

# Análisis cinemático de un mecanismo basado en yugo escocés de un sistema dual de perturbaciones mecánicas

Martha Leticia León Valdez, Josué del Valle-Hernández, Francisco Alejandro Ramírez Díaz, Mauricio Valtierra Domínguez, Ángel Calderón Quijano, Carlos Alberto Trujillo Castellanos

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de León.

## Resumen

En este estudio se muestra un análisis cinemático de un "Sistema dual de perturbaciones mecánicas (SDPM)", aplicado al mecanismo basado en Yugo Escocés, con la finalidad de comparar y obtener la velocidad lineal y angular cuando este es alimentado por un actuador eléctrico mediante el uso de un encoder y un vibrometro incluyendo la relación de la fuerza con respecto a la velocidad, es decir, la fuerza que aplica el vástago a la zona de contacto del sistema. Los resultados se obtuvieron usando métodos analíticos y experimentales representados en graficas que muestran el comportamiento de la fuerza, la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del mecanismo con respecto al voltaje de alimentación.

## Abstract

In This study shows a kinematic analysis about a "Dual system of mechanical disturbances (SDPM)", It is applied to the mechanism that it is based on Yugo Scotch Yoke, with the target to compare and get the linear and angular speed, it means that when it feedback by an electric actuator through the use of an encoder and a vibrometer including the connection of strength with respect to speed, it gets when the strength is applied by the stem to the contact area of the system. The results were achieved through it using analytical and experimental methods represented in graphs that show the behavior of the strength, acceleration, speed and displacement of the mechanism with respect to the supply voltage.

**Palabras clave:** Yugo escocés, análisis cinemático, efecto triboeléctrico, perturbador mecánico.

**Keywords:** Scotch Yoke, kinematic analysis, triboelectric effect, mechanical disturbance.

## 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía limpia y renovable se ha vuelto uno de los temas más importantes a tratar, por el desarrollo, implementación y distribución de nuevos dispositivos que son alimentados con baterías, es imposible reciclar todo lo generado para minimizar los daños a la salud y el impacto ambiental. Es por ello que la recolección de energías limpias da un auge a las nuevas tecnologías las cuales buscan amplia versatilidad de aplicación como sistema de apoyo o alimentación de dispositivos de bajo consumo, y la generación de energía explorando todas las formas posibles para su obtención. Es por ello la constante búsqueda de crear dispositivos cada vez más autónomos y que sean capaces de aprovechar la energía de su entorno, este es uno de los campos de investigación más significativos hoy en día, generando la necesidad de diseñar, modelar y fabricar un nanogenerador triboeléctrico acoplado, el cual, mediante la transformación de energía del entorno en energía eléctrica, sea capaz de funcionar como fuente de alimentación [1], así como el modelamiento de sistemas de nanogeneradores eléctricos basado en los efectos triboeléctrico y piezoeléctrico, que buscan consolidar un modelo matemático que relacione todas las variables del entorno a tomar en cuenta para la generación eléctrica [2].

El SDPM (figura 1) tiene como finalidad generar vibraciones mecánicas mediante un golpeteo o fricción en una superficie de contacto, basado en un mecanismo de tipo yugo escocés a la cual es suministrado el movimiento

mecánico por motores eléctricos de cd. El SDPM cuenta con un control eléctrico para variar la frecuencia de golpeteo con la finalidad de caracterizar diversos sustratos dopados con nanopartículas y generar micro corriente mediante el efecto triboeléctrico. Por tal razón, este estudio se centra fundamentalmente en el análisis del mecanismo del yugo escoces, para establecer el rango de operación y la relación de la velocidad con la fuerza de contacto del SDPM que permitirá caracterizar diversos sustratos o materiales con efecto triboeléctrico a diferente velocidad y fuerza de contacto.

