerfano, J. (2016). *Diseño y construcción de un brazo robótico de 6 GDL*. Revista Tekhné, 13(1), 73-82.

Introducción

En el diseño y construcción de brazos robóticos se cuenta con un gran número de modelos que se pueden clasificar en función de su aplicación. Esta se toma como punto de partida para su diseño y construcción. Otros elementos importantes de diseño es el control, modelado y simulación.

En el estudio de control se representa el sistema que se requiere modelar, por medio de bloques nombrados como: planta, control y sensorica, para facilidad del proceso, de tal modo estos elementos se conciben como la representación de un sistema, mas no se tiene certeza de la planta, en cierta medida esta es abstracta. Como por ejemplo, el uso dado en proyectos de control realizados a partir de brazos comerciales en los que se compra un modelo predefinido, como el Velleman KSR10, y en este se desarrolla el diseño de control. No obstante en este caso, se omite el proceso del diseño y construcción de una planta, siendo esta adaptada y no planificada, y que no ofrece una estructura que garantice el correcto posicionamiento y sujeción de los actuadores de forma óptima.

Esta investigación se ha de desarrollado en tres etapas. En la primera etapa se ha definido la forma que tendrá el prototipo, pues esta condiciona las prestaciones y el campo de aplicación. Además, el mecanismo está restringido por aspectos como: alcance, carga máxima, peso entre otros. En este sentido, toma relevancia el uso de software asistido por computadora CAD, pues este dispone de herramientas de análisis estructural, que facilitan la construcción de un diseño, fiable, estético y funcional. De forma rápida, ahorrando tiempo y dinero (Rojas y Rojas, 2006). En esta etapa también se exploran los diversos materiales, disponibles en la impresión 3D, específicamente los polímeros como ABS, PLA, polianimida y policarbonato. Seleccionando el más adecuado, respecto a sus propiedades mecánicas, rigidez, y peso.

Una segunda etapa esta dada al proceso de fabricación de las piezas, por medio de una impresora 3D FlashForge Creator. Entre sus características más relevantes cabe destacar su resolución. Pues Imprime capas de hasta 50 micrones, es decir, hasta 20 capas por milímetro, lo que es importante al tener un volumen máximo de impresión de 23 x 15 x 15cm. Según estas características se construye, una estructura armable, que tiene como ventajas el transporte, y facilita la comprensión del prototipo (Flashforge, 2014).

En una tercera etapa se exporta el diseño de el brazo robótico en formato CAD, a un software de análisis matemático con el fin, de evaluar las propiedades cinético-funcionales del prototipo. Finalmente, una interfaz operada mediante microcontrolador Arduino le permite interactuar con un usuario, esto para garantizar el correcto funcionamiento de los sensores y actuadores del brazo robotico de 6 GDL (DOF, de su uso en inglés y literatura especializada *Degree Of Freedom*).

Marco Teorico

Como bien lo describe Echeverri en (Echeverri, 2014), el modelo dinámico tiene como objeto conocer las relaciones existentes entre el movimiento de el robot y las fuerzas aplicadas en cada articulación del brazo Robótico. Este estudio permite determinar el torque requerido en cada articulación, para que el manipulador logre movimientos sistemáticos hacia un objeto definido, Para tal fin se estudian en primera instancia las teorías que posicionan al brazo robótico en el espacio la cinemática directa y la cinemática inversa.

La cinemática directa, consiste en determinar la posición y orientación del extremo final del robot, respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot La cinemática inversa, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas (Oramas, 2006).

Un método que facilita la solución de la cinemática Directa fue planteado por Denavit y Hartenberg en el año 1955, el cual consiste en fijar un sistema de coordenadas a cada articulación, mediante reglas fijas, después se relacionan los parámetros geométricos con el sistema de referencia a la siguiente articulación, esta relación se usa luego para describir una matriz de transformación Homogénea entre cada par de sistemas (Santos, Mejía, y Salazar, 2007).

De tal modo, son necesarias seis matrices homogéneas, una por cada grado de libertad del brazo robótico. El producto de estas genera una sola matriz de transformación T que relaciona el sistema, con el punto final objetivo del actuador, con el sistema de referencia escogido, un ejemplo del uso de esta metodología para un brazo de 7 GDL se ilustra en la Fig. 2.

La solución a la segunda problemática de cinemática inversa se logra mediante la separación de la posición y orientación del manipulador final, para ello se da una posición final arbitraria objetivo deseada, a partir de esta se establecen las coordenadas de los últimos tres ejes, y se obtiene el resto de variables articulares, por medio de una submatriz asociada a la matriz de transformación homogénea.

