

# ROBOT CARTESIANO DE 3 GDL PARA INSPECCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES MEDIANTE PRINCIPIO DE FOTOELASTICIDAD

**Ángel Vergara Betancourt**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
[avergarabetancourt@gmail.com](mailto:avergarabetancourt@gmail.com)

**Fernando García Ortíz**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
[fer167995@gmail.com](mailto:fer167995@gmail.com)

**Jose Guadalupe Gaona Reyes**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
[lupillo-121192@hotmail.com](mailto:lupillo-121192@hotmail.com)

**Carlos Cortés Martínez**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Zacapoaxtla  
[carloscm91@hotmail.com](mailto:carloscm91@hotmail.com)

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un robot cartesiano de 3 grados de libertad con resolución micrométrica en sus desplazamientos axiales. El objetivo del trabajo es desarrollar un prototipo robótico que sea capaz de posicionar en el espacio una cámara VGA para aplicaciones de inspección industrial. El procedimiento incluye, diseño mecánico, análisis cinemático mediante parámetros Denavit-Hartenberg, diseño electrónico de potencia y de control por computadora, integración de sistema óptico de polarizadores, cámara y procesamiento de imágenes. Como resultado, se presenta un sistema de ejes sinfín acoplados a motores a pasos NEMA 17 los cuales son controlados vía interfaz Arduino-LabVIEW que permite monitorear en tiempo real los puntos de mayor esfuerzo residual en materiales birrefringentes, utilizando técnicas de fotoelasticidad.

**Palabras Claves:** Esfuerzos residuales, fotoelasticidad, inspección industrial, LabVIEW, robot cartesiano.

## **Abstract**

*This paper presents the design of a Cartesian robot of 3 degrees of freedom with micrometric resolution in its axial displacements. The objective of the work is to develop a robotic prototype that is capable of positioning in the space a VGA camera for industrial inspection applications. The process includes, mechanical design, kinematic analysis using Denavit-Hartenberg parameters, electronic power and control design, integration of optical system of polarizers, camera and image processing. As a result, there is a system of endless axes coupled to NEMA 17 stepped motors which are controlled via the Arduino-LabVIEW interface, which allows real time monitoring of points of greatest residual stress in birefringent materials using photoelasticity techniques.*

**Keywords:** Cartesian robot, industrial inspection, LabVIEW, photoelasticity, residual stress.

## **1. Introducción**

El desarrollo de robots cartesianos ha cobrado gran relevancia en la actualidad, debido al auge que han tenido en aplicaciones industriales [Schneider, 2008], [Rojas, et al. 2003], aplicaciones didácticas [Berrio, et al., 2015], en el desarrollo de sistemas de impresión 3D, equipos CNC [Hernández, 2014], automatización de procesos [Carvajal, 2009], [Morales, 2016], dispositivos de monitoreo e inspección industrial [Santoyo, 2014], y sistemas para la investigación en el campo de la óptica [Canales, 2008], etc. Por otra parte, la necesidad de desarrollar métodos de inspección no invasivos y de fácil implementación, ha llevado a la propuesta de análisis de esfuerzos residuales mediante la técnica de fotoelasticidad [Schajer, 2013], los cuales se han utilizado en diferentes áreas industriales y se ha impulsado su desarrollo en la investigación [Briñez, 2013], por ejemplo, la aplicación de la técnica de fotoelasticidad para determinar esfuerzos en probetas debido al efecto de la forma y el material de estas [Gutiérrez, 2016].

Derivado de lo anterior, en este trabajo se propone como objetivo, diseñar y desarrollar un sistema robótico de posicionamiento axial de 3 grados de libertad (GDL), que sea capaz de posicionar con resolución micrométrica, una cámara VGA para inspección industrial de esfuerzos residuales en materiales birrefringentes utilizando el principio de fotoelasticidad. Adicionalmente, se espera que este mismo sistema, adquiera versatilidad en el efector final y pueda incluso dirigir un sensor o herramienta para ejecutar tareas de alta precisión, tales como: el maquinado de piezas, grabado mediante técnicas láser, inspección detallada de objetos o manipulación de piezas.

