



DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE ELASTÓMEROS DELGADOS DE FORMA CERRADA

Julio C. Kota-Rentería ^a, Evgeny Kurmyshev ^a, Misael Jimenez-Gutierrez ^a

^aCentro Universitario de los Lagos, Universidad de Guadalajara, avatar.elemental@gmail.com, ekurmyshev@culagos.udg.mx, misael.jimenez@culagos.udg.mx.

RESUMEN

Se diseñó y desarrolló un sistema automatizado de caracterización de elastómeros delgados de forma cerrada, el cual hace uso de transductores y sistemas de visión artificial para realizar mediciones de características como la presión diferencial y volumen de bolsas neumáticas hechas de elastómeros. Dicho sistema experimental nos permite realizar diversos protocolos de pruebas para muestras de elastómeros delgados cerrados en diferentes escenarios, para recabar estadísticas de los resultados de experimentos. Con el análisis de los resultados se elaboran bases de datos del comportamiento del material los cuales sirven para la validación y/o desarrollo de un modelo matemático, con el cual se pretende simular computacionalmente robots inch-worm con sujeción por bolsas neumáticas.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del grupo de robótica móvil del Centro Universitario de los Lagos actualmente se trabaja en el diseño de robots tipo inch-worm, los cuales hacen uso de un sistema de locomoción por contracción-expansión de sus cuerpos, para su aplicación en ductos o tuberías [1, 2, 3]. En estos robots se utilizan sistemas de sujeción a las paredes internas de los ductos por medio de bolsas neumáticas hechas a base de elastómeros delgados, las cuales proporcionan adaptabilidad a ductos de geometrías y dimensiones variables.

Los elastómeros son polímeros con una variedad de propiedades físicas de mucho interés para las aplicaciones diversas; en particular, con un bajo módulo de elasticidad, lo cual les permite tener una gran capacidad de elongación [4, 5, 6]. La fuerza elástica y energía interna en un elastómero depende de su elongación y temperatura, de tal manera que estas relaciones funcionales no lineales son ecuaciones de estado de elastómero, y su forma caracteriza el material. Dichos materiales presentan no linealidad en la *relación funcional presión – volumen/forma* por lo cual es complicado predecir de manera teórica el comportamiento de inflado-desinflado de globos hechos de estos materiales. Existen trabajos de modelación matemática que hacen referencia a formas cerradas regulares como esferas y cilindros [5, 6]; estos, basándose en los principios de la termodinámica, mecánica estadística y mecánica de estado sólido con la elasticidad no lineal, describen características de la relación presión-radio de la esfera o el cilindro, como es el caso de la ecuación de Mooney-Rivlin para un globo esférico de material incompresible [5, Ec. (3.24)]:

$$[p] = 2s_+ \frac{d_0}{r_0} \left(\frac{r_0}{r} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^7 \right) \left(1 - \frac{s_-}{s_+} \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \quad (1)$$

En dicha ecuación, la diferencia de presión $[p]$ en el interior y exterior del globo se describe en función del radio r del globo con un grosor de la membrana d ; se asume que dichas magnitudes en el estado del globo desinflado toman los valores de d_0 y r_0 ; $s_+ = 3$ bar y $s_- = -0.3$ bar son



parámetros del modelo con valores dados para la temperatura del ambiente. Figura 1 representa la gráfica de la función (1), la cual tiene dos ramas ascendentes en pleno acuerdo con los experimentos.

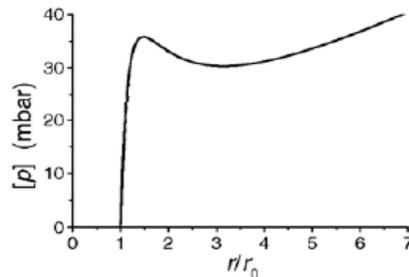


Figura 1.- Curva de relación presión-radio normalizado de un globo esférico [5, Fig. 3.4].

Sin embargo, respecto a globos de elastómeros de formas no regulares y grosores de membranas no uniformes se desconoce la existencia de trabajos realizados, por lo cual se plantea el desarrollo de un sistema de caracterización de globos no regulares de elastómeros delgados. Con dicho sistema se pretende elaborar una base de datos experimentales que permitirán el desarrollo de un modelo matemático de elastómeros delgados de formas cerradas para su implementación en un simulador computacional [7].

2. OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un sistema automatizado para caracterizar el proceso de inflado-desinflado de bolsas neumáticas de elastómeros delgados, por medio de la relación funcional entre la presión diferencial y el volumen/forma del globo.

Objetivos particulares

- Proponer e implementar diferentes protocolos de estudios experimentales de propiedades mecánicas para las bolsas neumáticas, tales como: rangos de elasticidad y plasticidad del material, así como el punto de rompimiento del material y el envejecimiento dinámico del material respecto a los ciclos de inflado-desinflado.
- Con la automatización del sistema experimental, minimizar los tiempos del proceso de pruebas para la adquisición de datos.
- En base de los datos experimentales adquiridos, elaborar un modelo matemático del proceso inflado-desinflado de los globos hechos de elastómeros.

3. PARTE EXPERIMENTAL

Uno de los objetivos de nuestro desarrollo experimental es optimizar los tiempos y costos de caracterización de elastómeros delgados. En base del análisis de métodos de caracterización de bolsas neumáticas de formas regulares se diseñaron los protocolos de pruebas, que pueden ser de dos tipos:

- **Inflado libre.** Obtener la dependencia funcional entre la presión-forma/volumen del globo. Hacer la comparación de la curva experimental con la teórica de uno de los modelos físico-matemáticos disponibles. El inflado se realiza de forma cuasi estática y el proceso será



adiabático, por pasos de tiempo, dejando establecerse la presión dentro de la bolsa en cada paso. Se realizan también pruebas de esfuerzo cíclicas y envejecimiento dinámico; inflado-desinflado cíclico en un rango de presión en la región elástica del material, midiendo los tiempos de desinflado natural (no asistido por succión) y el desinflado asistido. En cada paso del ciclo de inflado-desinflado se mide de manera automática la forma-volumen del globo y la presión.

- **Inflado restringido.** Se estudia la forma de la bolsa neumática, así como las fuerzas de sujeción que las bolsas ejercen sobre las paredes de los ductos, en particular observando el cambio de forma después de entrar en contacto el globo con la pared de la tubería. Se realiza también la medición de la fuerza de sujeción (fricción) de la bolsa con las paredes de la tubería, en posición vertical y algunos ángulos de inclinación (0° , 30° , 45° , 60° , 90°).

Las pruebas se realizaron en un ambiente controlado, con una temperatura entre 20 y 24 grados centígrados. En la etapa inicial de los experimentos se utilizaron bolsas neumáticas de elastómeros delgados, en particular globos DECORATOR para fiestas. Para que el sistema experimental sea capaz de cumplir con las necesidades que imponen los protocolos de pruebas, se determinó construir el sistema conforme al diagrama de bloques presentado en la figura 2:

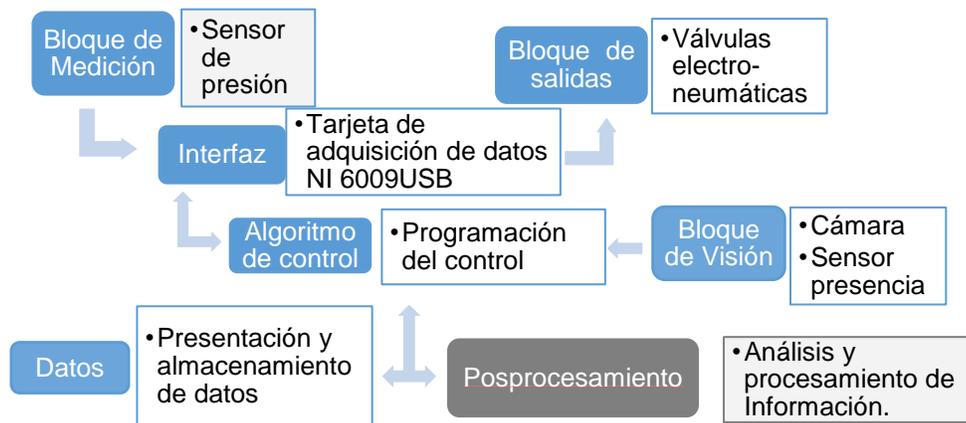


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema experimental

Los datos a medir son la presión y el volumen del globo, que serán adquiridos por un transductor de presión y una cámara RGB-D, respectivamente. Estos sensores están conectados a una unidad de procesamiento, la cual almacena los datos obtenidos para su posterior análisis y después de realizar los algoritmos correspondientes envía señales para el control del inflado-desinflado.

Para medir la presión interna se eligieron transductores de la marca Freescale, los cuales cuentan con temperatura interna compensada y calibrada. Estos se conectan a un amplificador de instrumentación el cual acondicionan el voltaje de salida para poder ser interpretado por la interfaz de entrada/salida. Dicha interfaz es el instrumento que establecerá las adecuaciones necesarias entre el hardware y la computadora. Para esto se eligió la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009, por su velocidad de transmisión de datos, así como por su resolución y compatibilidad que tiene con el software utilizado para la ejecución del algoritmo de control. Los puertos digitales de la tarjeta se utilizan para operar una etapa de acondicionamiento de señales de salida, la cual está



compuesta por relevadores, que al ser activados energiza un grupo de electroválvulas que permiten el paso de aire al interior del globo.

Como parte de los protocolos también se especifica la necesidad de medir el volumen del globo, lo cual se realiza por medio de un sistema de visión artificial; este subsistema adquiere imágenes RGB-D de una cámara Microsoft Kinect, para la identificación de la bolsa neumática dichas imágenes son sometidas al siguiente proceso [8]:

Algoritmo de visión artificial

- Definir las especificaciones de la cámara RGB-D.
- Alinear las imágenes RGB-D.
- Crear una nube de puntos con las imágenes Alineadas RGB-D.
- Crear una zona de interés.
- Triangular los puntos para generar una malla.
- Medir el área de un lado del globo y calcular el volumen por la definición de integral.

Los dispositivos que componen el sistema de caracterización se operan por medio de un algoritmo de control realizado en el software computacional Matlab, el cual está organizado de la siguiente manera:

Algoritmo de control del sistema

- Se inicializan los parámetros de todos los dispositivos a controlar.
 1. Se realiza la lectura de los sensores y la determinación del volumen.
 2. Se envía la información a las bases de datos.
 3. Se realiza el proceso de inflado del globo según un protocolo de prueba
- Si se detecta una caída súbita en la presión, se detiene el sistema, de lo contrario se va al paso 1.

4. RESULTADOS

Se desarrolló y validó el funcionamiento del equipo experimental. Con el equipo experimental desarrollado se han obtenido los primeros resultados que se muestran en las gráficas de la figura 3. Estas graficas expresan el inflado de los globos DECORATOR, como relación funcional entre la presión diferencial (kPa) contra el volumen del globo (m^3).

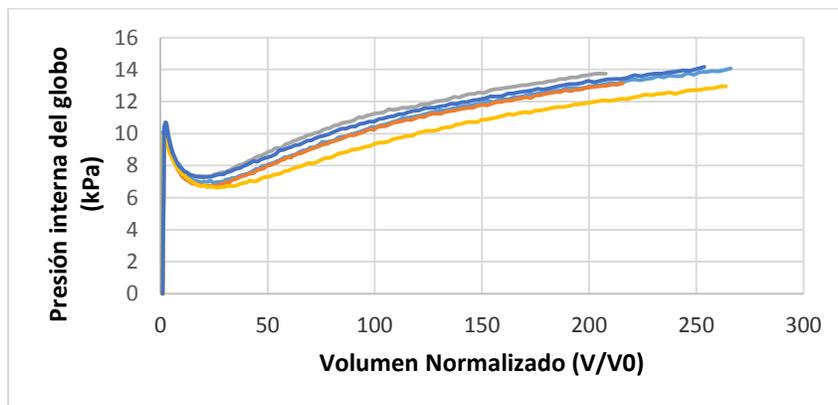


Figura 1.- Curvas experimentales de relación presión – volumen normalizado para cinco globos DECORATOR



5. CONCLUSIONES

Se diseñó y desarrolló un sistema experimental automatizado, para la caracterización de elastómeros delgados de forma cerrada, en el cual se utilizan componentes de medición como transductores de presión y sistemas de visión artificial.

Se obtuvo la relación funcional entre la presión y el volumen de los globos presentada en las gráficas de la figura 3. Como parte de la validación del sistema, podemos observar que el comportamiento funcional concuerda con la gráfica teórica presentada en la figura 1, para un globo esférico, que es de esperar porque los globos DECORATOR tienen una forma cercana a la esférica. A pesar de que éstas sí muestran una morfología idéntica, podemos observar una variedad de curvas que demuestran que los globos de esta prueba no son idénticos entre sí, debido a las variaciones en la forma, tamaño y grosor de la membrana.

Los primeros experimentos nos indican la versatilidad del sistema para la obtención de datos que nos servirán para la elaboración de un modelo matemático del proceso inflado-desinflado para la predicción del comportamiento de dichos globos en aplicaciones diversas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Brunete, A., Hernando, M., & Gambao, E. (2004). Drive modules for pipe inspection microrobots. In IEEE International Conference on Mechatronics and Robotics, Aachen.
2. Marchese, A. D., Katschmann, R. K., & Rus, D. (2014, September). Whole arm planning for a soft and highly compliant 2D robotic manipulator. In Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 554-560). IEEE.
3. Chen, I., Yeo, S. H., & Gao, Y. (2001). Locomotive gait generation for inchworm-like robots using finite state approach. *Robotica*, 19(05), 535-542.
4. Petrone, F., Lacagnina, M., & Scionti, M. (2004). Dynamic characterization of elastomers and identification with rheological models. *Journal of Sound and Vibration*, 271(1), 339-363.
5. I. Miller, P. Strehlow, Rubber and Rubber Balloons, Paradigms of Thermodynamics, Lect. Notes Phys. 637 (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004), DOI:10.1007/J93853.
6. Treolar L. R. G.: *The Physics of Rubber Elasticity*, 3rd Edición, Clarendon Press-Oxford, 2005.
7. Sjöberg, P., & Axelsson, F. (2010). Design of Equipment for Characterization of Elastomers Using Impact Testing.
8. Herrera, C., Kannala, J., & Heikkilä, J. (2012). Joint depth and color camera calibration with distortion correction. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 34(10), 2058-2064.