En este orden de ideas se resume, la teoría que posiciona al robot en el espacio, esta información es relevante al remplazarse en nuevas ecuaciones que representan el modelo dinámico. Dados los pares y las fuerzas que proporcionan los actuadores para que las variables articulares sigan una determinada trayectoria La ecuación que relaciona dichas variables está dada por:

$$\tau = D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) + c(q) + F_v\dot{q} \quad (1)$$

Donde:

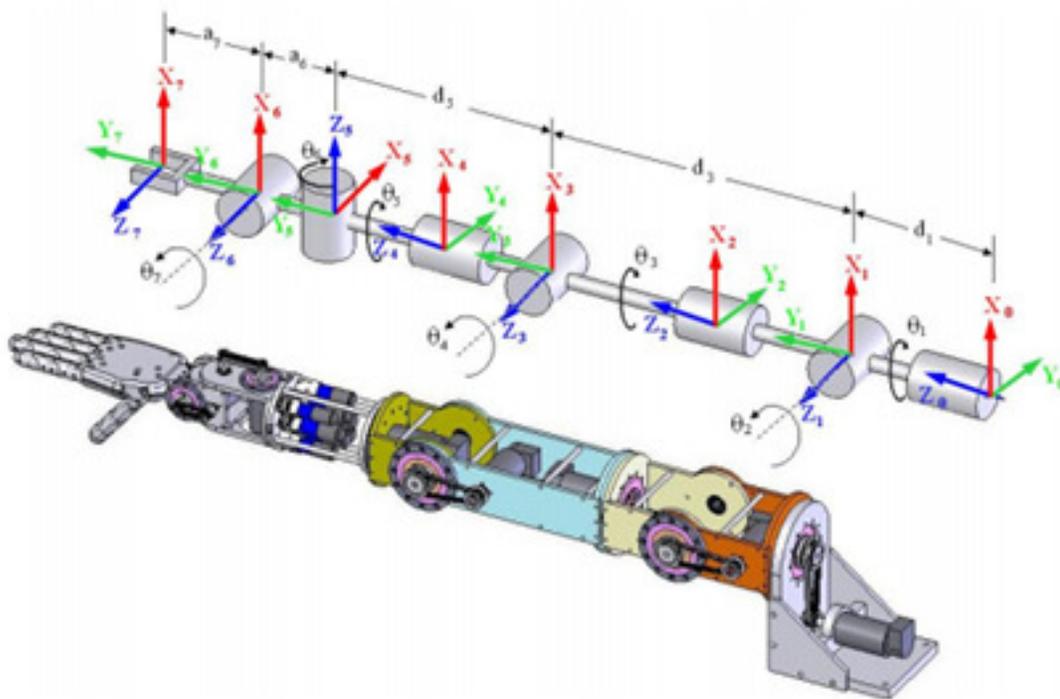


Figura 1. Representación de Denavit-Hartenberg del brazo robótico antropomórfico tomado de Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una Mano, Brazo y Antebrazo.

- $D(q)\ddot{q}$ = Matriz de Inercias
- $H(q, \dot{q})$ = Es Matrix de aceleraciones centrífugas y de coriolis
- $c(q)$ = Es la matriz de gravedad
- $F_v \dot{q}$ = Es la matriz de rozamiento viscoso entre los pares

Sin embargo, si se evalúa detenidamente esta Ecuación, no es una expresión lineal, por lo que no es trivial encontrar a partir de ella el modelo dinámico que identifique la trayectoria del brazo. Por tanto para mayor facilidad se emplea la formulación Lagrangiana, está fundamentada en las consideraciones energéticas. Además el modelo se puede desarrollar únicamente para los 3 GDL que requieren vencer la fuerza de gravedad y las inercias de las masas, el hombro el codo y la muñeca, como se ilustra en la Fig. 2.

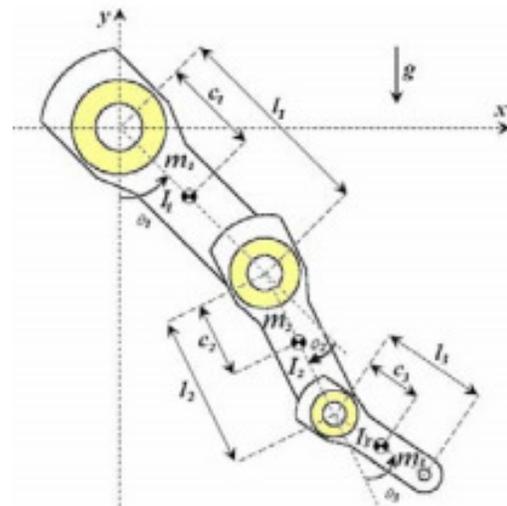


Figura 2. Método Lagrangiano para un robot de 3 GDL tomado de Diseño de un Sistema Emulando el Movimiento Articulado de una Mano, Brazo y Antebrazo.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \theta} = \tau_i \quad i = 1 \dots n \quad (2)$$

$L(\theta, \dot{\theta})$ Es el Lagrangiano definido como $k(\theta, \dot{\theta}) - u(\theta)$

Donde:

- $k(\theta, \dot{\theta})$ Es la energía cinética.
- $u(\theta)$ Es la energía potencial.
- τ_i Son las Fuerzas Y pares.

- n Es el numero de articulaciones del robot.

Para concluir, se han enunciado los métodos que determinan el posicionamiento del robot en el espacio la cinemática directa y la cinemática inversa y se ha enunciado

el método Lagrangiano, como herramienta para determinar el modelo en función del par, la velocidad y aceleración se obtiene mediante el método de matriz Jacobiana, necesario para determinar una velocidad constante en una trayectoria.