De acuerdo con lo reportado en la literatura [Barrientos, et al, 1997], según el informe técnico de la Federación Internacional de Robótica (IFR) de 1988, un robot industrial se define como “una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar, piezas, herramientas o dispositivos, para la ejecución de tareas diversas en procesos industriales”. Por otra parte y en función de su estructura y movimiento al desplazarse, existen diversas clasificaciones de robots, pero los que resultan de interés en este trabajo de investigación, son los llamados robots cartesianos. Estos robots se desplazan a través de tres coordenadas lineales (X – Y - Z). Son muy comunes porque son utilizados en aplicaciones para la industria y en su funcionalidad como para tareas de soldadura, pintura, perforación de placas de acero, etc.

El proceso metodológico para el desarrollo del sistema que aquí se plantea se divide en cuatro etapas: La primera etapa consistió en determinar el sistema requerido y en el diseño estructural del robot utilizando herramientas de diseño por computadora (CAD). La segunda parte del proceso, consistió en el análisis cinemático del robot mediante el cálculo de parámetros de Denavit-Hartenberg [Craig, 2006] y obtención de la matriz de transformación homogénea. La tercera etapa se ocupa de la integración de los elementos electrónicos de control y de potencia, para lo cual se agregó un sistema de energía, y se utilizó la tarjeta de desarrollo Arduino Mega ADK como interfaz entre el prototipo y la computadora. Finalmente, se desarrolló con ayuda del software de instrumentación virtual

LabVIEW, un sistema de monitoreo en tiempo real, el cual permitirá la visualización de esfuerzos residuales utilizando el principio de fotoelasticidad. La figura 1 sintetiza este proceso. La propuesta inicial del prototipo se presenta a través de la figura 2.

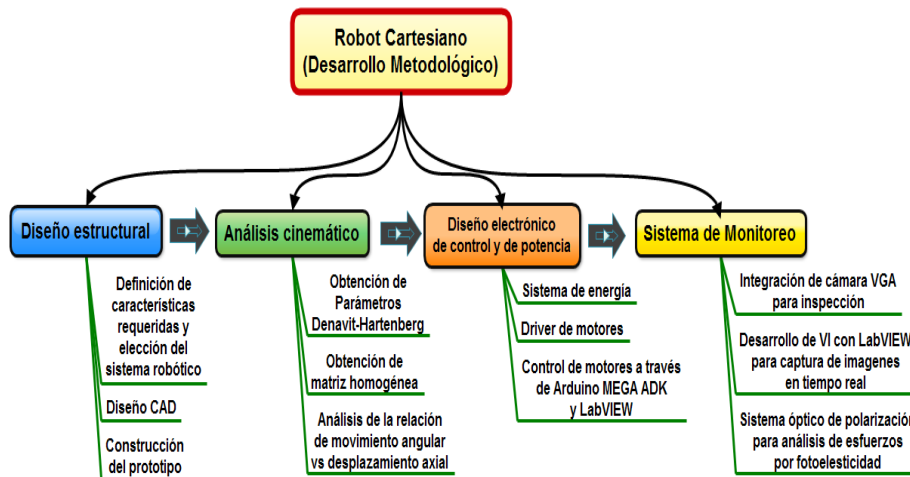


Figura 1 Proceso de diseño y desarrollo del prototipo robótico de 3 GDL.

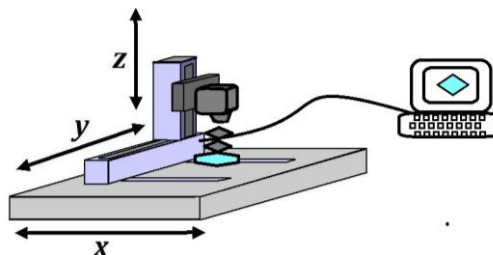


Figura 2 Esquema de la propuesta del sistema robótico cartesiano de 3GDL.

El esquema funcional del sistema completo que se propone y que incluye la captura de imágenes, la interfaz con el usuario, el control de los motores y la alimentación al sistema, se muestra en la figura 3.

Como resultado del trabajo, se logró el diseño y construcción de un dispositivo cartesiano de 3 GDL, el cual es manipulado mediante LabVIEW a través de una interfaz utilizando Arduino Mega ADK. Se realizó el análisis cinemático del robot y a través de la matriz de transformación homogénea que asocia la base del robot con la posición final del efector o herramienta del sistema, se calcularon los puntos

de alcance de robot en base al movimiento de cada motor. El prototipo ofrece la capacidad para posicionar espacialmente una herramienta en un área de trabajo específica, logrando desplazamientos lineales micrométricos. Esta resolución le dota al sistema de características específicas para aplicaciones de precisión en la industria o en procesos de análisis e investigación de laboratorio.