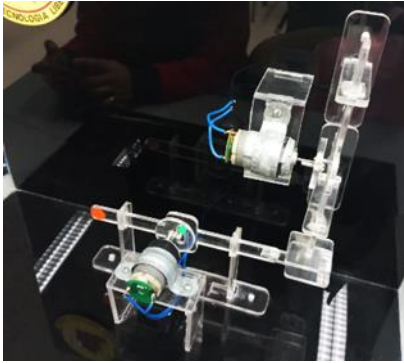


Figura 1. Modelo del SDPM

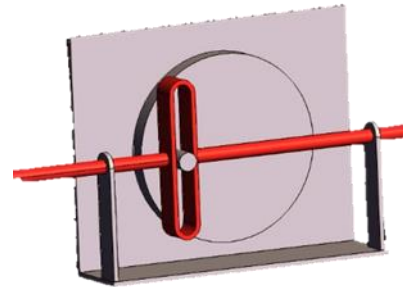


Figura 2. Ejemplo de un mecanismo de yugo escoces

El yugo escocés es un mecanismo plano que permite transformar un movimiento de entrada de rotación en un movimiento armónico de traslación alternativa en la salida. Su construcción puede ser con cuatro eslabones, incluyendo una deslizadera que se mueve en la ranura del eslabón de salida [3], ver figura 2. Esta configuración es común en válvulas, motores de combustión interna, actuadores de alta presión y máquinas de vapor [4]. También realiza la misma función que una manivela simple, pero el movimiento de salida lineal es una senoide pura, se analizará el movimiento de este mecanismo durante una vuelta completa de la barra de entrada, calculando el desplazamiento que experimenta la barra, la velocidad, la aceleración y la fuerza que produce con cada golpeteo en la zona de contacto.

## 2. ANÁLISIS Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

Partiendo del Sistema de manivela simple, se realizó el análisis cinemático con las ecuaciones (1-4) para calcular el desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza respectivamente [5].

$$X = r - r \cos \theta \quad (1)$$

$$V = rW_r \sin(W_r t) \quad (2)$$

$$a = rW_r^2 \cos(W_r t) \quad (3)$$

$$F = ma \quad (4)$$

Siendo  $r$  la longitud de la barra de entrada y  $W_r$  la velocidad angular del motor.

Se mide experimentalmente la velocidad del motor mediante las revoluciones por segundo, usando la plataforma Arduino y Encoder, el cual consta de un led infrarrojo y un fototransistor mirando uno al otro, así al contar la

cantidad de interrupciones que se generan en el haz de luz que hay entre estas dos piezas se pueden contabilizar las RPM (figura 4).

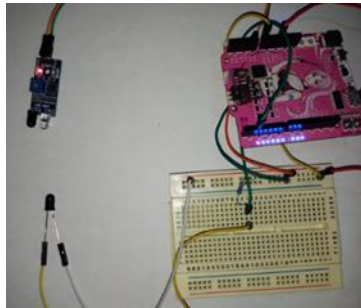


Figura 3. Encoder usado para las mediciones

En la tabla 1 se visualiza el comportamiento de la velocidad en revoluciones por minuto con respecto al voltaje de alimentación.

Tabla 1. Mediciones con encoder

Voltaje (V)	Corriente (mA)	RPS
5	148.3	12
4.5	145	11
4	135	10
3.5	130	8
3	118	7
2.5	102	6
2	95	4
1.5	112	3

Un factor importante es la masa de las partes móviles, en este caso, el pasador del mecanismo basado en yunque escoces. Para el calcular la masa se basó en la geometría de la pieza y la densidad del acrílico de alto impacto ( $1200 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ). En consecuencia, la masa obtenida de la pieza es de 60.45 g, en la figura 5 se aprecia el modelo realizado.

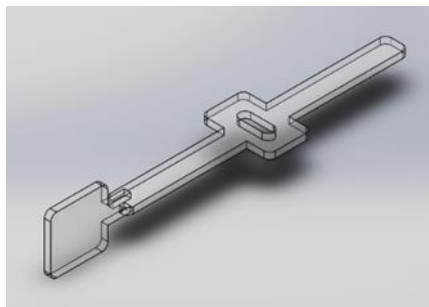


Figura 4. Modelo en 3D del pasador

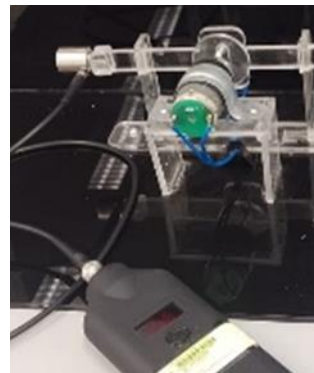


Figura 5. Vibrometro acoplado al SDPM

Posteriormente se realizaron las mediciones de velocidad mediante un sensor (vibrometro) para obtener la velocidad lineal del pasador de manera directa (figura 6), a diferencia del encoder, con el cual solamente se obtiene velocidad angular, teniendo que hacer cálculos teóricos. El modelo del instrumento es “vibrometer vib-10” [6], el

cual se montó en la parte trasera del pasador para obtener la relación del voltaje aplicado al motor, la corriente y la velocidad lineal del pasador, los resultados se pueden ver en la tabla 2.