Diseño

El primer manipulador electro mecánico fue diseñado en 1969 por Víctor Scheinman en la Universidad de Stanford, constituido por eslabones y articulaciones que integran una cadena cinemática abierta. Que le permitan posicionarse en el espacio, este prototipo inicial, marco el inicio de investigaciones al uso de robots soldadores por arco eléctrico impulsado por la industria automotriz General Motors. Tal éxito se debe a su amplia maniobrabilidad, conseguida por su similitud al brazo humano (Almeida, 2009). En adelante se estudian las articulaciones que permiten tal capacidad.

El movimiento del brazo está dada por: Dos articulaciones principales, el hombro y el codo. El hombro se puede mover en dos planos, arriba y abajo, hacia tras y hacia adelante. Y el codo gracias a sus articulaciones es capaz de moverse, atrás y adelante arriba y abajo. Esta capacidad se llama Grados de libertad (GDL), siendo así, el hombro ofrece dos grados de libertad por sí mismo, rotación del hombro y flexión del mismo, la articulación del codo añade un tercer y cuarto grado de libertad. En total siete grados de libertad al brazo que le permiten moverse en cualquier dirección (Mosqueda, 2006).

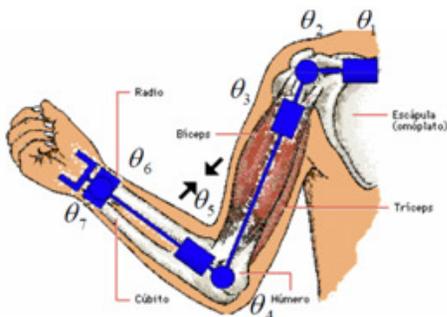


Figura 3. Grados de libertad brazo humano tomado de Modelación y Análisis de la Cinemática Directa e Inversa del manipulador Stanford de seis grados de libertad.

Es así que, para dotar el modelo con tal desplazamiento, se ha de construir con articulaciones, que permitan mayor grados de libertad según plantea (Romeo, 2001). En la base de el prototipo se ha de colocar una articulación una tipo cilíndrica, que permitirán (1 GDL), seguido el hombro estará dotado con una tipo rotacional que le permitirá moverse en 180 grados (1 GDL), esta trabajara en conjunto con la tercera articulación el codo (1 GDL), cumpliendo dos funciones, como punto de apoyo y extensión al antebrazo, quien

finalmente soportara el actuador, con una última articulación tipo rotacional (1 GDL). De tal forma se suman (6 GDL). Para lograr el movimiento requerido.

Construcción

El modelo CAD que cumple con los 6 grados de libertad propuestos y de morfológica humana, se ilustra en la Fig. 4 y en la Fig. 5 un despiece detallado de cada sección, la tabla 1 resume las características físicas de las piezas.

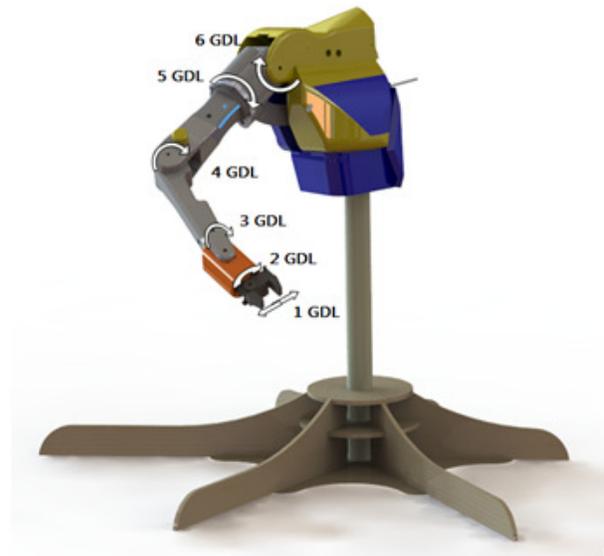


Figura 4. Modelo CAD. Fuente de los autores

El sistema se dividió en tres secciones, para su desarrollo La primera es: la muñeca comprende las piezas A-B. La pieza A cumple las veces de carcasa a un servomotor tipo MG996R Estándar de tensión nominal 6 V DC, cuenta con una caja de engranes en hierro lo que le permite cargas máximas hasta los 10 kg, este le otorga el primer grado de libertad al prototipo, mediante una pinza genérica para servo cuya extensión máxima es de 5 cm. El segundo GDL está dado al giro de la pinza en una extensión de 180 grados, completando la movilidad de la muñeca.