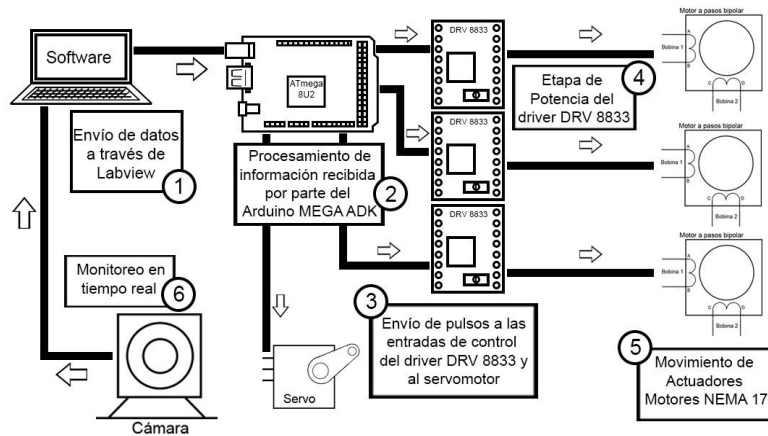


Figura 3 Esquema funcional general del sistema robótico cartesiano de 3GDL.

El sistema que se ha desarrollado, permite disponer de un dispositivo de inspección y análisis sobre un área determinada. El sistema es capaz de colocar una cámara VGA sobre muestras de materiales transparentes que presentan propiedades birrefringentes y que han sido previamente iluminadas con una fuente de luz polarizada. Dichos materiales son analizados a través de un polarizador, y las imágenes observadas son capturadas y enviadas a la computadora mediante el software LabVIEW, las cuales serán procesadas posteriormente para determinar de manera cualitativa la existencia de esfuerzos residuales en su estructura.

## 2. Métodos

### Diseño Estructural

La primera parte del desarrollo consistió en el diseño estructural del robot. Se propuso que el área de trabajo del robot cubriera al menos un área de 15 cm<sup>2</sup> efectiva, es decir, el área que podría cubrir la cámara VGA para inspección. De

acuerdo con lo reportado en la literatura referente a diseños de robots, se encontró una estructura que podría satisfacer los requerimientos que se demandan [Berrio, et al., 2015]. Se optó por seguir este diseño y se procedió a rediseñarlo de acuerdo a las necesidades propias de este trabajo. De esta manera, se planteó una estructura cartesiana elaborada en su mayoría de material acrílico con dimensiones espaciales de 40x30x15 cm.

Para generar los movimientos en X, Y y Z, se propuso utilizar como actuadores, 3 motores a pasos NEMA 17 con resolución de 200 pasos por revolución. Para la transmisión del movimiento, se planteó que a cada eje del motor se le acoplaran directamente tornillos sinfín con paso axial de 1mm y se colocaron guías de forma paralela al sinfín, con el objetivo de alinear el sistema axial. De esta manera, se procedió a realizar el modelo propuesto SolidWorks 2015. En la figura 4, se muestra la base del sistema que ejecutará los movimientos en X y Y.

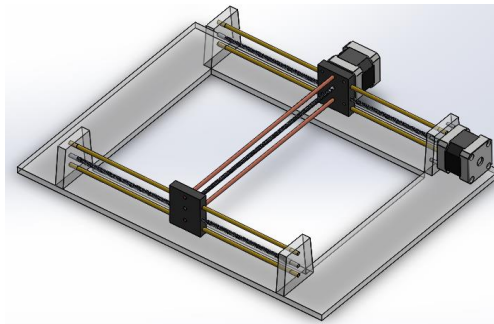


Figura 4 Base de acrílico sistema cartesiano: espárragos, guías y motores a pasos.

Posteriormente se diseñó la estructura del extremo final del robot, la cual soporta la cámara VGA para inspección y representaría los desplazamientos a lo largo del eje Z. Este GDL resulta necesario para poder enfocar la lente de la cámara de inspección. La propuesta se muestra en la figura 5.

El ensamble completo, quedó definido como lo muestra la figura 6. En referencia a la figura 6, se especifica que el área de trabajo es de aproximadamente de 15 cm<sup>2</sup> y que el desplazamiento mínimo que se genera en cada uno de los ejes es del orden de micras. Para determinar esta resolución, se consideró que el motor ofrece 200 pasos por revolución y que cada paso representa un desplazamiento

angular de 1.8°. Considerando que el paso axial del sinfín es de 1mm, se puede calcular entonces que este giro mínimo del motor se traduce en un desplazamiento de 5 micras, desplazamiento que le permite al robot ejecutar tareas que requieren precisión en los desplazamientos.

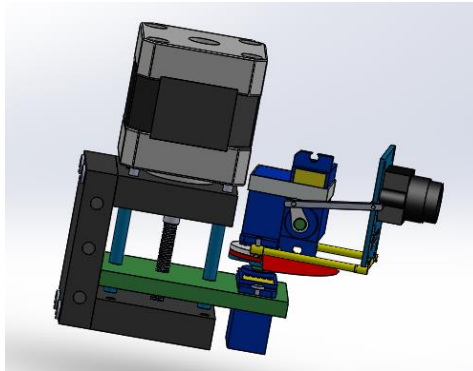


Figura 5 Parte de desplazamiento en Z e integración de cámara VGA como efector final.

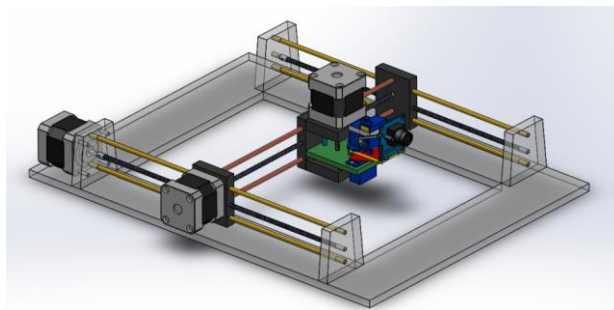


Figura 6 Modelo final del sistema completo y ensamblado.

### Análisis Cinemático

La posición y orientación de cualquier robot, puede realizarse mediante una representación matricial de  $4 \times 4$  elementos, conocida como Matriz de Transformación Homogénea (MTH), la cual está conformada por cuatro sub-matrices: de rotación (R), de posición (P) de perspectiva (Q) y de amplificación (1), tal y como se muestra en la ecuación 1.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} R & P \\ Q & A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xx} & R_{xx} & P_x \\ R_{xx} & R_{xx} & R_{xx} & P_y \\ R_{xx} & R_{xx} & R_{xx} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Una vez obtenido el diseño, se procedió a realizar el análisis cinemático del robot, por lo cual se utilizó el modelo de la figura 6 para la obtención de los parámetros Denavit-Hartenberg [Barrientos, et al, 1997], [Craig, 2006] y con ello construir la matriz de transformación homogénea de cada articulación, ecuación 2.

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para los tres grados de libertad que representan los movimientos axiales, y considerando que el origen del sistema base  $\{S_0\}$ , se halla en la parte central del primer servomotor, los parámetros quedaron definidos en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros Denavit-Hartenberg para el robot cartesiano propuesto.

Articulación	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
1	$90^\circ$	$l_{z01} + q_1$	$l_{x01}$	$-90^\circ$
2	$90^\circ$	$l_{z12} + q_2$	$l_{x12}$	$-90^\circ$
3	$0^\circ$	$l_{z23} + q_3$	$l_{x23}$	$0^\circ$

Donde,  $l_{z01} = 85\text{mm}$ , representa la distancia que existe entre el origen del sistema 0 y el origen del sistema 1 a lo largo del eje Z sobre el cual se genera el primer grado de libertad del robot, cuando se ha retraído lo máximo el robot. Esta distancia es debida a las dimensiones propias de los servomotores y a restricciones mecánicas en el espárrago. De la misma forma para los otros servomotores  $l_{z12} = 50\text{mm}$  y  $l_{z23} = 65\text{mm}$ . Mientras que la distancia entre sistemas a lo largo de los ejes X, producto de las dimensiones de los motores y de la estructura del robot, se representan por  $l_{x01} = 5\text{mm}$ ,  $l_{x12} = 35\text{mm}$  y  $l_{x23} = 60\text{mm}$ . Con los parámetros D-H del robot definidos en la tabla 1 y considerando las dimensiones físicas antes descritas, se construyen cada una de las matrices homogéneas para cada articulación y se multiplican entre ellas. Esta forma la matriz final queda definida por la ecuación 3.



