

Diseño Preliminar de un Banco Didáctico/Experimental para el Estudio de Esfuerzos en Cadenas Cinemáticas Reconfigurables

Investigación

Carlos Humberto Saucedo Zárate, Carlos Sánchez López
Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Metal-Mecánica
Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote. CP-20256 Aguascalientes, Ags. México
carloshum777@yahoo.com.mx, drcarlossl@yahoo.com

Jorge Adalberto Huerta Ruelas
CICATA-Qro. IPN, Querétaro. Qro. CP-76090, Tel/Fax (442) 212111 Ext. 120,
jhuertar@ipn.mx

Abstract-This preliminary design took place from the necessity of an experimentation stage on the elastic behavior of industrial robotic arms known as serial robots. This design is in an optimization stage, previous to prototype construction, which will be used as an experimental setup of kinematic chains to generalize results obtained with theoretical elastic modeling using finite element analysis and from experimental values of strain using extensometry gages. Experimental design of vibration analysis and strain/deformation has been determined selecting technology of NI™ for the acquisition, signal conditioning and data processing.

We present initial simulation results of a reconfigurable kinematics chain using finite element analysis, obtaining a recreation of its effort-deformation state. Finally some possibilities are discussed for the implementation of an external measurement system based on Laser light to validate simulation and theoretical model, that allows verify accurately the final position of the effector in the distorted chain. Applying theory of continuous media, two types of elastic deformations are proposed to characterize links and joints deformation which produce a position change that differs from position calculated with a rigid body model.

Virtual models of the reconfigurable chain were made in computer software packages MechanicalDesktop™, SolidWorks™ and ANSYS™.

Palabras clave

Kinematic chain, link, Joint, elasticity, flexion, degree of freedom, serial manipulators robot, torsion, FEM

Introducción

Se empieza a detectar mucha actividad de investigación a mediados de los años 1980 sobre la naturaleza elástica que presentan los sistemas

mecánicos, especialmente mecanismos usados en robots. Inicialmente se proponen los procedimientos para resolver la dinámica del robot, incluyendo tanto la dinámica directa como la dinámica inversa [1]. Incluso se han desarrollado aproximaciones de dinámica para el diseño de manipuladores sencillos consistente en sólo dos eslabones flexibles y dos articulaciones rotatorias. Sin embargo, las ecuaciones fueron simplificadas despreciando muchos fenómenos presentes cuyos efectos en la práctica son no deseables [2]. Al igual que en la literatura, se hace uso de la simulación, herramienta alternativa más accesible.

Las cadenas cinemáticas siempre han manifestado en mayor o menor grado las propiedades elásticas de lo elementos que la componen; tanto en eslabones como en los elementos usados para articularlos. Cuando estas cadenas cinemáticas son diseñadas para ser utilizadas como soporte estructural vertical con movimiento relativo entre sus eslabones por articulación tipo revoluta, surge la arquitectura clásica RRR o robot serial para funcionar como un brazo mecánico manipulador generalmente con 5 o 6 DOF.

Conforme los efectos elásticos son más apreciables en el desempeño de manipuladores menos rígidos y más esbeltos y la relación entre la carga útil y el peso estructural del manipulador se incrementa, los parámetros de Denavit Hartenberg [3], sólo sirven en el papel, pues tales “parámetros” en realidad varían. Y la tecnología de control se avoca al derroche de hardware y software en el interés en tratar de controlar esos efectos perjudiciales o indeseables suprimiéndolos o eliminándolos en tiempo real a través de técnicas nuevas de control.

Experimentalmente se ha demostrado que los efectos elásticos han provocado desviaciones que los modelos de cuerpo estrictamente rígido no predicen con exactitud. Lo que se ahorró en complejidad matemática con la introducción de la simplificación del cuerpo “rígido”, hoy lo pagamos conforme

solicitamos desempeños mas rápidos y repetibles de los manipuladores industriales.

Más aun, si bien otras causas imputables al error de posicionamiento existen, entre ellas errores propios de los servo sistemas tales como errores en encoders, la variación en el valor de la carga útil con respecto a la carga usada en la programación implica variaciones de posicionamiento. Aun más, Starr et al. [4] han encontrado que casi la mitad de fallas del robot en las plantas automotores es debido a los errores de la posición.