Esta configuración encaja en la pieza B, soporte y eje a un tercer grado de libertad, este ofrece mayor alcance interno al brazo de ajuste manual, la sección del antebrazo se compone de las piezas C-D, Y ofrecen soporte y eje de giro a la pieza E que hace las veces de codo, donde se ubica el cuarto GDL. Seguido se ensambla la pieza pieza F, esta es la armadura de un moto reductor marca Buhler, con capacidad de desarrollar 20 N/cm, energizado a 24 V, esta capacidad, esta multiplicada por una caja de engranes dispuesta en la tercera sección de el bíceps, las piezas G-H. Este vital mecanismo, eleva el torque en la pieza I el hombro, donde se dispone de otro motor Buhler, de iguales características,

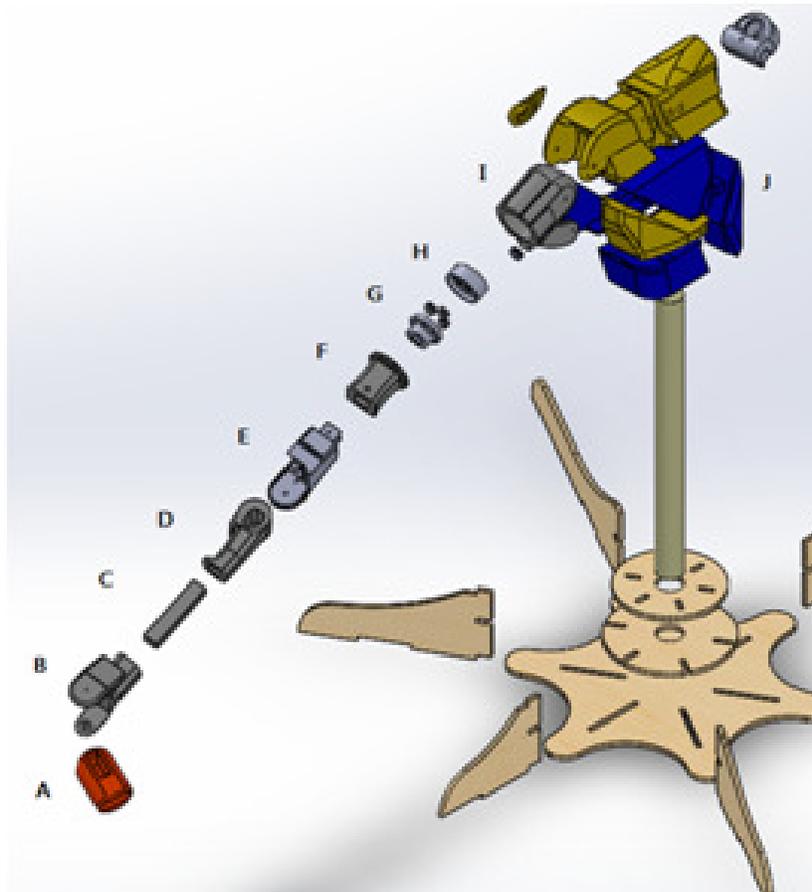


Figura 5. Despiece prototipo. Fuente de los autores

NO	pieza	Masa (grs)	Volumen (mm^3)	NO	pieza	Masa (grs)	Volumen (mm^3)
A	Muñeca	248.93	244048.06	F	Brazo	215.12	210899.72
B	Soporte Muñeca	320.2	313961.49	G	C Transmisión	59.79	54667.23
C	Unión	38.28	37529.70	H	Piñón hombro	30.40	30398.05
D	Antebrazo	226.29	221849.58	I	Hombro	614.30	6022559.01
E	Codo	275.43	49229.24	J	Pecho Y Abdomen	6881	8120153.48

Figura 6. Tabla 1: Características físicas de las piezas.

este se incorpora a una estructura ensamblada en el conjunto *j*, el pecho y abdomen, donde es relevante el aumento del volumen de las piezas, centralizando el punto de equilibrio de el modelo, esta finalmente se conecta a una base de forma pentagonal de cinco patas, ofreciendo la completa estabilidad del sistema.

Análisis estructural

La impresora 3D Flashforge Creator Dreamer es compatible con plásticos como el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (Poliácido láctico).

la elección del PLA como material a usar para la construcción de el brazo robótico de 6 GDL, responde a un

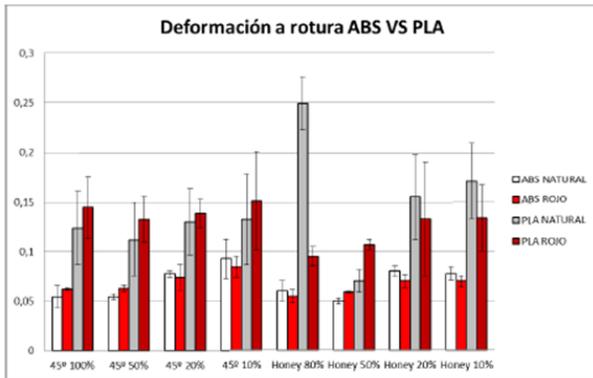


Figura 7. Comparación de la deformación para ABS y PLA natural y rojo tomada de estudio comparativo de piezas de ABS y PLA.

estudio entorno a las propiedades mecánicas de cada material de el cual se resumen las siguientes ventajas (Pastor, 2002).