$${}^0_3T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & q_2 + 50mm \\ 0 & 0 & 1 & q_3 + 70mm \\ 1 & 0 & 0 & q_1 + 180mm \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Extrayendo la sub-matriz de posición, se pueden determinar las posiciones  $\{X, Y, Z\}$  del efector final, como se expresa respectivamente en las ecuaciones 4, 5 y 6, las cuales quedan en función de las variables de desplazamiento.

$$p_x = q_2 + 50mm \quad (4)$$

$$p_y = q_3 + 70mm \quad (5)$$

$$p_z = q_1 + 180mm \quad (6)$$

### Sistema de Control y de Potencia

Esta etapa se encargará de enviar las señales eléctricas a los motores, de generar la comunicación con LabVIEW y de controlar el dispositivo. Para ello, se optó por utilizar la tarjeta Arduino Mega ADK, que contiene un firmware de código abierto, que permite tener un acceso fácil al desarrollo de este prototipo. Para el caso de trabajar con la potencia adecuada para mover los motores a pasos, se sugirió el uso de los drivers A4988 [MicroSystems, 2014], los cuales incluyen un regulador de corriente. Los motores usados en este proyecto son los NEMA 17 de tipo bipolar, son motores muy precisos e ideales para montar impresoras 3D, tienen un ángulo de paso de  $1.8^\circ$  (200 pasos por vuelta) y cada bobinado es de 1.2 A a 4 V, capaces de cargar con 3.2 kg/cm (44 oz\*in). Las conexiones de este circuito son entre los pines del Arduino Mega ADK y pines del driver A4988, tal y como se muestra en la figura 7.

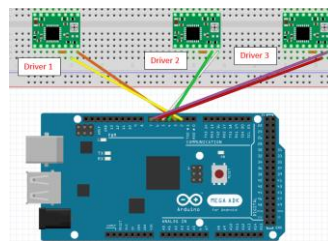


Figura 7 Diagrama de control driver de potencia y pines digitales de Arduino MEGA ADK.

Para la parte de potencia, las conexiones se realizan entre los 4 cables de las dos bobinas del motor NEMA 17, las fuentes de voltaje y el lado derecho del driver, como se muestra en la figura 8.

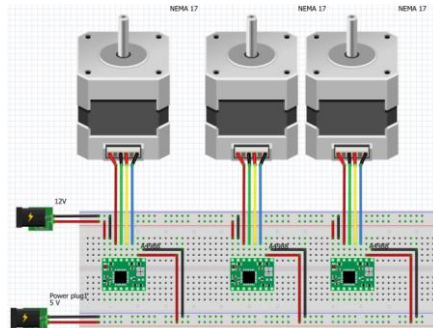


Figura 8 Diagrama de potencia entre motores a pasos NEMA 17 y driver A4988.

## Sistema de Monitoreo

El sistema de monitoreo, tiene la finalidad de establecer una comunicación entre una computadora y el robot. De esta forma el usuario puede manipular de forma fácil el dispositivo desde un panel de control, como el mostrad en la figura 9. Para este propósito, se utilizó el software LabVIEW, y el Firmware de LIFA BASE para utilizar las librerías de Arduino en LabVIEW.



Figura 9 Panel frontal del sistema de monitoreo.

A través del panel frontal, se puede controlar el movimiento de cada uno de los motores a pasos, estableciendo precisión de los movimientos y dirección de giro.

Por otra parte, el panel también permite observar las imágenes que capta la cámara que tiene el dispositivo, así como almacenar estas imágenes en archivos de computadora. La lógica de programación para el control de motores y para el sistema de monitoreo es mostrado en los diagramas de flujo de la figura 10 y figura 11 respectivamente.