Sin embargo, detectar los defectos en el producto después de que ellos ocurren o se han acumulado es costoso. La calibración regular, a manera de mantenimiento preventivo adolece de las mismas desventajas que este método implica, es decir, hacerlo cuando no se requiere, o cuando no necesitó, también es caro, e introduce incluso errores humanos que se traducen en falla después de la intervención. La recalibración de un solo robot puede alcanzar 6 horas o más [5]. El tiempo de la mano de obra invertido es un costo innecesario.

La implementación de sensores en línea se ha propuesto y analizado desde 1999, tecnologías entre medios ópticos y visión de máquina [4], y tecnología basada en el efecto doppler de microondas [6].

Una de las fuentes mecánicas de error de posicionamiento es la naturaleza elástica de sus piezas. En general la importancia del posicionamiento exacto es alta al día de hoy en robots industriales robustos y la exigencia a este respecto continuará creciendo al mismo tiempo que se observa ya desde la pasada década, una tendencia hacia el diseño de robots más esbeltos con la intención de compaginar un amplio volumen de trabajo y menor peso "parásito". Lo que generalmente implica fenómenos elásticos más evidentes. La relación de peso respecto a la máxima carga útil es un parámetro de diseño a considerar que cobra importancia desde hace ya varios años [6].

Con la teoría mecánica clásica, aunada a la teoría de elasticidad, y la posibilidad de aplicar actualmente con facilidad el método de elementos finitos (MEF) para simulación estructural y con disponibilidad de la experimentación extensiométrica, se manifiesta la posibilidad de construir un modelo matemático que describa o contemple los fenómenos de deformación elástica provocada por el peso de los propios elementos constituyentes del mecanismo abierto, sus posiciones relativas y la carga útil a mover. De manera que este modelo permita auxiliar el diseño de este tipo de mecanismos y permita mejorar el control de los mismos.

El objetivo es desarrollar un modelo simbólico con MEF, sobre la Dinámica de cadenas cinemáticas abiertas eslabonadas con articulaciones tipo revoluta,

que incluya fenómenos de deformación elástica tanto en sus elementos de articulación, como en sus elementos de interconexión, y contemple sus propiedades cinemáticas bajo Campo Gravitacional.

Los Parámetros de estudio a incluir son: Fuerzas estáticas, deformación de elementos y de conjunto, posición espacial relativa de elementos del mecanismo abierto. De aquí nace la necesidad de un banco experimental de esfuerzos en cadenas reconfigurables que cumpla también funciones didácticas en este campo poco explorado, donde puedan introducirse de manera controlada variables de estudio tales como carga útil, sección transversal, momento de inercia, posiciones y orientaciones relativas entre los elementos eslabón que permitan retroalimentar los modelos analíticos propuestos. Finalmente la posición espacial del efector final de la cadena podría corroborarse mediante alguna de las tecnologías disponibles tales como metrología óptica láser, digitalización de imágenes o efecto doppler.

1. Banco didáctico/experimental de cadenas cinemáticas reconfigurables.

El Banco experimental se considera indispensable, ya que permitirá el estudio de la naturaleza del eslabonamiento, incrementando paulatinamente la complejidad del mismo agregando elementos una vez que sean conocidas las interacciones de las configuraciones más sencillas; es decir se estudiará en secuencia:

1. Una revoluta en la base con un solo eslabón móvil.
2. Dos revolutas con dos eslabones móviles.
3. Tres revolutas con tres eslabones móviles.

El Banco experimental de cadenas cinemáticas tendrá la función de permitir ensamblar y desensamblar cadenas cinemáticas con un número n de eslabones móviles (posiblemente un máximo de 5). Además la cadena debe poder estabilizarse en diferentes posiciones de estudio en forma manual.

Las revolutas deben ser tipo pasador lo más sencillas posibles tales que la cadena se pueda considerar plana (una vez fija la base; bastidor, se convertiría en un mecanismo plano)

El diseño de la cadena experimental tiene como objetivo simplificar su construcción y geometría de tal manera que los pasadores sólo estén sometidos a torsión principalmente (en una segunda etapa), despreciando otros esfuerzos presentes mediante su minimización, y los eslabones estén sometidos a flexión de igual manera principalmente. En este diseño preliminar se ha controlado la flexibilidad a torsión de los pasadores de las revolutas rigidizándolos al

extremo, para estudiar en primera instancia solo la deformación por flexión en los eslabones. Se continuará posteriormente en otra etapa con la versión de la cadena con articulación flexible a torsión y elementos “rígidos” a flexión, para su estudio por separado de ambas contribuciones elásticas.

DISEÑO DE ESLABONES Y ARTICULACIONES.

Dentro de esta fase el primer paso es efectuar modelos de piezas y ensambles de manipuladores haciendo uso del diseño asistido por computadora (CADD). El fin es realizar tantas propuestas como sean necesarias para definir las geometrías y configuraciones que mejor se adapten al proyecto. Aquí se definieron las especificaciones de tales elementos, las relaciones mínimas de forma y dimensión que en fases posteriores constituirían las características de diseño críticas y/o mayores de los planos correspondientes, es decir el ciclo cerrado de Síntesis y Análisis en el Diseño Mecánico hasta la optimización [1].

Objetivos:

- Realizar propuestas de eslabones intercambiables de configuraciones geométricas sencillas a fin de evitar zonas de concentración de esfuerzos debidas a aprietes, cambios de sección, etc., que finalmente distorsionen las líneas de esfuerzo elástico, y contribuyan como “ruido” a las zonas de estudio, donde se requiere explorar señales de esfuerzo debidas a elasticidad pura.
- Proponer articulaciones para tales eslabones del tipo revoluta los cuales deben contar con algún mecanismo de sujeción para fijar (y liberar fácilmente) estáticamente la posición relativa deseada entre cada par cinemático y así poder realizar mediciones experimentales de las deformaciones presentes en tales componentes para cada configuración de la cadena.

A. Evolución del Diseño:

Primera propuesta

Esta primera propuesta supone usar formas de material de línea buscando simplificar la manufactura. En el caso de los eslabones se puede observar que la sección transversal de éstos es tubular cuadrado de cédula delgada; por la relación entre ambos lados de este tipo de perfil (casi igual) y tomando longitudes variables respecto a estas mismas se puede estudiar su elasticidad en flexión (ver Figura 1).

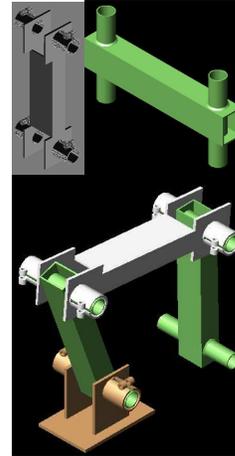


Fig. 1.- Primera propuesta para la cadena cinemática del banco experimental.

De hecho los robots industriales, cuentan con secciones huecas donde la transmisión de potencia se lleva hasta el efector final traduciéndose en movimientos tipo “roll”, “pitch” y “yaw”.

Las articulaciones propuestas son tubos de acero usados comercialmente en bicicletas; se proponen dos eslabones distintos: unos “macho” con los tubos soldados a sus extremos y otros “hembra” con horquillas en los extremos que cuentan con barrenos con pequeñas secciones de tubo de mayor diámetro a los del otro eslabón que cuentan con ranuras longitudinales para que se puedan deformar para el apriete: la forma de sujeción es mediante un espárrago roscado con una palanca en el extremo que permite realizar el apriete manualmente para localizar la posición deseada. Aquí se busca que los esfuerzos de apriete no distorsionen los esfuerzos de flexión que son los que realmente se quieren estudiar por extensiometría.

La fase de análisis arroja los siguientes inconvenientes:

- Las articulaciones de tubo son susceptibles a sufrir grandes deformaciones y por lo tanto esfuerzos de torsión por ser huecos y de pared delgada.
- La geometría irregular de los eslabones con horquilla conduce a grandes concentraciones de esfuerzos.
- Dado a que todos los elementos son huecos existe el peligro de deformación plástica fácilmente.

Todo ello conduce a la necesidad de realizar otra propuesta cuidando los aspectos negativos del anterior:

- Usar elementos sólidos en las articulaciones (mayor resistencia a la torsión).
- Cuidar la uniformidad de las formas de los eslabones para evitar concentración de esfuerzos que distorsionen los esfuerzos a flexión.

Segunda propuesta

Tomando en cuenta los inconvenientes anteriores, ahora se idearon tres tipos de eslabones, una flecha para las articulaciones y dos piezas que hacen la función de roldanas. A continuación se da una descripción de cada una de ellas (ver Figura 2).

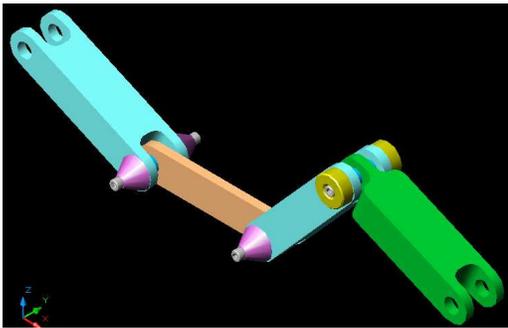


Fig. 2. Segunda propuesta para la cadena cinemática del banco experimental.

Eslabón con doble horquilla.

Es una pieza de sección rectangular sólida con extremos en forma de horquilla que cuentan con barrenos concéntricos pasados para el ensamble de la flecha de revoluta. Todos sus vértices tienen amplios radios para el alivio de esfuerzos. La forma es constante sin cambios abruptos. Inicialmente se considera un diámetro estándar de 0.750 plg de diámetro nominal para barrenos y flecha.

La saliente de sujeción adyacente a los barrenos se tomó en relación al espesor de la horquilla buscando lograr la mayor resistencia en esta parte siguiendo la recomendación de Shigley [1], para reducir en la medida de lo posible la concentración de esfuerzos y que sugiere una relación de diámetro de muesca y ancho de cara de eslabón de 0.483.

Se planea que el diámetro de los agujeros tenga un ajuste deslizante con la flecha para permitir el movimiento relativo entre ambas piezas.

Eslabón simple.

Éste consiste de una pieza de sección rectangular con extremos redondeados concéntricos con barrenos en donde ensambla el perno de unión revoluta, cuya

unión es fija mediante un ajuste de localización. De esta forma las dimensiones de la Figura 3 también aplican para esta pieza. Así se puede decir que la pieza anterior (de doble horquilla) está conformada por dos eslabones simples unidos por una sección sólida de menor longitud.

Eslabón compuesto.

Se realizó el modelo de un tercer elemento móvil que resulta de la combinación de los dos anteriores (ver figura 3). Dado que uno de los objetivos es permitir la intercambiabilidad de eslabones con este es posible unir eslabones iguales consecutivos, ya que la unión de eslabones simples con eslabones de doble horquilla queda limitada a intercalarlos uno después del otro. Por otro lado la forma más irregular del elemento en cuestión puede ser una limitante para su construcción.

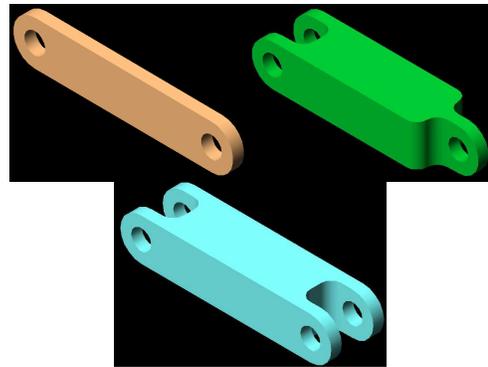


Fig. 3.- De izquierda a derecha eslabón simple, eslabón compuesto y eslabón de doble horquilla.

El perno eje de revoluta es una pieza cilíndrica de sección constante de longitud ligeramente inferior al ancho del eslabón de doble horquilla (ver Figuras 4 y 5). Ensambla de forma permanente con el eslabón simple y gira dentro de los barrenos del eslabón de doble horquilla. En los extremos cuenta con barrenos ciegos roscados donde se acoplan tornillos axialmente y éstos mediante roldanas permiten fijar la posición relativa de los eslabones.