El PLA tiene una densidad aproximada de 1.27 g/cc, lo que lo convierte en un material más pesado que el ABS, Su dureza Shore (escala que mide la dureza de los plásticos) es de grado 63.5, siendo mayor que la del ABS, Es decir es más rígido que el ABS, su módulo de elasticidad es de 3.63 GPa, lo cual dificulta su deformación ante cargas y lo hace un material menos elástico. Además su proceso de fabricación proviene de vegetales como el maíz, yuca, trigo, remolacha, y caña de azúcar lo que lo hace un material biodegradable, a diferencia de el ABS que se obtiene a partir de hidrocarburos (Castro, 2015).

Una vez seleccionado el material y conocidas sus propiedades mecánicas, se realiza un análisis estructural por medio de el software CAD, a dos piezas de el prototipo, El codo y la Muñeca estos se han seleccionado por que soportan la mayor parte de esfuerzos de el prototipo, el resultado de estos se observa en la Fig. 7 y la Fig. 8.

El análisis estructural desarrollado, se fundamenta en la teoría de fallas bajo cargas estáticas, su estudio comprende dos grupos, definidos según las propiedades de el material, dúctiles y frágiles, el PLA es un material dúctil, como se evidencia al observarlo experimentalmente este supera el 5 por ciento de su deformación antes de presentar fractura, bajo este concepto las pruebas de falla adecuadas para su estudio son Los ensayos de tensión Von Mises el cual establece que habrá falla de fluencia es decir de deformación, cuando los esfuerzos máximos absolutos, en un punto crítico superen la energía de distorsión por unidad de volumen (De Castro, s.f.).

Como se observa en la Fig. 7 el análisis de tensiones Von Mises para la pieza codo, para una tensión máxima de $6N/m^2$ resalta en color verde azulado los puntos críticos de posible falla por fluencia, evidentemente se contorna la unión de

la pieza y el punto de eje de giro, entre los $5y6N/m^2$ Sin embargo estos puntos, no son significativos para causar daño a la estructura, debido a que la pieza codo E se ensambla dentro de las piezas D y F dando mayor apoyo estructural a la pieza.

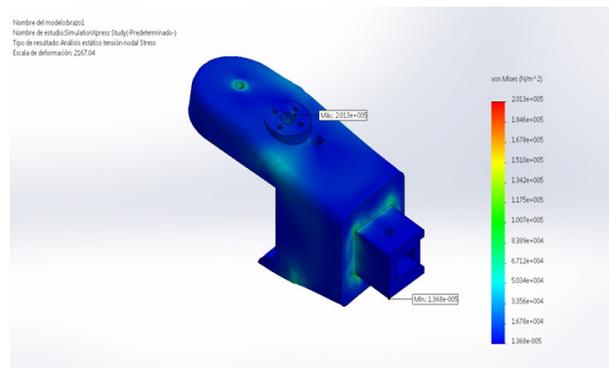


Figura 8. Análisis de fallas pieza D (CODO). Método tensión de Von Mises. Fuente de los autores

Seguido la pieza A muñeca, ofrece el 3 GDL, soportado en la pieza B, donde recae el peso del actuador y el objeto a desplazar, bajo este principio esta pieza consta de una figura cilíndrica que reparte el esfuerzo uniformemente en toda su extensión en color azul como se ilustra en la Fig. 8, los puntos críticos se acentúan en el eje de giro en un máximo $3,86N/m^2$ en color rojo.

Este criterio establece el peso máximo que el prototipo puede levantar sin sufrir daños mecánicos ni estructurales, máximo de 0.2 kg en una extensión de 1.57 m que ofrece el brazo, lo que se traduce en un torque de $3,14N/m$ aunque el brazo mecánicamente puede levantar mayor peso cercano a los 0.7 kg debido a sus actuadores los motores Buhler con capacidad de desarrollar $20N/m$, y una caja de engranes en una relación de 3 a 1 ubicada en el bíceps, de acuerdo al análisis estructural realizado, para evitar fallas estructurales por fluencia se ajusta este rango de seguridad.

Se sobredimensiona la fuerza del brazo robótico, a fin de garantizar completa compatibilidad de proyectos futuros del grupo de investigación, si se desea cambiar la pinza, por una mano semejante a la morfología humana, se recomienda sustituir desde la pieza A, para garantizar el correcto funcionamiento estructural del prototipo.

Análisis cinemático

Como se indica en el marco teórico, el modelo matemático con el que se representa el sistema, esta dado mediante una expresión, no lineal, por tal motivo no es trivial encontrar una representación, teórico- matemática del sistema fácilmente, sin embargo entre los objetivos de este proyecto, se encuentra el probar y garantizar el óptimo funcionamiento del brazo robótico de tal forma, se resuelve el análisis cinemático de el

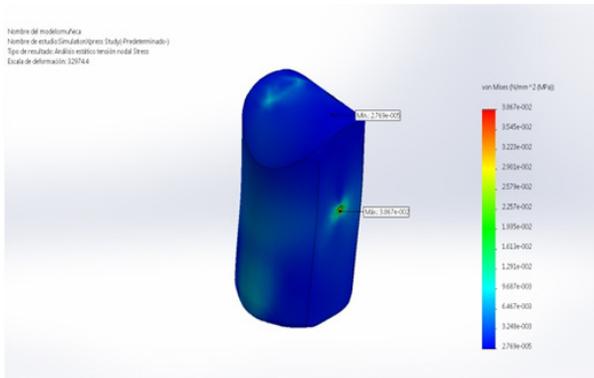


Figura 9. Análisis de fallas pieza A muñeca. Método Tensión de Von Mises. Fuente de los autores

brazo, en base a la teoría de posicionamiento en el espacio de él algoritmo de de Denavit-Hartenberg.