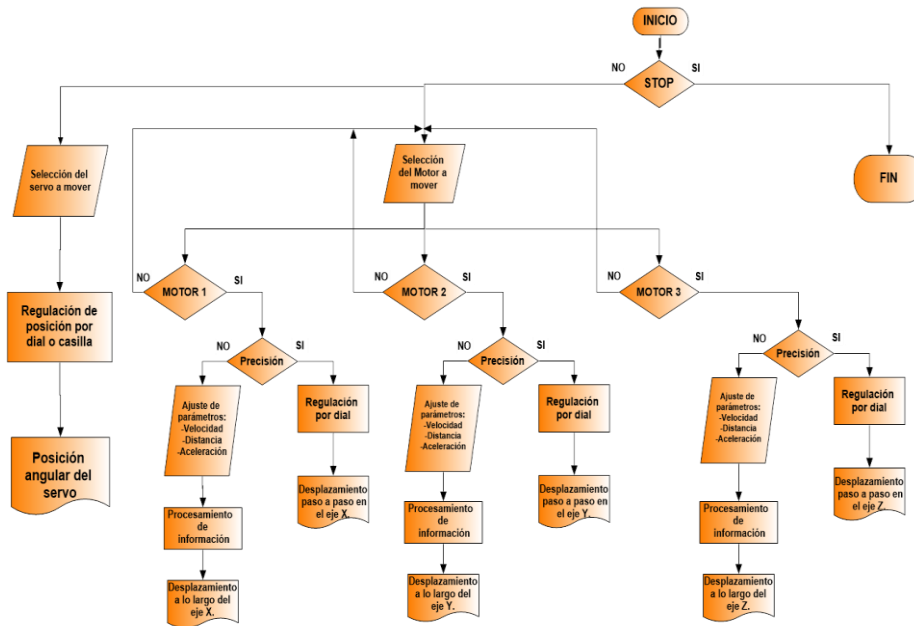


Figura 10 Diagrama de flujo del control de motores.

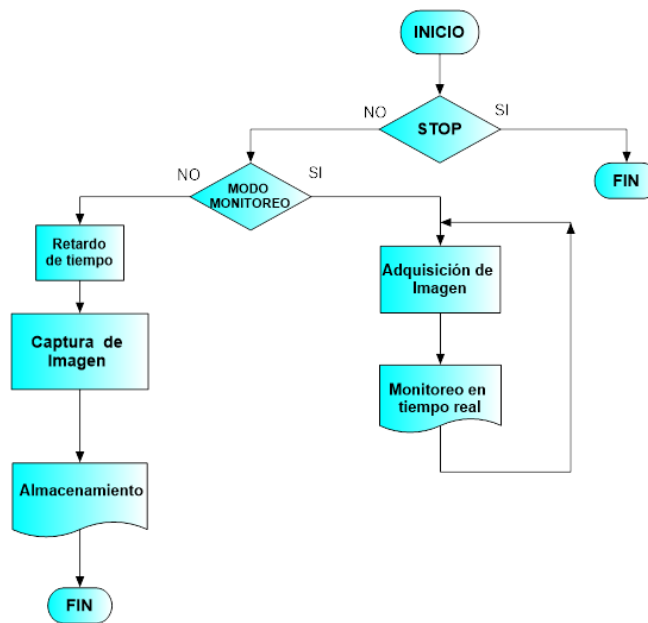


Figura 11 Diagrama de flujo del sistema de monitoreo.

### 3. Resultados

Con el desarrollo del sistema se puede monitorear adecuadamente una pieza birrefringente logrando apreciar el fenómeno foto-elástico [Negrete, 2009], [PhotoStress, 2016], [Kalpakjiang, 2008] a través de franjas de colores, que representan la distribución de esfuerzos residuales en la pieza, debido a que el material presenta propiedades de anisotropía óptica mejor conocida como birrefringencia. La visualización del fenómeno de fotoelasticidad se logra con los elementos presentados a continuación y en el orden que muestra la imagen de la figura 12.

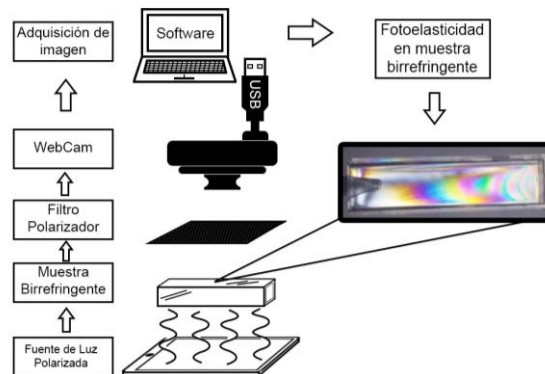


Figura 12 Sistema y proceso de monitoreo.