**Tabla 2.** Mediciones con vibrometro

Voltaje (V)	Corriente (mA)	Velocidad (mm/s)
5	148.3	83.6
4.5	145	73.5
4	135	51.6
3.5	130	93.7
3	118	52.7
2.5	102	29.7

Para obtener los valores de fuerza, primero se requiere conocer la velocidad angular del motor, para ello se usaron tres métodos. El primero de estos es uno teórico, el cual primeramente se calculó la potencia del motor (ecs. 5-6). Con este valor y tomando las revoluciones por minuto del motor, medidas con el encoder, podemos calcular el torque entregado a la entrada (ecs. 7), esto en Kg\*m, finalmente se obtiene la velocidad angular (ecs. 8) con la potencia y el torque del motor, en la unidad de rad/s.

$$P = VA \quad (5)$$

$$Hp = \frac{P}{745.7} \quad (6)$$

$$T = \left( \frac{716Hp}{RPM} \right) (9.8066) \quad (7)$$

$$W_r = \frac{P}{T} \quad (8)$$

El Segundo método, midiendo la velocidad angular media directamente del motor con el encoder, convirtiendo las RPM en rad/s (ecs. 9). El tercer método consta en calcular la velocidad angular del motor mediante la medición de la velocidad lineal hecha con el vibrometro, para después usar la longitud de la barra de entrada (ecs. 10). Una vez teniendo la velocidad angular calculada con cada método, se procede a calcular la fuerza de golpeo en la superficie de contacto.

$$W_r = RPM \frac{\pi}{30} \quad (9)$$

$$W_r = \frac{V_{lineal}}{r} \quad (10)$$

### 3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los gráficos (figura 6-9) con los resultados pico del desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza con respecto al voltaje. En la figura 6 se observa la variación del desplazamiento contra el voltaje el cual permanece constante con un movimiento de 25 mm en cualquier valor de voltaje, por lo cual se puede garantizar un posicionamiento fijo. Cabe mencionar que el mecanismo comenzó a funcionar a 1.5 V, ya que a partir de este se rompió la inercia del sistema. En la figura 7 se muestran la variación de la velocidad contra el voltaje la línea de color azul representa el cálculo teórico de la velocidad en la corredera, que al ser comparada son muy próximas entre sí, el grafico en color gris representa la medición de empleando el equipo SPM, Vibrometer VIB-10 con un transductor de Vibración TRV-01 ya que este debe ser acoplado directamente al mecanismo lo cual incrementa el peso provocando que la velocidad baje por ser un sistema de medición invasivo, además que el equipo se ve limitado en sus mediciones hasta un rango de 99 mm/s, en cambio el uso del sensor de proximidad hw 201 no es invasivo permitiendo que la velocidad no se vea afectada severamente.

La figura 8 muestra la variación de la aceleración contra el voltaje donde se observa que el cálculo teórico mostrando un comportamiento equivalente entre curva teórica y la del encoder, y vuelve nuevamente a notarse que derivado del incremento de peso por el sensor y elementos de acoplamiento del Vibrometer VIB-10 es necesario el aumento del voltaje más alto para lograr la aceleración y velocidad obtenida.