Como valor agregado a este proyecto, se usa una interfaz gráfica de simulación, en la cual se puede visualizar el posicionamiento del prototipo, además esta cuenta con herramientas como: la evaluación y planificación de trayectorias, visualización de fuerzas pares y velocidad de las articulaciones, y lenguaje de programación industrial RAPID. Esto se logra mediante un conjunto de librerías de licencia gratuita, llamada *A Robotics Toolbox For Education* (ARTE), construida a fines educativos, que facilita de forma interactiva el aprendizaje de la robótica, y la simulación de diseños teóricos de control.

Para lograr tal objetivo se enlazo, el modelo CAD del proyecto, el cual cuenta con todos los parámetros volumétricos y variables físicas del prototipo, masas, inercia, centros de masa, fricción, entre otras, a un código de programación, que representa fielmente el prototipo. Una vez exportado el modelo CAD a código de programación, este puede evaluarse mediante los comandos que ofrece la librería, de esta forma se aprovecha las herramientas que esta software libre ofrece. En la Fig. 9 se ilustra el Modelo cinemático mediante algoritmo de Denavit – Hartenberg. Para el brazo robotico de 6 GDL.

El interactuar con el modelo, es posible ejecutando el comando *steach*, en la librería, el cual proporciona un conjunto de botones, y barras deslizables que posibilitan el movilizar cada grado de libertad de el prototipo. El motor del software calcula estos movimientos y los procesa en el algoritmo cinemático, y visualiza las matrices de cinemática inversa y directa.

De esta forma se garantiza que el prototipo cumple con los 6 GDL planteados en los objetivos de el proyecto, además que el diseño se ha planteado de forma correcta, lo que permite exportarlo a un software matemático, que evalúa

su optimo funcionamiento ante problemas de trayectorias cinemática diversa y directa.

Evaluación de desempeño

Una vez comprobado que el diseño cumple con los 6 GDL, y que se cuenta con toda la información el necesaria para desarrollar algoritmos de cinemática como el de Denavit - Hartenberg, se verifica el optimo funcionamiento de los actuadores, que otorgan los grados de libertad de el brazo robótico. Esto mediante un microcontrolador Arduino, una computadora y una interfaz gráfica, estructura que posibilita la comunicación de un usuario con el prototipo. En esta se visualizan los módulos que energizan los motores, y servomotores, además como parámetros de seguridad se establecen limites máximos a los movimientos, garantizando que el prototipo no colisione. Esto se da en la parte inferior izquierda de la interfaz mediante seis instrumentos análogos que informan acerca de la posición actual de el actuador, y la comparan con la posición deseada. Si dicha posición supera el rango de seguridad estipulado, se encenderán indicativos que alarman el limite de las posiciones máximas de cada articulación. Finalmente, en el centro de esta se da importancia a un botón de emergencia el cual se podrá activar en cualquier caso, desenergizando por completo el sistema (Fig. 11).

Seguido se analiza el par que recae sobre cada articulación, esto para comprobar que el par generado por cada motor es mayor, lo que le permite al prototipo moverse, y aun más importante establece el la carga máxima de el prototipo.

Como se ha recalado en el documento estos esfuerzos son mayores en el hombro, el codo y la muñeca, de tal modo se gráfica par vs tiempo en cada una de estas articulaciones estas disponibles en la Figs. 12, 13 y 14.

A partir de estas se concluye que el torque que demanda cada articulación, es menor al torque generado por cada motor, y por tanto en el sistema se logra el movimiento, es decir estos satisfacen la demanda de el peso fricción y de mas variables de el prototipo, y una extra dada al desplazamiento de una carga, esto es posible gracias a que el par de el motor de el bíceps se potencia por una caja de transmisión de relación tres a uno.

En este orden de ideas se da por evaluado que el prototipo, cumple, con todas las características, tanto mecánicas como técnicas que permiten el realizar y comprobar diseños y teoría de control. Por tanto sirve como banco de pruebas y ensayos de investigaciones de el grupo ARMOS dando cumplimiento a todos los objetivos del proyecto.

Conclusiones

- El diseño del brazo de 6 GDL en base a morfología humana, es el punto de partida de una estructura, solida que garantiza el equilibrio del sistema, pues las fuerzas de

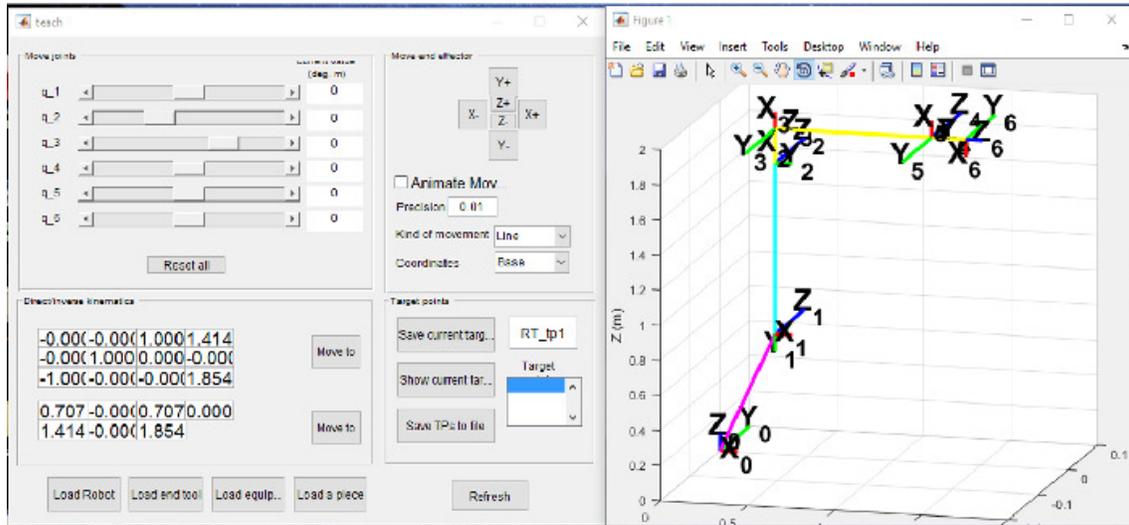


Figura 10. Modelo cinemático mediante algoritmo de Denavit - Hartenberg

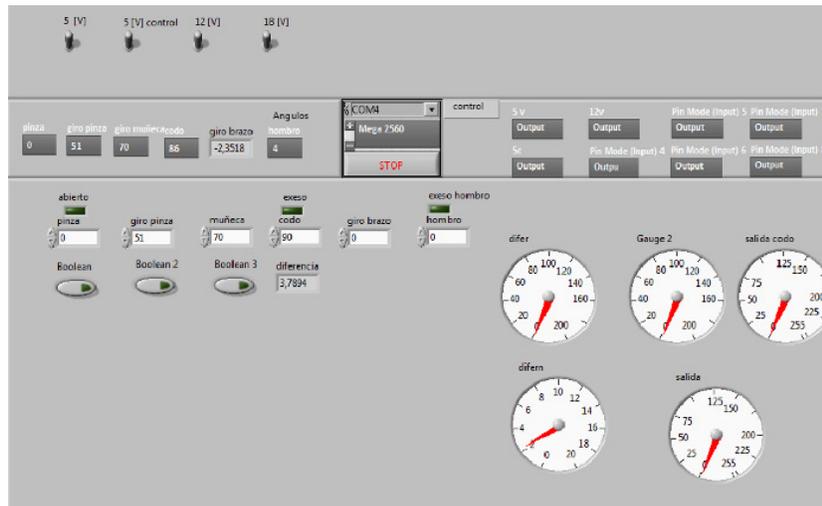


Figura 11. Interfaz de pruebas. Fuente de los autores

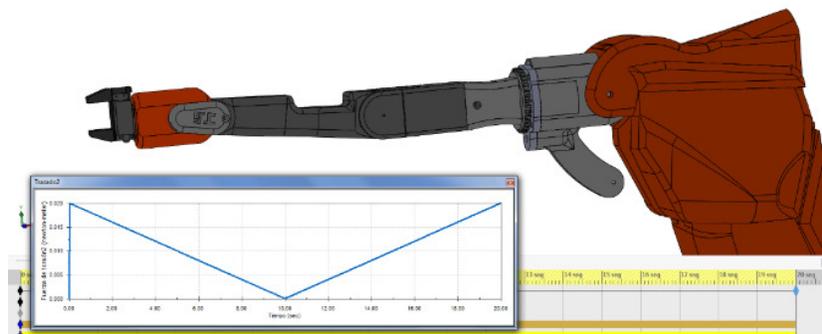


Figura 12. Par Vs Tiempo Articulación Hombro. Fuente de los autores

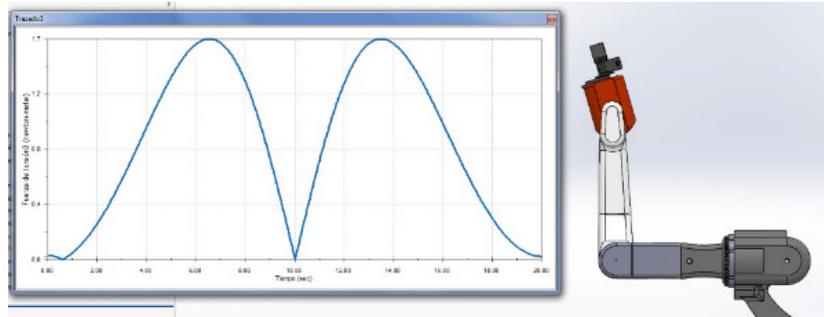


Figura 13. Par Vs Tiempo Articulación Codo. Fuente de los autores

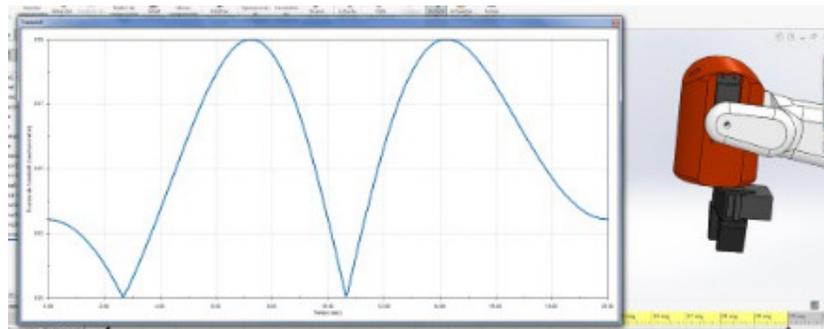


Figura 14. Par Vs Tiempo Articulación Muñeca. Fuente de los autores

los actuadores, y demás fuerzas externas, se conducen de manera uniforme a los soportes de la base Pentagonal de el suelo. Además dicha estructura soporta de manera adecuada los actuadores, y garantiza su optimo funcionamiento en conjunto con las piezas que participan en los movimientos.

- El materia plástico PLA Poliacido láctico, con el que fue construido el prototipo es el adecuado, pues ofrece la dureza necesaria, de acuerdo a los esfuerzos estudiados en el análisis estructural, y es totalmente compatible con la impresora 3D Fláforge Dreamer Creator, la cual ofrece la precisión necesaria, ala construcción de piezas ligeras y compactas por ajustes finos, facilitando el armado y desarmado y desplazamiento de el prototipo.

- El diseño CAD, cuenta con la información necesaria, volumen, peso, fricción, torque de el modelo dinámico de el sistema, lo que posibilita, el exportar el modelo a software matemático en el que se pueden evaluar problemáticas de trayectorias y cinemática inversa y directa, lo que es de gran importancia al ofrecer un banco de ensayos a fines educativos. ya que posibilita el uso de la librerías libres como (Arte) *A Robotics Toolbox For Education*, la cual desarrollada herramientas que facilitan la comprensión y programación de manipuladores robóticos.

- Los motores y servomotores ofrecen una respuesta adecuada, respecto al par que demanda la estructura, posibilitando los movimientos, en los cuales la velocidad no es un factor relevante, ya que la caja de transmisión

de relación tres a uno dispuesta en el bíceps, se disminuye velocidad y se aumenta momento torsor, lo que es necesario al desplazar un objeto no mayor a 200 gramos según los resultados de las pruebas estructurales y la evaluación de desempeño.

Reconocimientos

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en parte a través del CIDC, y en parte por la Facultad Tecnológica. Las opiniones expresadas en este artículo no necesariamente son compartidas por la Universidad Distrital. Los autores agradecen al grupo de investigación ARMOS por la discusión llevada a cabo sobre ideas y estrategias.

Referencias

- Almeida, G. (2009). *Fundamentos Generales De La Robotica* (Inf. Téc.). Descargado de <http://guillermoalmeida.wikispaces.com/file/view/UNIDAD+I+ROBOTICA+2009.pdf>
- Castro, M. (2015). *Pla. Material, Interés y Consejos De Impresión*. Descargado de <http://www.dima3d.com/pla-material-interes-y-consejos-de-impresion-3/>

- De Castro, A. (s.f.). *Teorías De Falla Bajo Cargas Estáticas* (Inf. Téc.). Descargado de <http://dim.usal.es/eps/im/roberto/cmm/Teorasdefallabajocargasestticas.pdf>
- Echeverri, A. (2014). *Análisis Cinemático Y Dinámico Del Robot Scrobot Er Vplus Para La Nueva Configuración En Una Base Deslizante*. Tesis Doctoral no publicada, Universidad Tecnológica De Pereira.
- Flashforge. (2014). *Dreamer La Más Moderna de las Impresoras 3D de Flashforge*. Descargado de <http://www.imprimiren3d.com.mx/>
- Mosqueda, J. (2006). *Biomecánica de las palancas musculares* (Inf. Téc.).
- Oramas, M. (2006). *Modelación Y Análisis De La Cinemática Directa E Inversa Del Manipulador Stanford De Seis Grados De Libertad*. Tesis Doctoral no publicada, Escuela Politécnica Nacional.
- Pastor, A. (2002). *Estudio comparativo de piezas de abs y pla procesadas mediante modelado por deposición fundida*. Tesis Doctoral no publicada, Universidad Carlos III De Madrid.
- Rojas, O., y Rojas, L. (2006). Diseño Asistido Por computador. *Industrial Data*, 9, 6–15.
- Romeo, A. (2001). *Morfología de los robots industriales* (Inf. Téc.).
- Santos, C., Mejía, F., y Salazar, A. (2007). *Diseño De Un Sistema Emulando El Movimiento Articulado De Una Mano, Brazo Y Antebrazo*. Tesis Doctoral no publicada, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