A continuación, se presentan una serie de piezas con propiedades birrefringentes, que fueron capturadas con el sistema mecatrónico desarrollado. En este trabajo se hace una evaluación cualitativa de las tensiones residuales en las diferentes muestras, solo se analizarán los puntos críticos de las piezas en base a las franjas captadas, tampoco se determina de que tipo son.

En la figura 13, se tiene una pieza de plástico que, al ser monitoreada, exhibe un gradiente de colores a lo largo de su estructura, indicando diferentes órdenes de franja. En este caso se describen franjas de color amarillas y azules, que son catalogadas como franjas de orden bajo, es decir zonas de la pieza con poca probabilidad de ruptura.

En la figura 14 se presenta una imagen de la misma pieza, en la que se describen otros puntos con diferente tonalidad a las mostradas anteriormente.

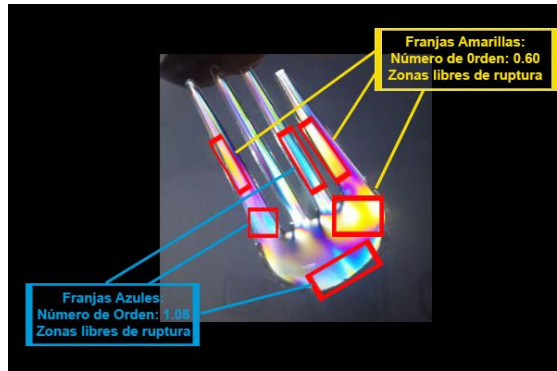


Figura 13 Pieza de material birrefringente observada a través del fenómeno de fotoelasticidad. Se muestran zonas de bajo riesgo de ruptura.

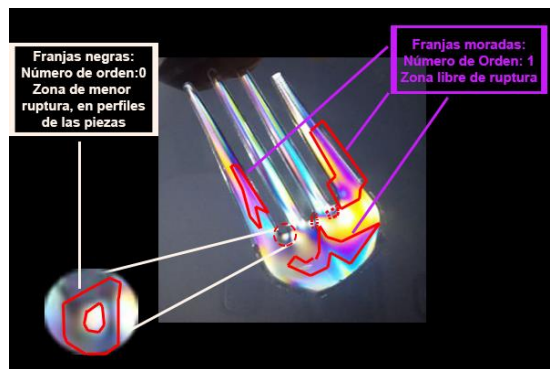


Figura 14 Pieza de material birrefringente observada a través del fenómeno de fotoelasticidad. Se explican los puntos de ruptura.

#### 4. Discusión

Con el desarrollo del sistema robótico cartesiano de 3GDL, se logró desplazar y posicionar una cámara VGA para la inspección de piezas con propiedades birrefringentes. El mecanismo de tornillos sinfín que se utilizó, permitió una resolución en el movimiento del manipulador del orden de 5 micras, lo que sugiere aplicaciones del robot en otros campos como la manufactura y el maquinado de piezas. Por otra parte la interfaz con LabVIEW, ha permitido controlar los desplazamientos del robot a través de la interfaz gráfica, indicándole al sistema cuanto se desea desplazar cada motor y con qué resolución se debe mover. La misma interfaz gráfica integra una pantalla de monitoreo a través de la cual se pueden observar en tiempo real las imágenes que la cámara está capturando, además de que se pueden grabar y almacenar en la computadora.

Por otro lado, con la aplicación del método foto-elástico para el monitoreo de piezas con propiedades birrefringentes y gracias a la caracterización de los órdenes de franja que representan el nivel de fractura provocado por las tensiones residuales, se ha logrado identificar las zonas que presentan mayores esfuerzos residuales en diferentes muestras de prueba que han sido analizadas. Este método de análisis, además de ser simple y económico en su implementación, también ofrece la posibilidad de evaluar al instante, la calidad en materiales birrefringentes y con ello sugerir medidas correctoras con el fin de prevenir fallos en futuros diseños y procesos de manufactura. Por otro lado el análisis de piezas birrefringentes a través del reconocimiento de franjas isocromáticas también ha sido útil para establecer zonas convenientes, para la aplicación fuerza externas sin riesgo o con el menor riesgo de fractura en el material.

## **5. Conclusiones**

Con el este trabajo se han integrado distintos campos de estudio de las ingenierías y ciencias, tales como la mecatrónica, la robótica, la óptica y los sistemas de procesamiento, desarrollando con ello un sistema optmecnónico con aplicaciones en la industria y en la investigación. Estas disciplinas además contribuyen con los resultados de este trabajo, a fortalecer campos de la ingeniería tales como, sistemas de manufactura, sistemas de calidad en la producción, automatización de procesos entre otros. Se ha logrado desarrollar un autómatas cartesiano de 3 GDL, que permiten colocar una cámara VGA en un espacio determinado por las dimensiones de prototipo, pero además, también puede adecuarse otro tipo de herramienta que pueda ser utilizada en otros procesos, por ejemplo en maquinado y grabado de piezas. Se desarrolló un sistema de desplazamientos micrométricos, aunque aún existen posibilidades de mejorar aspectos técnicos y de diseño que le dotarán al sistema de mayor precisión y control. El sistema de monitoreo, ofrece la posibilidad de que de una forma sencilla y simple, operadores o gente inexperta en ingeniería y mecánica de materiales, pueda realizar un diagnóstico inmediato respecto a la calidad de piezas birrefringentes. Finalmente, se puede concluir, que este sistema es de fácil

implementación y con ajustes pertinentes, se puede economizar en su diseño y construcción.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Barrientos A., Peñin L. F., Balaguer C. y Aracil R., Fundamentos de Robótica, 1era. Edición en Español, McGraw-Hill, 2007.
- [2] Berrio J., Arcos E., Zuluaga J., Corredor S., Diseño y construcción de un robot cartesiano de 3 grados de libertad, IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización CIIMA, 2015.
- [3] Briñez de León, Juan Carlos, A. R., Estudios de fotoelasticidad: desarrollos y aplicaciones, Revista Politécnica, pp. 27-36, 2013.
- [4] Canales C., Cosandier F., Boetsch G., et al., A complete manipulation platform for characterization of microcomponents, Optomechatronic Technologies, Proc. of SPIE Vol. 7266, 726605-1, 2008.
- [5] Carvajal, R. J., Godoy H. R., Rodríguez Q. W., Proyecto mecatrónico de brazo robot cartesiano integrado a una celda de almacenamiento y recuperación automatizada AS / RS de un Sistema Flexible de Manufactura FMS. ITECKNE, Vol. 6, Número 1, 2009
- [6] Craig John J. Introduction to Robotics: Mechanics & Control. Boston, Addison Wesley Publishing Company, 1986.
- [7] Gutiérrez Casiano, N. G. V., Efecto de la forma y el material de las probetas para determinar esfuerzos por fotoelasticidad, Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, pp. 415-422, 2016
- [8] Hernández Hernández, Carlos, R. M, Diseño, construcción y prueba de una máquina de control numérico por computadora (CNC), para fresado y perforado de placas fenólicas, *Pistas Educativas*, pp. 1148-1169, 2014
- [9] Kalpakjiang, S. y Schmi, S., Esfuerzos residuales, de Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Naucalpan, Edo. de México, Pearson, pp.95, 2008.
- [10] MicroSystems, A, DMOS Microstepping, Driver with Translator and Overcurrent Protection, Allegro MicroSystems, LLC, Worcester, Massachusetts, USA, 2014.

- [11] Morales González, Gustavo Adolfo, M. A., Simulación e interacción gráfica con robot manipulador industrial para el sensado y manipulación de objetos. *Pistas Educativas*, pp. 1-20, 2016.
- [12] Negrete, J. M., Color y longitud de onda de Análisis Experimental de Esfuerzos por medio de la fotoelasticidad, Coquimatlán, Colima, Trabajo de tesis, pp. 11, 2009
- [13] PhotoStress, Introducción al análisis tensional mediante photostress, Detroit, Estados Unidos, PhotoStress, 2016.
- [14] Rojas J, Mahla I, Muñoz G, Castro D, Diseño de un sistema robótico cartesiano para aplicaciones industriales, *Revista Facultad de Ingeniería, U.T .A. (chile)*, vol 11 n° 2, 2003.
- [15] Santoyo Mora, Mauro J. A., Sistema de Visión Multiespectral para el Análisis de Tejidos Biológicos, *Pistas Educativas*, pp. 1329-1347, 2014.
- [16] Schajer, G. S., *Practical residual stress measurement methods*, Wiley, 2013.