

# APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS PARA DISEÑO DE UN ROBOT MANIPULADOR DE DOS GRADOS DE LIBERTAD CON CONFIGURACIÓN MANUAL DEL ESPACIO DE TRABAJO

APPLICATION OF SIMULATION AND ANALYSIS TOOLS FOR DESIGN OF A TWO DEGREES OF FREEDOM ROBOT MANIPULATOR WITH MANUAL CONFIGURATION OF THE WORKSPACE

**David Fuentes Díaz**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México  
al137622@alumnos.uacj.mx

**Adriana Salinas**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México  
adriana.salinas@uacj.mx

**Dann De la Torre**

Universidad Autónoma de Baja California, México  
dann.delatorre@uabc.edu.mx

**Israel Ulises Ponce Monárrez**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México  
israel.ulises@uacj.mx

**Recepción:** 21/octubre/2019

**Aceptación:** 23/noviembre/2019

## Resumen

Este artículo presenta el análisis, diseño y simulación de un robot de dos grados de libertad reconfigurable para uso experimental y didáctico. El diseño propuesto permite la configuración manual de cuatro espacios de trabajo a través de un sistema de ajuste. Este trabajo incluye estimación de pares de los actuadores (motores de DC), así como cálculo de deformación, de esfuerzos y factor de seguridad, a través de las herramientas *SolidWorks Motion* y *SolidWorks Simulation*. El diseño mecánico es exportado a *Simulink* con *SimMechanics®/Matlab* y posteriormente se obtienen resultados de simulación de control de posición. Los resultados de factor de seguridad obtenidos para el diseño propuesto son altos,

dejando de lado la falla estructural; la estimación de pares puede servir de apoyo en la elección de los actuadores; mientras que los parámetros físicos del robot calculados mediante software permitieron la sintonía de controladores para visualizar el desempeño del sistema.

**Palabras Claves:** Configuración manual, diseño mecánico, espacios de trabajo, simulación, sistemas dinámicos, robot manipulador.

## **Abstract**

*This paper presents the analysis, design and simulation of a two degree of freedom reconfigurable robot manipulator for experimental and educational applications. Through an adjustment system, the proposed design allows manual configuration to operate in four workspaces. The estimate of torques of the actuators (DC motors), as well as deformation, forces, and safety factor calculation through SolidWorks Motion and SolidWorks tools are included in this work. The mechanical design is exported to Simulink with SimMechanics®/Matlab, after that, simulation results of control position are obtained. The obtained safety factor results for the proposed design are high values, leaving aside the structural failure; the joint torque estimations can support the choice of actuators; while the physical parameters of the robot computed through the design software, allowed the tuning of controllers to visualize the performance of the system.*

**Keywords:** Dynamical systems, manual configuration, mechanical design, robot manipulator, simulation, workspaces.

## **1. Introducción**

El análisis estático y dinámico de estructuras mecánicas permite determinar si dicha estructura soportará las cargas para las que está diseñada, así como las características de los actuadores que brindarán la movilidad en el caso de estructuras móviles. Este análisis es de vital importancia como etapa previa a la construcción de un prototipo experimental y realizarse usando software de diseño y simulación. El diseño de plataformas experimentales podría implicar alto costo. El diseño de un sistema reconfigurable permite al usuario seleccionar entre distintas

tareas usando solo una plataforma [Padayachee, 2008]. Lo anterior, podría ayudar a reducir el gasto de construir un robot experimental por cada configuración deseada.

En la literatura, se encuentran disponibles resultados de investigaciones relacionadas con diseño de máquinas reconfigurables. Por ejemplo, [Xing, 2007] presenta el diseño de un sistema de manufactura capaz de operar en cuatro configuraciones para realizar diferentes trabajos. En este trabajo se aborda el diseño de un robot de 2GDL reconfigurable manualmente, para el cual se realizan estudios estáticos y dinámicos. El análisis estático es aplicado a la estructura para cada una de las configuraciones, y el estudio de la dinámica es aplicado para la obtención de datos que indicarán si el diseño tendrá la seguridad y resistencia requeridas. Una forma de realizar este tipo de estudios es la utilización de software de diseño que incluya herramientas para el análisis de esfuerzos, estudio de deformación y el factor de seguridad (FDS) de piezas. El software SolidWorks admite Análisis de Elemento Finito (FEA) para el estudio de estructura. Lo cual puede servir de apoyo en la reducción de costos, optimización de diseño, determinación de ciclos y fatiga del material [King, 2018]. Los resultados obtenidos permiten seleccionar el material que resista las cargas a las que será sometida la estructura. El uso de FEA es reportado en la literatura y es aplicado a diversas áreas de estudio como mecatrónica [Cui, 2015] y salud [Eraslan, 2010].

Adicionalmente, como parte del estudio del diseño, el paquete *SolidWorks Motion* puede ser usado como herramienta en la estimación de los pares requeridos en las articulaciones, a través de resultados de simulaciones de movimiento del diseño [Chang, 2019]. Esto es de utilidad en la selección de los actuadores para la elaboración de una plataforma experimental.

Una vez realizado el diseño mecánico, se utiliza el software de diseño seleccionado para la obtención de parámetros (tales como masas, longitudes y distancias al centro de masa), que son útiles para sintonía de controladores aplicados al robot. El diseño mecánico puede exportarse a *Simulink/Matlab* por medio de *SimMechanics*. Una vez hecho esto, es posible llevar a cabo simulaciones de la dinámica del sistema para evaluar su comportamiento [Mariappan, 2016].

Se presenta el diseño de un robot manipulador de dos grados de libertad de eslabones rígidos, con motores de DC con transmisión y articulaciones rotacionales. Resultados con robots manipuladores de 2GDL han sido reportados en la literatura, por ejemplo [Orozco, 2009], [Gouasmi, 2012]. Con respecto al diseño de robots de 2GDL, se incorpora un sistema de ajuste que permite seleccionar manualmente entre cuatro espacios de trabajo, descartando la necesidad de elaborar cuatro diseños distintos para la experimentación; y en su lugar añadir funcionalidad.

Adicionalmente, el diseño es evaluado estructuralmente mediante FEA, obteniéndose la deformación, esfuerzos y factor de seguridad. Para fines de presentación, únicamente se muestran resultados de la base del motor donde se sujeta el eslabón 1 y tres de las piezas con movimiento rotacional que presentaron mayor estrés. También se utiliza *SolidWorks Motion* como una herramienta para estimación de características de par de los actuadores. Del diseño mecánico se obtienen parámetros físicos del robot (masas, longitudes y distancia al centro de masa de cada eslabón) que son utilizados para la aplicación de controladores conocidos. La posible realización de una plataforma experimental a partir del diseño, tiene como uno de sus objetivos la experimentación con controladores, por lo que, para ilustrar el funcionamiento del diseño, se obtienen resultados de simulación de sistemas en lazo cerrado utilizando dos de las cuatro posibles configuraciones.

## **2. Métodos**

En esta sección se presenta el diseño mecánico, espacios de trabajo, análisis de movimiento (aproximación de pares de los actuadores, cálculo de deformación, esfuerzos y factor de seguridad); así como la simulación del control de posición.

### **Diseño de Mecánico**

El diseño es creado por medio del software SolidWorks. Previamente se establecen las características de movimiento, dimensiones, tipos de actuadores y aspectos de diseño deseables. Particularmente, el Robot experimental debe cumplir con:

- Espacio de trabajo manualmente reconfigurable.

- Bajo costo.
- El ensamble de las piezas debe aportar robustez.
- Las dos articulaciones deben de tener libre rotación.

El diseño mecánico del robot se muestra en la figura 1. La figura 1a presenta una vista del dibujo mecánico indicando los componentes principales. El diseño contiene formas simples como cilindros y rectángulos; además de considerar grosores estándar de materiales, para reducción en tiempo y costo de maquinado. Se seleccionan materiales comerciales como aluminio (debido a su ligereza) y acero (por su resistencia). Los agarres de los eslabones abrazan por completo el eje de la transmisión correspondiente para evitar deslizamientos.



Figura 1 Diseño de robot de 2GDL.

Una de las principales características del diseño propuesto, es la capacidad de movimiento en cuatro áreas de trabajo mediante configuración manual. A continuación, se describen el sistema de ajuste y los espacios de trabajo del diseño propuesto.

### Sistema de Ajuste

En esta sección se presenta un *sistema de ajuste* para la configuración manual del manipulador en cuatro espacios de trabajo. Este sistema está conformado por dos mecanismos, los cuales permiten modificar el espacio de trabajo por medio de la sujeción por tornillos. El subsistema de ajuste 1 ( $S_1$ ) que se muestra en la figura

1b, está compuesto por dos piezas de acero laminado en frío *Cold Roll Steel*, acopladas de manera concéntrica por un desfase cilíndrico y son ajustadas por tornillos. Este conjunto de piezas divide en dos al Eslabón 1 (eslabón que conecta las articulaciones uno y dos). El subsistema de ajuste 2 ( $S_2$ ) que se muestra en la figura 1c, está conformado por dos piezas simétricas de aluminio que se ensamblan concéntricamente mediante un riel, el cual bloquea el giro por medio de tornillos y tuercas. Este sistema conecta la base del manipulador con la base del motor 1, soportando de esta manera toda la estructura.

### Espacios de Trabajo

Se dice que el Robot es reconfigurable por que cuenta con un sistema de ajuste (conformado por  $S_1$  y  $S_2$ ) que permiten elegir entre cuatro posibles áreas de trabajo: Planar en horizontal, Manipulador con carga gravitacional (a), Manipulador con carga gravitacional (b) y Planar en la vertical. Estas cuatro áreas de trabajo son mostradas en la figura 2.

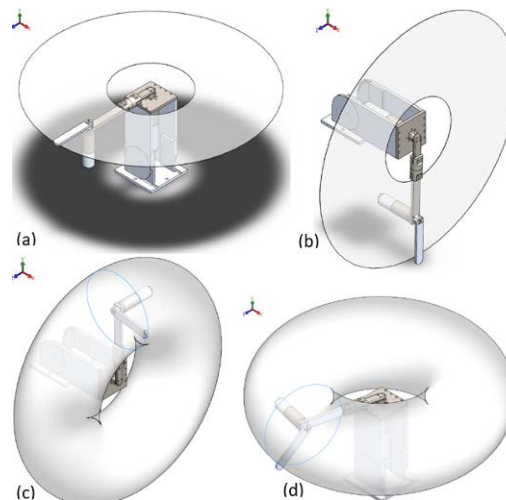


Figura 2 Espacios de trabajo.

A continuación, se describen las configuraciones posibles del diseño mecánico, así como los pasos a seguir para llegar a estas a partir de la configuración *planar en horizontal*. Cabe mencionar que los pasos mostrados no son únicos, ya que es posible modificar cualquier posición para llegar a la requerida:

- **Planar en horizontal:** Esta configuración se mueve en paralelo a la horizontal y su área de trabajo se ve proyectada en el plano XZ considerando que la profundidad es dada por el eje Y. En la figura 2a se muestra el área de trabajo de la configuración *planar en horizontal*.
- **Planar en la vertical:** Su área de trabajo (mostrado en la figura 2b) es sobre un plano vertical. Se puede obtener esta configuración modificando  $S_2$ , el cual permite a la base del motor 1 ser llevada del plano horizontal al plano vertical como se indica en la figura 3.