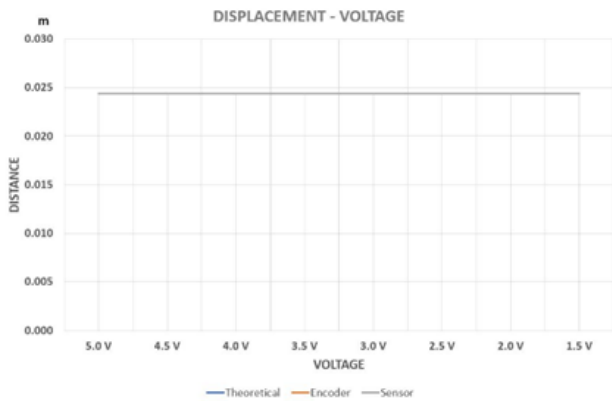


Figura 6. Variación del desplazamiento vs voltaje

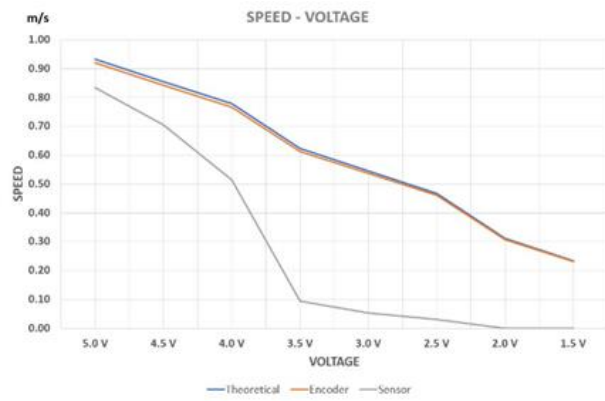


Figura 7. Variación de la velocidad vs voltaje

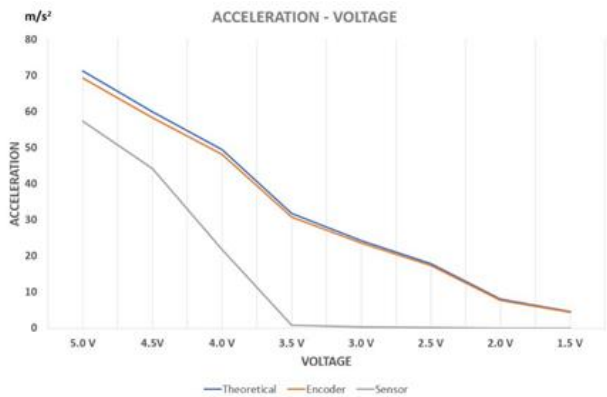


Figura 8. Variación de la aceleración vs voltaje

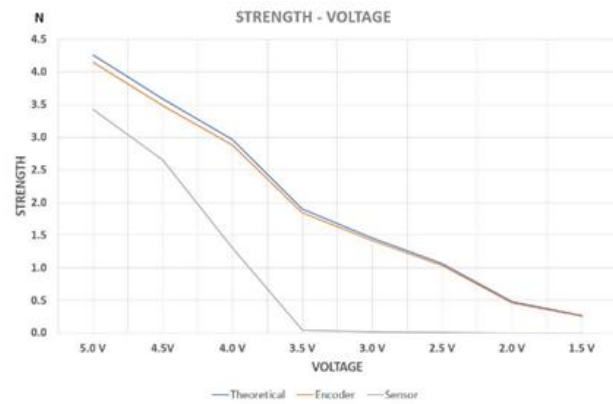


Figura 9. Variación de la fuerza vs voltaje

En la figura 10 se visualiza la variación de la fuerza de contacto con respecto a la velocidad lineal de mecanismo basado en yunque escoces, este resultado permitirá caracterizar diferentes materiales o sustratos dopados con nanopartículas con efecto triboeléctrico a velocidades específicas, lo cual permitirá en trabajos futuros generar aplicaciones específicas de generación de microcorrientes a diferentes velocidades de contacto.

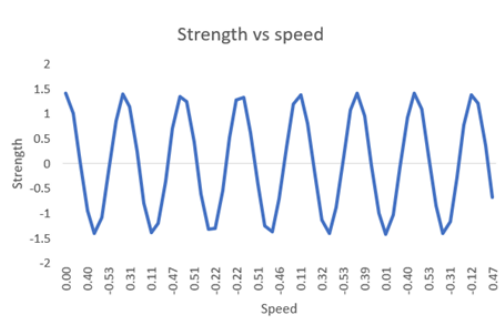


Figura 10. Variación de la fuerza vs velocidad

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De los tres métodos empleados para cálculo y medición del desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza, resultaron muy próximos entre sí, el teórico y la medición con el encoder, esta diferencia entre ellos de 1.42 %, lo cual no fue el caso del método con el SPM, Vibrometer VIB-10, ya que esta comparación de los primeros dos, tuvo discrepancias hasta de un 90%, cabe mencionar que solamente tres de las mediciones fueron trazables por cuestiones del intervalo de operación del Vibrometro VIB-10, ya que al ser una medición de forma invasiva afecta directamente a la operación del mecanismo, en la cual es necesario aplicar un multiplicador x10 a la medida mostrada para llegar a los valores obtenidos teóricamente. