

Título: “Generador de pulsos de aire para un simulador cardíaco”

Martínez, Ariel E.^a; Craiem, Damián^b; Rodríguez, Eduardo E.^c

^a Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento

^b Instituto de Medicina Traslacional, Trasplante y Bioingeniería, Universidad Favaloro y CONICET

^c Instituto de Industria, Universidad Nacional de General Sarmiento

erodrigu@campus.ungs.edu.ar

Resumen

Se presenta el diseño de un sistema de bombeo de aire pulsado para uso en un simulador de ventrículo izquierdo. En un simulador distensible de silicona el sistema replica la variación de volumen ventricular. Está basado en una electrónica Arduino y un motor paso a paso, que acciona un sistema de bombeo de desplazamiento positivo a pistón, con transformación de movimiento rotatorio a lineal a través de una tuerca y un tornillo de precisión. Con este generador se replican las condiciones fisiológicas del bombeo ventricular en el ciclo diastólico-sistólico, con un caudal regulable de hasta 225 ml/s. Mediante programación es posible generar variantes al flujo para simular malfuncionamiento ventricular. Para el diseño se tuvo en cuenta el torque necesario del motor y la rapidez de respuesta para emular ciclos cardíacos de 60 pulsaciones por minuto. El torque del motor se midió con un freno de Prony especialmente fabricado. Mediante mediciones de presión se caracterizó el funcionamiento del sistema y se analizó la estabilidad y repetitividad de los pulsos generados. Este sistema de bombeo se va a usar con un fantoma de ventrículo izquierdo diseñado para experimentos in vitro de tomografía. Este desarrollo permitió ampliar la infraestructura necesaria para un proyecto de investigación de la UNGS. El relativo bajo costo de fabricación del sistema da lugar a una solución asequible para otros equipos de investigación. El trabajo se realizó en el marco de una beca de grado en docencia e investigación de un estudiante avanzado, Ariel Martínez, de Ingeniería Electromecánica.

Palabras clave: Bomba pulsátil, Arduino, flujo cardiovascular.

INTRODUCCIÓN

En las prácticas de adquisición de imágenes médicas se requiere contar con simuladores (denominados fantomas) como dispositivos de calibración y control de desempeño de los equipos. Con los fantomas también se realizan experimentos in vitro para la investigación científica [1]. En el caso de experimentos in vitro de tomografía cardíaca se requiere contar con un simulador distensible y un sistema electromecánico que lo impulse a fin de emular el cambio de volumen ventricular en sucesivos ciclos de diástole-sístole [2]. Un fantoma dinámico para estos experimentos tiene que ser alimentado con un flujo de fluido pulsátil que le permita replicar la variación del volumen fisiológico, tomando como parámetro de diseño a una persona adulta promedio. En este trabajo se expone el diseño de una bomba de aire de desplazamiento positivo a pistón que permite generar pulsos de aire a frecuencias cercanas a 1 Hz y lograr variaciones de volumen y de presión requeridas para el funcionamiento de un fantoma distensible de silicona. Se plantea el uso de electrónica de fuentes abiertas para obtener un

producto de poco costo y con facilidad de reproducción en caso que se requiera. El simulador se va a usar en proyectos de investigación en física médica y bioingeniería.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue fabricar un sistema de bombeo programable, de hardware y software abiertos, que permita generar diferentes funcionamientos periódicos de un simulador cardíaco para experimentos in vitro de tomografía cardíaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño de la bomba de desplazamiento positivo está pensado para usar un motor paso a paso Nema 34, de torque nominal de 12 N·m. La bomba se basa en la transmisión axial del movimiento de rotación del motor a un tornillo de precisión de 25 mm de diámetro con un paso de 10 mm, hacia una tuerca con bolas recirculantes. El motor está accionado con un driver (Yako YKD2608MH) que le permite realizar una vuelta con 400 pasos. Los pasos del motor se controlan

con una placa Arduino Due. Mientras el tornillo gira, transfiere el movimiento a la tuerca acoplada a un pistón. Una corredera inhibe cualquier torsión del eje del conjunto pistón-tuerca. Durante el funcionamiento se verificó que el conjunto sólo adquiere un movimiento lineal. La Figura 1 muestra el sistema fabricado.

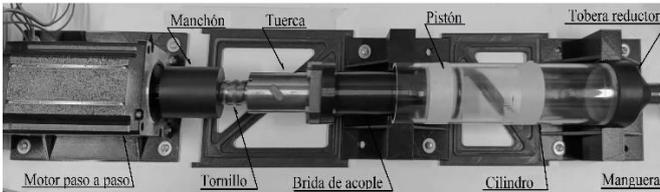


Figura 1: Sistema de bombeo de aire con motor paso a paso Nema 34 y tornillo de precisión y tuerca con bolas recirculantes

El pistón de bombeo es de polietileno y fue mecanizado especialmente para un cilindro fabricado con un tubo de acrílico de 3 mm de espesor y 53,5 mm de diámetro interior. Se realizó una rosca fina en uno de los extremos del tubo para fijar una tobera de salida, fabricada con polipropileno, con un diámetro de boquilla de 12,5 mm para poder acoplar una manguera flexible de tipo cristal de 3/4". La longitud del equipo es de 700 mm.

El torque del motor es crítico para el bombeo a realizar contra la resistencia que le ofrezca el fantoma elástico. Para la verificación del torque se consideró la situación más desfavorable de suponer que el pistón desplace agua (de mayor densidad y viscosidad que el aire), con un desplazamiento de 60 ml en cada ciclo de la bomba. Para modelar el problema se empleó como aproximación la ecuación de energía generalizada para fluidos en régimen estacionarios en una cañería [3]:

$$P_i + \rho \frac{v_i^2}{2} + g \rho z_i = P_f + \rho \frac{v_f^2}{2} + g \rho z_f + g \rho h_p \quad (1)$$

donde h_p contempla las pérdidas por reducciones y por fricción con la cañería. En (1) se supuso $z_i = z_f$ y una velocidad inicial v_i nula, para obtener:

$$P_i = P_f + \rho \frac{v_f^2}{2} + g \rho h_p \quad (2)$$

Con el supuesto que se va a mover 60 ml de agua por segundo, una presión final de 16 kPa, con una pérdida

de carga estimada en la manguera $h_p = 2$ mm, se obtiene una presión sobre el pistón de ~ 20 kPa, resultando una fuerza axial de ~ 20 N y un torque sobre el tornillo de ~ 1 N·m. Para verificar experimentalmente la capacidad del motor para proveer el torque requerido en distintas condiciones de trabajo, se realizó un ensayo con un freno de Prony [4]. El freno fue fabricado especialmente para el ensayo usando dos zapatas de madera.

Para analizar la estabilidad y repetitividad del sistema de bombeo se realizaron mediciones de presión para distintas amplitudes de la carrera del pistón y para distintos períodos de oscilación. Las mediciones se hicieron con el equipo funcionando y conectado a un fantoma de ventrículo izquierdo de silicona. Se usó un transductor de presión calibrado (PN PT111103, Acemedical), que se midió con un osciloscopio digital (Tektronix TBS 1102B, 100 MHz). Los datos de presión como función del tiempo fueron almacenados en una memoria USB para posterior análisis en una planilla de cálculo.

RESULTADOS

La Figura 2 muestra resultados del torque obtenido con el freno de Prony para el motor paso a paso Nema 34 utilizado. Se observa que el torque disponible del motor está garantizado en un amplio rango de velocidades de operación, dado que supera el valor requerido estimado.

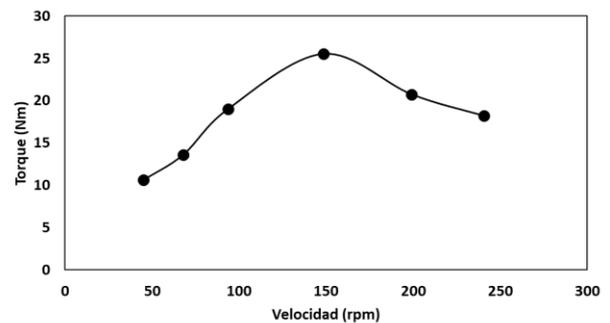


Figura 2: Resultado del ensayo de Prony. Torque del motor paso a paso para distintas velocidades.

En el sistema fabricado, el motor paso a paso es capaz de dar hasta cinco vueltas por segundo y producir un avance del pistón de hasta ~ 70 mm en ~ 500 ms. Esto permite simular en el fantoma elástico ciclos cardíacos alrededor de 60 latidos por minuto con variaciones de volumen aceptables, del orden de los

70 ml. El avance y el retroceso del pistón están programados de forma que su posición en el cilindro varía de acuerdo con una función armónica. La carrera de avance del pistón, mientras comprime el aire, produce la fase diastólica del fantoma en ~ 600 ms, mientras que la fase sistólica queda representada por una descompresión rápida en el retroceso del pistón en ~ 400 ms.

En la Figura 3 se muestra la medición de un ciclo de la presión en el fantoma producida con distintas carreras del pistón en el cilindro, entre 30 mm y 55 mm. Este cambio de la presión en un período causa la variación del volumen en el fantoma deformable que emula la dinámica muscular cardíaca. Se puede apreciar que la forma de las curvas de presión es casi independiente de la amplitud de la carrera.

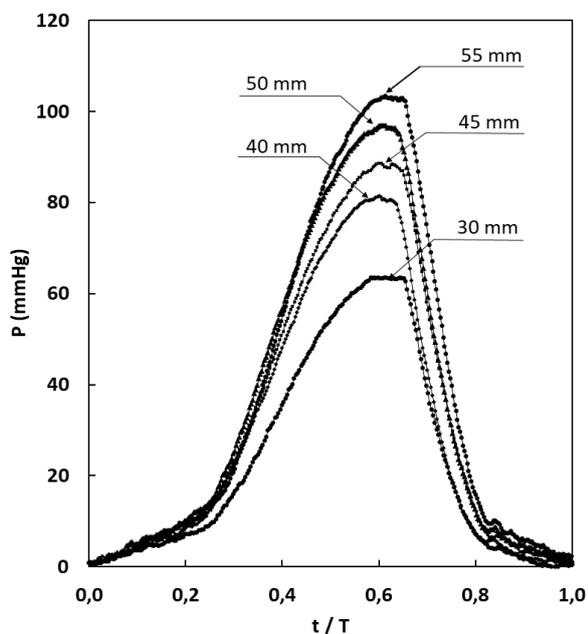


Figura 3: Presión en un ciclo de compresión-expansión para distintas carreras del pistón.

La Figura 4 presenta la medición de presión en el fantoma cuando está pulsado a distintas frecuencias, con la misma carrera del pistón. En la forma de las curvas se observa el efecto de la velocidad de compresión, con una conservación de la presión máxima al final de la carrera.

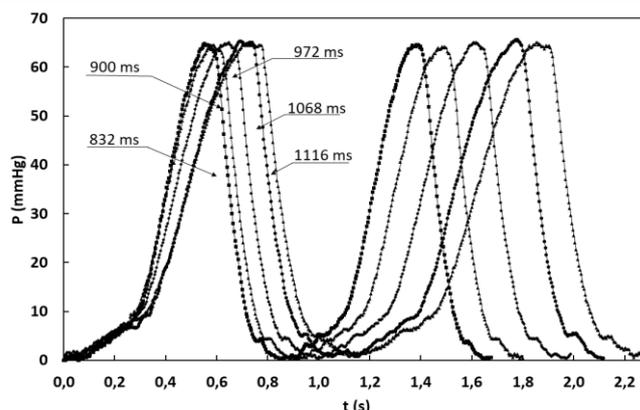


Figura 4: Presión a carrera constante del pistón para distintas frecuencias.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se logró diseñar, fabricar y caracterizar un sistema de bombeo pulsátil de desplazamiento positivo a émbolo que suministra un flujo variable que cubre el rango fisiológico. Se fabricó un freno de Prony para determinar la curva de torque del motor paso a paso a usar. El sistema de bombeo pulsátil forma parte del diseño de experimentos in vitro con un simulador dinámico de ventrículo izquierdo en un tomógrafo por emisión de positrones (PET).

AGRADECIMIENTOS

Trabajo correspondiente al Proyecto UNGS-30/4150, financiado parcialmente por fondos de la Línea A-CyTUNGS-2024. Ariel Martínez agradece a la Universidad Nacional de General Sarmiento una Beca en Docencia y Desarrollo Tecnológico y Social.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Calla, P.; Vargas, N.; Rodríguez, E.E. *et al.* (2019). Simulador cardíaco dinámico para estudios de medicina nuclear. *Revista Argentina de Ingeniería*, 13(5), 101-108.
- [2] Asit, K.P.; Hani A.N. (2004). Gated myocardial perfusion SPECT: Basic principles, technical aspects, and clinical applications. *Journal of Nuclear Medicine Technology*, 32(4), 179-187.
- [3] Chaudhury, R.A. *et al.* (2016). A High Performance Pulsatile Pump for Aortic Flow Experiments in 3-Dimensional Models. *Cardiovascular Engineering and Technology*.
- [4] Fundamentos del freno de Prony. https://es.wikipedia.org/wiki/Freno_Prony (recuperado el 1/7/24).