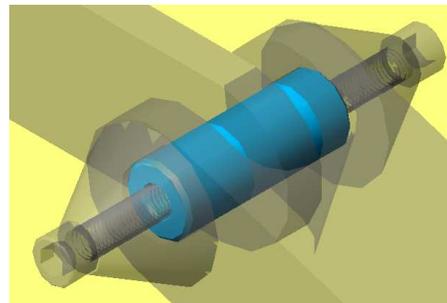


Fig. 4.- Se muestra el eje de revoluta dentro del ensamble de articulación y los eslabones

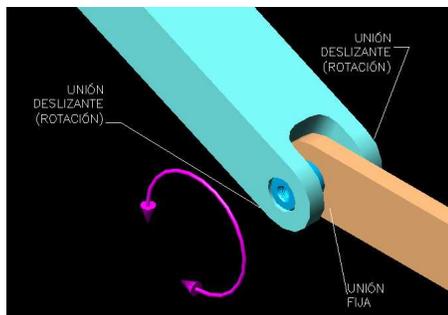


Fig. 5.- Detalle de sub-ensamble de eslabón de doble herradura (azul), eslabón simple (café claro) y flecha. La flecha color púrpura indica la dirección de movimiento o rotación relativo entre los eslabones.

Tornillos de flecha y roldanas.

Los tornillos (de cabeza allen) ensamblan en las flechas axialmente que junto con las roldanas proporcionan un empuje de afuera hacia adentro sobre las horquillas. Las roldanas tienen un diámetro exterior igual al ancho de la cara lateral de los eslabones de horquilla buscando tener la mayor área posible para inmovilizar la unión. Se proponen dos formas: una de sección exterior constante y otra de forma cónica con un ángulo respecto a su eje de 30° ya que según estudios referidos por Shigley [1] indican que aproximadamente dentro de este ángulo se crea un cono de distribución de la presión transmitida por la cabeza del tornillo (ver Figuras 6 y 7).

Inconvenientes:

El principal argumento para desechar este modelo radica en los mecanismos usados en los pares cinemáticos de revoluta: La flecha en su interior tiene cambios abruptos de forma lo que originará grandes concentraciones de esfuerzo. Por otro lado la

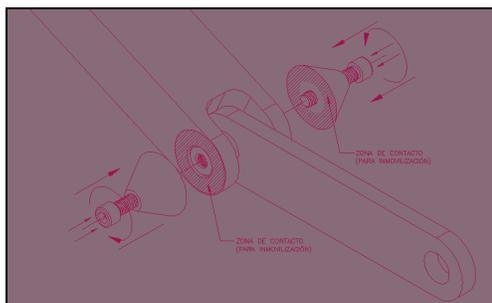


Fig. 6.- Manera de inmovilizar las articulaciones de revoluta: El apriete de los tornillos empuja las roldanas contra las paredes exteriores, impidiendo el deslizamiento entre tales superficies.

manera en que se inmoviliza el conjunto implica muy probablemente una flexión de las horquillas hacia

adentro, ya que al apretar los tornillos empujan las roldanas en dirección de la flecha y éstas a su vez a las salientes de las horquillas ya que no tienen ninguna restricción física exterior que impida este tipo de deformación. De esta forma el área de contacto entre roldanas y eslabón no sería uniforme proporcionando menor superficie de freno entre éstas y por tanto menos capacidad de inmovilización además de que se somete al eslabón de doble horquilla a esfuerzos no deseados. Un aspecto muy obvio que no se consideró a primera instancia; una interferencia de ensamble, la forma de ensamblar la flecha con este eslabón, implica forzosamente de abrir las “patas” del eslabón para colocar la flecha, se requiere facilidad de sujeción y de liberación de la revoluta, ya sea para intercambiar eslabones de otras características mecánicas, o bien solo para cambiar la posición relativa (orientación o posición angular) entre los eslabones de la cadena. Además existe el problema para el estudio de otras secciones transversales tales como la circular maciza/hueca, rectangular maciza/hueca.

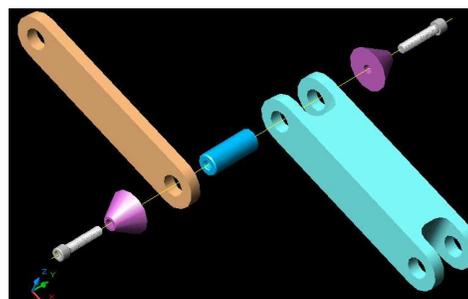


Fig. 7- Sub-ensamble de segundo modelo propuesto

Tercera propuesta

El siguiente paso en la evolución del modelo de manipulador fue usar un diseño muy similar al anterior buscando corregir su punto débil, para ello se ideó un par cinemático que impida la flexión de los extremos de los eslabones de horquilla (ver Figura 8). En consecuencia los cambios son mínimos respecto a la idea anterior.

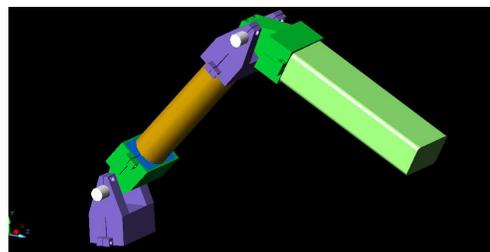


Fig. 8.- Tercera Propuesta aquí se resuelve el problema para articular con pasador formando una sencilla revoluta. Los eslabones de diferentes medidas en longitud y geometría, podrán intercambiarse en la posición de la cadena de n eslabones.

Sin embargo las prestaciones en cuanto a la eliminación de interferencia de los esfuerzos de apriete sobre de los esfuerzos debidos al fenómeno de flexión pura a estudiar son muy superiores con este prototipo virtual como puede observarse bajo el análisis de su estado de esfuerzos en ANSYS™, recordando que el diseño experimental tiene como factor crítico el aislar le fenómeno de esfuerzo debido a deformación elástica, aislando otro tipo de esfuerzos presentes en el mecanismo.

B. Análisis de esfuerzo

Como muestra visual a continuación se presentan los procesos de mallado, y postprocesado en deformación y solución de intensidad de esfuerzos para un caso de condiciones a la frontera particular de un eslabón aislado.

Estas superficies pueden ser entonces monitoreadas experimentalmente por extensimetría, medición de la reflectividad o dispersión de luz polarizada, análisis de imágenes o efecto doppler. El objetivo es la lectura de las micro deformaciones debidas a fenómenos elásticos puros en los eslabones para una configuración dada de la cadena (posición angular de las revolutas) y carga útil (variables de control).

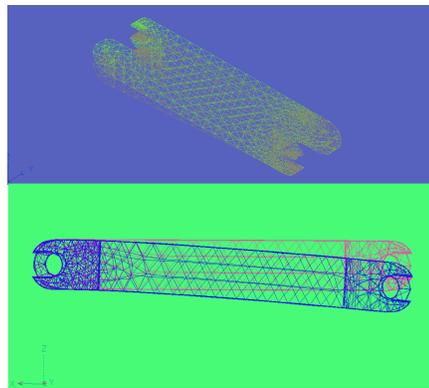


Fig. 9.- Vista oblicua y lateral del eslabón, donde la forma del elemento descargado, y el elemento cargado puede simularse

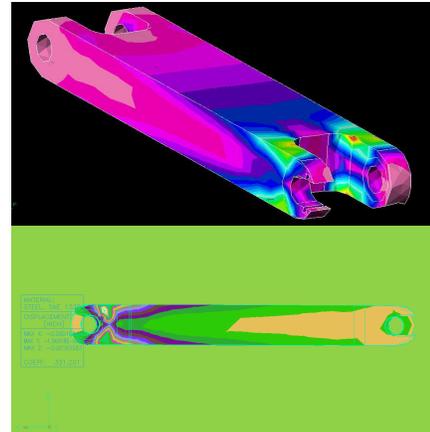


Fig. 10.- Se puede observar como la concentración de esfuerzos queda aislada en zona cercana a la articulación básicamente en el contacto con el perno y que entonces una extensa zona central del elemento presenta mejor grado de homogeneidad para el estudio de los esfuerzos debidos a flexión pura.

Conclusiones

Este prototipo propuesto permitirá estudiar dos modelos de deformación estructural lineal isotrópica; Una de ellas de naturaleza torsional correspondiente a las articulaciones de revoluta eje/hueco, y una segunda deformación a flexión análoga a cantiliver en cada eslabón de la cadena. El diseño experimental permitirá la creación de extensas bases de datos para el análisis del comportamiento de la deformación. Sin embargo la fase experimental prevé encontrar problemas para realizar la medición de la deformación por torsión a través de extensimetría por limitaciones de espacio físico de colocación y errores por el procedimiento de medición, por lo que se está trabajando en el diseño de un sistema óptico de espectroscopia de reflectividad anisotrópica inducida por los esfuerzos como tecnología Óptica de no contacto y muy sensible a esfuerzos microscópicos y que se ha probado es capaz de diferenciar entre deformaciones elásticas y plásticas [8]. Finalmente la contribución total de ambos efectos de deformación podría medirse directamente en el efector final y concentrarse en un solo término, por lo tanto la contribución diferenciada de cada fenómeno no es actualmente el objetivo en si, sino la contribución global de ambos fenómenos de deformación al cambio de posición, a este respecto para la validación del método de caracterización elástica se utilizara una de las siguientes alternativas tecnológicas disponibles, tales como sistemas de visión digital como una de las mas conocidas y explotadas comercialmente [4], sistemas de triangulación Láser [9], o una de ellas de las más recientes basada en un radar detector de movimiento

basado en efecto doppler de microondas [6], la selección estará supeditada a la disponibilidad y aseguramiento del alcance de los objetivos.

De acuerdo al plan de trabajo se ha alcanzado la condición para la construcción del prototipo para comenzar la etapa de experimentación extensiométrica para contrastar estos resultados con los datos de simulación FEM de esfuerzo/deformación. El modelado analítico [10], se ajustará en una siguiente etapa complementando el modelo actual de D-H, proponiendo modelos de “corrección” por deformación.

Agradecimientos

Se agradece la participación como tesista de licenciatura en Ingeniería Mecánica del ITA, al Ing. Francisco Larralde Calzada, estudiante destacado quien participó entusiastamente.

Referencias

- [1] Joseph E. Shigley. *Diseño en Ingeniería Mecánica*. 6ª Ed. páginas 132 y 133. Editorial McGraw-Hill.
- [2] Farid, M; Lukasiewicz, SA. *On dynamic modeling of multi-link spatial manipulators with flexible links and joints*. ASME PRESSURE VESSELS PIPING DIV PUBL PVP. Vol. 369, pp. 211-220. ISSN 0277-027X. 1997.
- [3] J. Denavit and R.S. Hartenberg. “A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices”. *Journal of Applied Mechanics*, pp. 215-221, June (1985).
- [4] Starr AG, Wynne RJ, Kennedy I (1999) “Failure analysis of mature robots in automated production”. *Proc Institution of Mechanical Engineers*. 213(8):813–824.
- [5] Owens J (1994) “Robotrak: calibration on a shoestring”. *Ind Robot* 21 (6):10–13.
- [6] Gregory C. Smith Roger A. Smith. (2005) “A non-contact method for detecting on-line industrial robot position errors using a microwave Doppler radar motion detector”. *Int J Adv Manuf Technol* DOI 10.1007/s00170-005-2543-y
- [7] Enrico D'Amato Enrico D'Amato. (1992) *Vibration Control Of A Rigid-Flexible Two Link Robot Arm: Numerical Modelling And Experimental Results*. Francesco Durante and Valerio Zirretta
- [8] R J Cole, S Kheradmand, D D Higgins, F Madani, B F Macdonald, V Koutsos and J R Blackford Oct (2003) Stress-induced optical anisotropy in polycrystalline copper studied by reflection anisotropy spectroscopy. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 (2003) L115–L118.
- [9] J. R. Rene C Mayer and Graham A. Parker. A Portable Instrument for 3-D Dynamic Robot Measurements Using Triangulation and Laser Tracking *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 10, no. 4, august 1994.
- [10] Carlos Sánchez López, Carlos Humberto Saucedo Zárate. (Noviembre 2002). Simulador Para La Síntesis Y El Análisis Dinámico De Manipuladores *Memorias Del Congreso Internacional De Metal-Mecánica*, ltd. Victoria De Durango, Dgo. Disco Compacto.