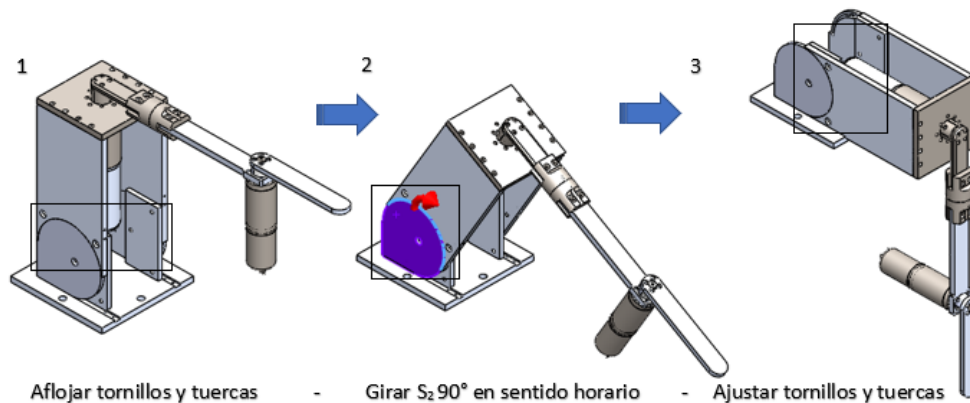


Figura 3 Uso del sistema de ajuste  $S_2$  para obtener manipulador planar en vertical.

- **Manipulador con carga gravitacional (a):** Los puntos coordenados están sujetos a la revolución saliente de un círculo, que al ser proyectada describe un área perimetral de una tubería en vertical como la que se muestra en la figura 2 c. Los pasos para llevar el robot a esta configuración son ajustando los subsistemas  $S_1$  y  $S_2$  como se muestran en la figura 4.
- **Manipulador con carga gravitacional (b):** Los puntos coordenados de esta configuración (presentada en la figura 2d) están sujetos a la revolución saliente de un círculo (área perimetral de una tubería en plano horizontal). En la figura 5 se dan indicaciones para obtener esta configuración (imagen del lado derecho), partiendo de la configuración planar en horizontal (imagen del lado izquierdo): Se ajusta  $S_1$  como se muestra en la imagen del centro para realizar una rotación del eslabón 1 a 90° próximos. La rotación puede ser en sentido horario o antihorario.

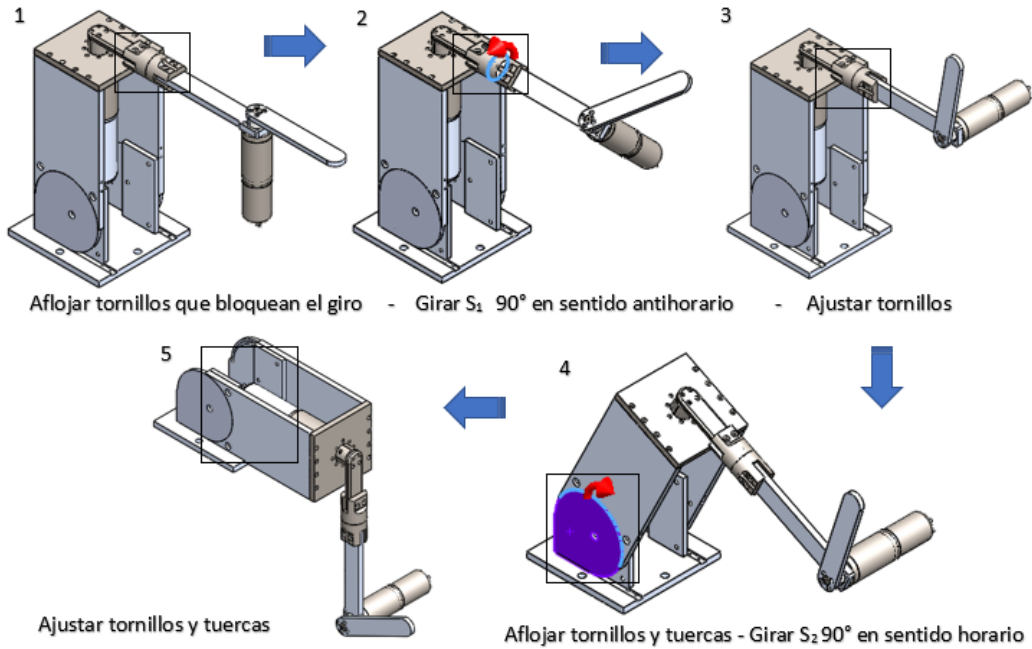


Figura 4 Uso de S<sub>1</sub> y S<sub>2</sub> para obtener *manipulador con carga gravitacional*.

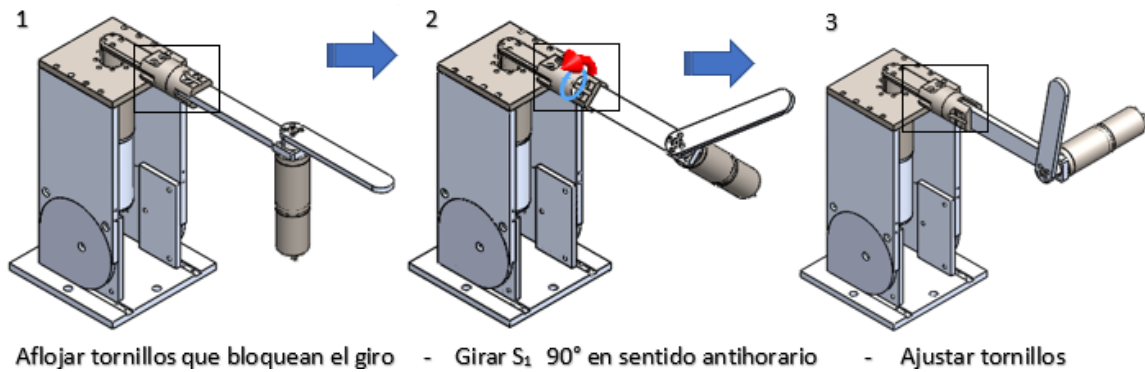


Figura 5 Uso de S<sub>1</sub> para obtener *manipulador con carga gravitacional*.

### Análisis de Movimiento

Con ayuda de los complementos *Motion* y *Simulation* se realizan análisis a las piezas que conforman los eslabones 1 y 2, así como la base donde está sujeto el motor 1 (la cual soporta los dos eslabones). Con el análisis realizado se obtienen los puntos de tensión, deformación y factor de seguridad (FDS) de las piezas. Además, se realiza un análisis de Movimiento mediante el complemento *SolidWorks® Motion* para aproximar los pares máximos requeridos a los actuadores con una configuración de movimiento particular.



## Cálculo de Par Torsional para Actuadores (Motores DC)

Para el análisis se establecen las siguientes características y valores en el software:

- Aceleración gravitacional: Se sitúa sobre el eje Y (en la vertical).
- Motores: Ubicación de cada una de las articulaciones rotacionales (Revolute Joint) del robot.
- Acción (Movimiento): Programación a actuadores de un determinado movimiento.
- Material: El material ayuda a tener un cálculo correcto, debido a que se proporciona al diseño masas, inercias, resistencia de material, etc.

Conociendo el tipo de tareas que realizará el robot, se pueden hacer simulaciones para obtener aproximaciones de pares requeridos. La tabla 1 muestra los datos y especificaciones considerados para un ejemplo particular.

Se establecieron los siguientes parámetros de simulación: Tipo de integrador: SI2\_GSTIFF (método Index-2 estabilizado); número máximo de iteraciones: 25; tamaño del paso inicial del integrador: 0.0001; tamaño del paso mínimo del integrador: 0.0000001; tamaño del paso máximo del integrador: 0.01; reevaluación Jacobiana: Cada iteración. Las simulaciones se llevaron a cabo para las cuatro configuraciones. En las figuras 6 y 7 se exponen gráficas de la relación par-tiempo (con el tiempo en el eje horizontal y el par en el eje vertical) obtenidas. Presentando únicamente los resultados para las configuraciones *planar en la vertical* en figura 6 y *planar en horizontal* en la figura 7.

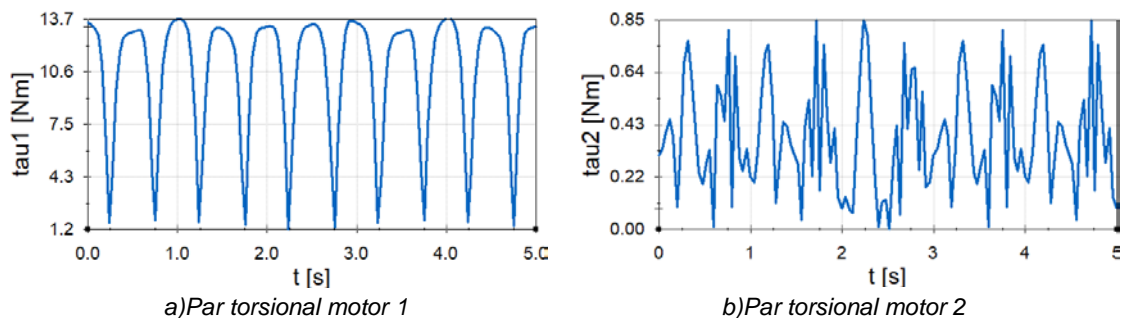
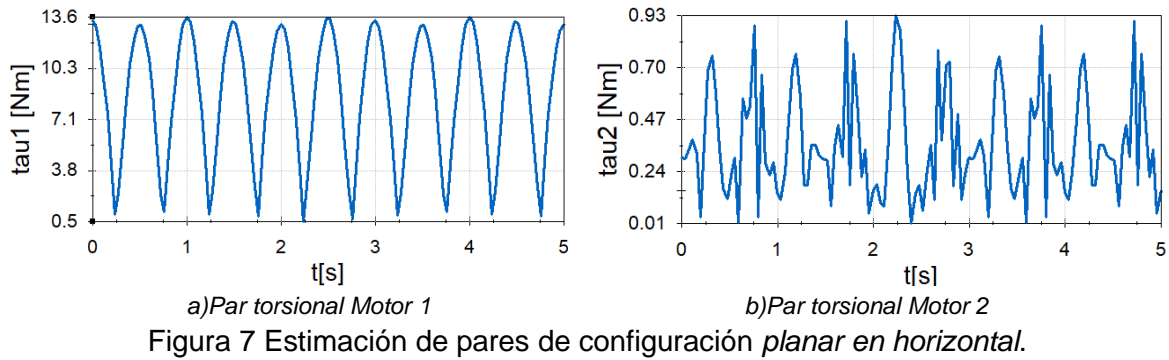


Figura 6 Estimación de pares de configuración *planar en la vertical*.



Considerando las características de movimiento dados en la tabla 1, en la tabla 2 se muestran aproximaciones de los pares máximos obtenidos para las diferentes configuraciones a partir de las simulaciones. Estos resultados sugieren que la zona de par continuo sea mayor o igual a 15 Nm para el motor 1 y mayor o igual 1 Nm para el motor 2.

Tabla 1 Datos y especificaciones para obtener resultados de simulación de movimiento.

| Datos                     | Valor o característica  |
|---------------------------|---|
| Gravedad                  | 9.81 m/s <sup>2</sup>   |
| Motores (posicionamiento) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor 1 es colocado concéntrico al eje de la transmisión del M1, el accionamiento de éste mueve el eslabón 1, que carga a su vez el motor 2 y eslabón 2.</li> <li>• El Motor 2 se encarga de mover únicamente el eslabón 2.</li> </ul> |
| Acción Movimiento         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor 1: Realiza un movimiento de 360° oscilante (onda senoidal).</li> <li>• Motor 2: Mantiene una velocidad constante de 100 RPM.</li> </ul>  |
| Material                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eslabón 1: Acero laminado en frío y aluminio extruido.</li> <li>• Eslabón 2: Aluminio extruido.</li> </ul>   |
| Frecuencia                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor 1: 1 hz o 2π rad/s.</li> <li>• Motor 2: 1.66 hz o 10.47 rad/s.</li> </ul>  |

Tabla 2 Estimación de pares para selección de actuadores.

| Configuración                           | Par Motor 1 (Hombro) | Par Motor 2 (Codo) |
|---|----------------------|--------------------|
| Planar en horizontal                    | 13.60 Nm             | 0.928 Nm           |
| Planar en la vertical                   | 13.75 Nm             | 0.853 Nm           |
| Manipulador con carga gravitacional (a) | 14.59 Nm             | 0.890 Nm           |
| Manipulador con carga gravitacional (b) | 14.32 Nm             | 0.910 Nm           |

### Análisis de Esfuerzo, Deformidad y Factor de Seguridad (FDS)

El coeficiente de seguridad (también conocido como factor de seguridad FDS) es dado por el esfuerzo último (carga última) entre el esfuerzo permisible (carga

permisible) [Beer, 2010]. Al momento de hablar del valor obtenido del análisis del FDS, algunos códigos requieren un factor mínimo entre 1.5 y 3.0. Si el FDS es menor a 1.0 en un punto significa que el material ha fallado, un valor igual a 1.0 indica que el material ha empezado a fallar y un resultado superior a 1.0 indica que el material es seguro [Comprobación de Factor de Seguridad, 2019].

La tabla 3 expone los resultados de deformación (URES), tensión (von Mises) y coeficiente de seguridad (FDS) de cuatro piezas, las cuales presentaron los valores de estrés más altos y el menor factor de seguridad (17.97 puntos, detectado en la pieza *Eslabón 1a*) durante el análisis. Estos valores corresponden a la configuración *planar en la vertical*. Nótese que los resultados de FDS mostrados en la tabla 3 se encuentran por arriba de los mínimos requeridos, lo que garantiza que el diseño soporta el esfuerzo al que será sometido.

Tabla 3 Resultado de análisis por simulación.

| Pieza  | Deformación (URES) mm                                      | Tensión von Mises $\frac{N}{m^2}$                        | Factor de Seguridad                      |
|--|--|--|--|
| Eslabón 1a (Pieza que se fija en el eje del Motor 1).          | Max: 0.1164<br>Mín: 0.0004                                 | Max: 1.948x10 <sup>7</sup><br>Mín: 2.313x10 <sup>4</sup> | Max: 1.513x10 <sup>4</sup><br>Mín: 17.97 |
| Eslabón 1b (final del eslabón 1, sujeta el Motor 2).           | Max: 8.165x10 <sup>-2</sup><br>Mín: 1.105x10 <sup>-4</sup> | Max: 1.177x10 <sup>7</sup><br>Mín: 6.893x10 <sup>3</sup> | Max: 4.715x10 <sup>4</sup><br>Mín: 27.60 |
| Conf1. Pieza que permite el ajuste del subsistema de ajuste 1. | Max: 9.567x10 <sup>-2</sup><br>Mín: 2.552x10 <sup>-4</sup> | Max: 1.111x10 <sup>4</sup><br>Mín: 3.032x10 <sup>4</sup> | Max: 1.154x10 <sup>4</sup><br>Mín: 31.49 |
| Base del Motor. (Soporta al eslabón 1 y 2).                    | Max: 2.193x10 <sup>-1</sup><br>Mín: 3.395x10 <sup>-4</sup> | Max: 3.625x10 <sup>5</sup><br>Mín: 775.3                 | Max: 6.084x10 <sup>5</sup><br>Mín: 965.4 |

En la figura 8 se presentan las imágenes de deformación, estrés y factor de seguridad de la pieza *Eslabón 1a*, pieza que presenta mayor estrés y menor FDS. En la figura 8a se muestra la deformación existente, donde los máximos se encuentran en los extremos con color amarillo y rojo. La figura 8b muestra las tensiones aplicadas a la pieza. Los puntos con mayor tensión se encuentran de color rojo. Finalmente, el factor de seguridad de la pieza diseñada es mostrado en la figura 8c, donde de acuerdo con la gráfica, los colores verde y azul indican el factor de seguridad más alto en la pieza.

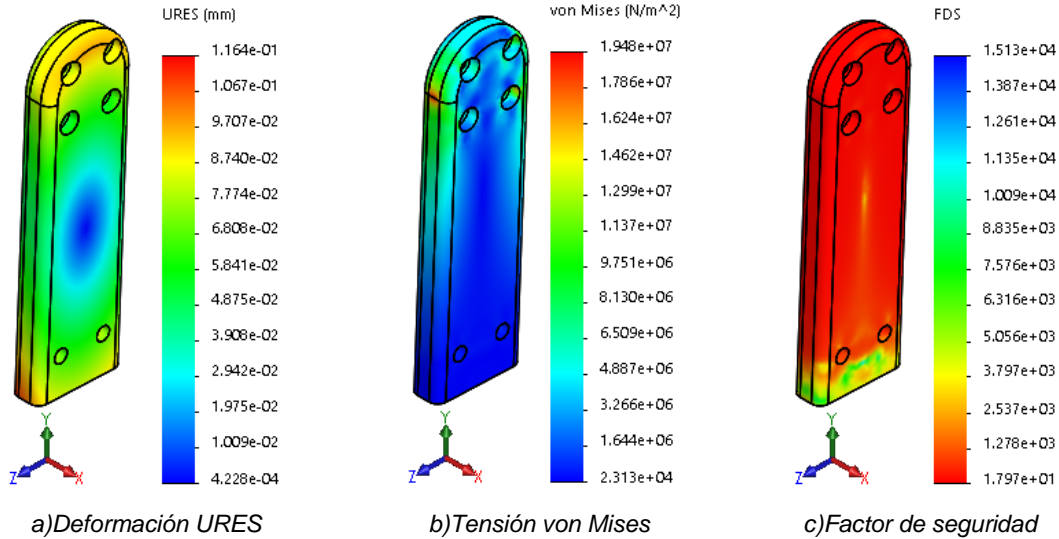


Figura 8 Resultados de análisis de elemento finito de eslabón 1a.

### Resultados de Simulación del Sistema en Lazo Cerrado

Para ilustrar el comportamiento del sistema, se llevaron a cabo simulaciones de control de posición con las configuraciones *planar en horizontal* y *planar en vertical*. Se aplicó un controlador proporcional-derivativo (PD) para la primera y un controlador PD con compensación de gravedad para la segunda. Ejemplos de análisis de estabilidad para estos controladores son presentados en [Kelly, 2005]. Estos controladores consideran actuadores sin restricciones de par.

Los análisis de estabilidad con los controladores utilizados pueden ser realizados considerando el siguiente modelo dinámico de un robot de eslabones rígidos, sin fricción, de  $n$  grados de libertad visto en [Spong, 2006], [Kelly, 2005], ecuación 1.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (1)$$

Donde  $q, \dot{q}$  y  $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$  representan la posición, velocidad y aceleración angular, respectivamente. La función matricial  $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  en (1) es la matriz de inercia,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $g(q) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de fuerzas y pares gravitacionales y  $\tau \in \mathbb{R}^n$  es el vector de entrada.

Para llevar a cabo la simulación del diseño mecánico elaborado, se exportan los sólidos del ensamble del robot a un diagrama esquemático de *Simulink*. Esto se realiza por medio *SimMechanics*® (Segunda Generación) de *Matlab*.

## Programación de Controlador PD en Simulink

Se utiliza el controlador PD para el control de posición de la configuración *planar en horizontal*, ecuación 2.

$$\tau = K_p \tilde{q} - K_v \dot{q} \quad (2)$$

Donde  $K_p, K_v \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  (en este ejemplo se tiene  $n = 2$ ) son matrices diagonales positivas definidas, el error de posición es definido como  $\tilde{q} = q_d - q$  y  $q_d$  es la posición deseada (constante). La posición articular deseada es  $q_d = [\pi/2, \pi/2]^T$  y las ganancias usadas para simulación son  $K_p = \text{diag}\{4.7746, 0.6366\}$  y  $K_v = \text{diag}\{2.3873, 0.3183\}$ . Se consideran ceros para las condiciones iniciales de posición y velocidad. En la figura 9a se muestra la posición inicial (en cero) de la configuración *planar en horizontal* (configuración 1). Como resultado de la simulación se obtiene la posición mostrada en la figura 9b. Nótese que la posición del robot tiende a la posición deseada.

En la figura 10 se presentan las gráficas de posiciones de las articulaciones 1 y 2 en los incisos a) y b), respectivamente.

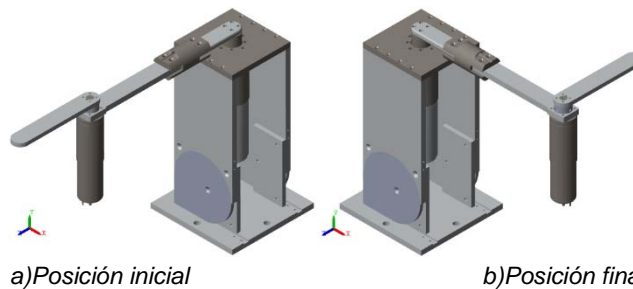


Figura 9 Posiciones inicial y final de simulación para configuración planar en horizontal.

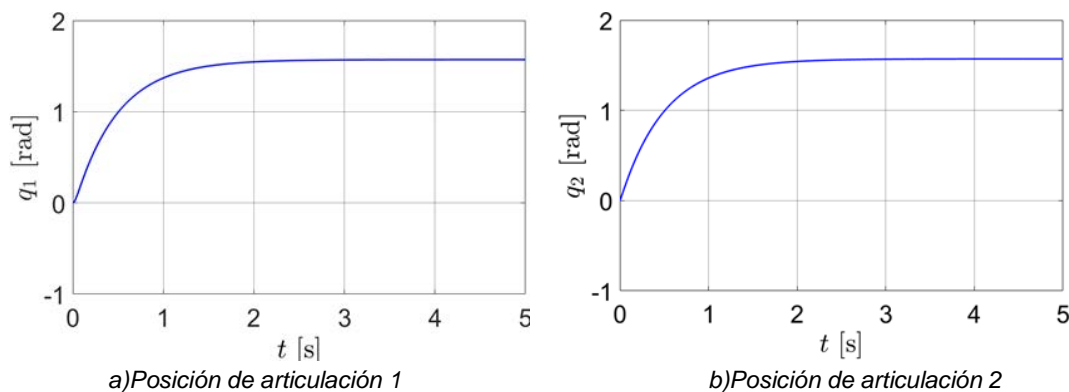


Figura 10 Configuración planar en horizontal posición articular.

Para el control de posición de la configuración *planar en la vertical* es considerado un controlador PD con compensación de gravedad que se obtiene sumando el vector de pares gravitacionales a la ecuación 2. Los elementos del vector de pares gravitacionales están dados por las ecuaciones 3 y 4.

$$g_1(q) = [m_1 l_{c1} + m_2 l_1]g \sin(q_1) + m_2 g l_{c2} \sin(q_1 + q_2) \quad (3)$$

$$g_2(q) = m_2 g l_{c2} \sin(q_1 + q_2) \quad (4)$$

La tabla 4 presenta los parámetros físicos usados para simulación obtenidos desde las características del diseño realizado en *SolidWorks*.

Tabla 4 Parámetros físicos del robot.

| Descripción                               | Valor   | Notación | Unidades         |
|---|---------|----------|------------------|
| Masa eslabón 1                            | 1.70963 | $m_1$    | kg               |
| Masa eslabón 2                            | 0.10198 | $m_2$    | kg               |
| Longitud eslabón 1                        | 0.30    | $l_1$    | m                |
| Longitud eslabón 2                        | 0.15    | $l_2$    | m                |
| Distancia al centro de masa del eslabón 1 | 0.21795 | $l_{c1}$ | m                |
| Distancia al centro de masa del eslabón 2 | 0.07554 | $l_{c2}$ | m                |
| Aceleración gravitacional                 | 9.81    | $g$      | m/s <sup>2</sup> |

Para simulación, la posición articular deseada es  $q_d = [\pi, \pi/2]^T$ . Las ganancias usadas son  $K_p = \text{diag}\{10, 1.7\}$  y  $K_v = \text{diag}\{2.3873, 0.3183\}$ . Se consideran ceros para las condiciones iniciales de posición y velocidad.

En la figura 11a se presenta la configuración planar vertical en la condición inicial.

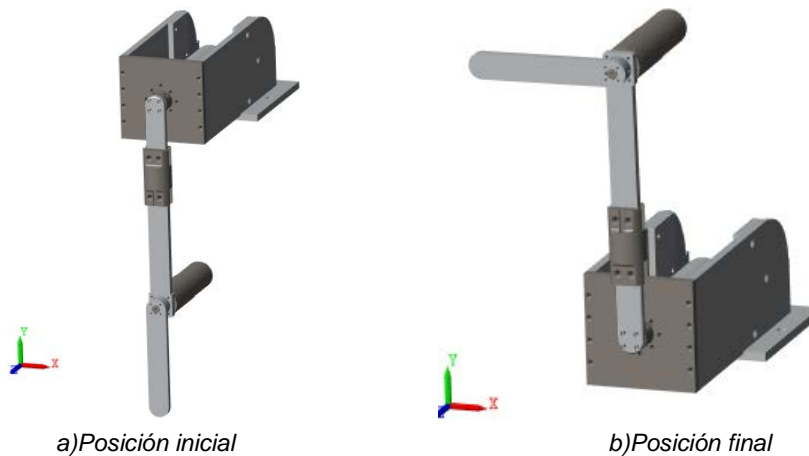


Figura 11 Resultado de simulación para configuración planar en la vertical.

El resultado de la simulación se muestra en la figura 11 b. La posición tiende a la posición deseada como se muestra en la figura 12, con la posición de la articulación 1 en el inciso a) y la articulación 2 en el inciso b).

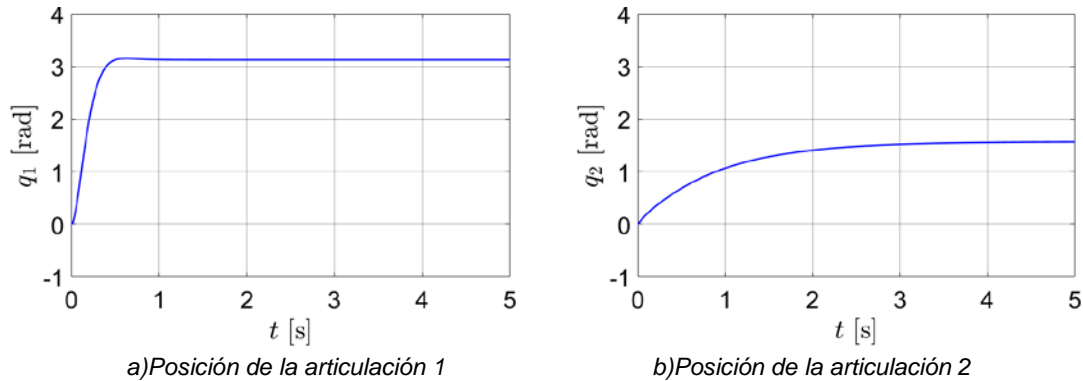


Figura 12 Configuración planar en la vertical posición articular.

### 3. Resultados

Se ha diseñado un robot manipulador reconfigurable. Se dice que es reconfigurable porque permite al usuario seleccionar de entre cuatro espacios de trabajo. Esto es posible gracias al uso del sistema de ajuste conformado por los subsistemas  $S_1$  y  $S_2$ . El diseño cuenta con piezas que ensamblan por medio de ranuras y carriles (como el subsistema de ajuste  $S_2$  mostrado en la figura 1c), lográndose un correcto ensamble y ajuste entre estos. Se cuenta con el diseño de piezas que abrazan directamente el eje de la transmisión, lo que evita cualquier deslizamiento en alguna dirección del eslabón. Las dimensiones de las piezas que conforman el diseño permiten una libre rotación. Cada configuración fue evaluada mediante FEA a través de software de diseño. Con esto se obtuvieron las deformaciones, esfuerzos, y factores de seguridad. De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 3, la deformación de las piezas evaluadas es baja; mientras el factor de seguridad es mayor a 17 puntos, siendo 3 un número aceptable [Comprobación de Factor de Seguridad, 2019]. Los resultados descritos anteriormente sugieren que el diseño propuesto cuenta con la robustez necesaria, considerando que el factor de seguridad obtenido para todas configuraciones se encuentra por arriba de los mínimos requeridos.

Con ayuda de simulación de movimiento en Solidworks se aproximan los pares torsionales a la velocidad y frecuencia propuesta.

De acuerdo con los datos mostrados en la tabla 2, los resultados sugieren actuadores con zona continua de operación de al menos 15 y 1 Nm para las articulaciones 1 y 2, respectivamente. Estos valores son de utilidad en la selección de las características de par de cada actuador (por ejemplo, de motores de corriente directa).

Se ilustra el control de posición del diseño propuesto a través de simulaciones en *Simulink*, utilizando controladores conocidos para dos de las configuraciones disponibles. Para el caso de la configuración *planar en vertical*, se utilizaron los parámetros físicos dados en la tabla 4, obtenidos a través de *SolidWorks*.

#### 4. Discusión

Se ha logrado el objetivo del diseño mecánico en cuanto a la posibilidad de selección del área de trabajo, manteniendo otras características requeridas como la libre rotación. Además, con miras a reducir tiempo y costo de maquinado, el diseño contempla el uso formas básicas (cilindros y rectángulos).

El ajuste de las piezas para pasar de una configuración a otra requiere de la intervención del usuario para el ajuste de una o dos piezas con ayuda de  $S_1$  y  $S_2$ . Los factores de seguridad obtenidos son altos, lo que garantiza que el diseño pueda soportar las cargas requeridas en cada una de las configuraciones. De los resultados de las simulaciones, cabe resaltar que los parámetros físicos obtenidos mediante software han sido de utilidad, ya que han permitido la compensación del vector de gravedad y así lograr el control de posición. Usando estos parámetros se pueden obtener cotas de los elementos del vector de gravedad para hacer estimaciones de los pares mínimos requeridos por algunos controladores a los actuadores. Para este ejemplo, las cotas correspondientes a los elementos 1 y 2 del vector de gravedad (ecuaciones (3) y (4)) de la configuración planar en vertical son 4.0330 y 0.0776 Nm. Lo anterior en conjunto con las estimaciones sobre los pares en el apartado 2.2.1 puede ser utilizado durante la selección de los actuadores.



## 5. Conclusiones

Los resultados del análisis de movimiento obtenido por medio de los complementos *Simulation* y *Motion* de SolidWorks®, permiten determinar previo al maquinado si las piezas soportarán las cargas a las que serán sometidas. Los resultados obtenidos de factor de seguridad para el diseño propuesto son altos con relación a los niveles aceptables, dejando de lado la falla estructural. La estimación previa de los pares de las articulaciones puede servir de apoyo en la elección de los actuadores y a su vez, de los elementos adecuados para instrumentación (como fuentes de alimentación, servoamplificadores, motor y transmisión y sensores). La ventaja de obtener los parámetros físicos del robot mediante el software de diseño, es que posibilitan la simulación de controladores con el fin de evaluar el desempeño del sistema bajo estudio.

Como trabajo a futuro se pretende realizar pruebas de control de movimiento a través de simulaciones para las cuatro configuraciones disponibles, así como la consideración de características de operación de actuadores y sensores para una mejor evaluación del diseño, previo a la manufactura de piezas y a la adquisición de elementos para instrumentación del sistema.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al PRODEP por el apoyo económico a través del proyecto con folio UACJ-PTC-422, oficio 511-6/18-9518.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Beer, F. P., Russell Johnston, E., Jr., DeWolf, J. T., y Mazurek, D. F. *Mecánica de materiales*. Mc Graw-Hill, 2010.
- [2] Cui, S., y Wei, J. Finite element analysis and optimization of an economical welding robot. *Future Mechatronics and Automation – Yang (Ed.)*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02648-3, 2015.
- [3] Eraslan, O., e İnan, Ö. The effect of thread design on stress distribution in a solid screw implant: a 3D finite element analysis. *Clinical oral investigations*, vol. 14, núm. 4, páginas 411–416, 2010.

- [4] Chang, K. H. Motion simulation and mechanism design with SolidWorks Motion. SDC Publications, 2019.
- [5] Gouasmi, M., Ouali, M., Fernini, B. y Meghatria, M. H. Kinematic modelling and simulation of a 2-R robot using solidworks and verification by MATLAB/Simulink. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, núm 6, páginas 1-13, 2012.
- [6] Kelly, R., Santibáñez, V., y Loría. A. Control of robot manipulators in joint space. Springer-Verlag, Londres, 2005.
- [7] King, R. Finite element analysis with SOLIDWORKS Simulation. Cengage Learning US, 2018.
- [8] Mariappan, S. M., and Veerabathiran, A. Modelling and simulation of multi spindle drilling redundant scara robot using solidworks and matlab/simmechanics. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, núm 81, páginas 63–72, 2016.
- [9] Orozco, E.A. Modelado, identificación y control de un robot manipulador de dos grados de libertad. (Tesis de maestría). CITEDIPN, Tijuana, México 2009.
- [10] Padayachee, J., Masekamela, I., Bright, G., Tlale, N. S., y Kumile, C. M. Modular reconfigurable machines incorporating modular open architecture control. 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, IEEE, páginas 127-132, 2008.
- [11] SolidWorks® Comprobación de Factor de Seguridad: [http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c\\_Factor\\_of\\_Safety\\_Check.htm?verRedirect=1](http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/cworks/c_Factor_of_Safety_Check.htm?verRedirect=1), 18 de julio de 2019.
- [12] Spong, M. W., Hutchinson, S., y Vidyasagar, M. Robot modeling and control. John Wiley & Song, 2006.
- [13] Xing, B., Gao, W., Tlale, N. S. y Bright, G. Design and application of reconfigurable manufacturing systems in agile mass customization manufacturing environment. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. Beijing, China, 30 de mayo al 2 de junio, 2007.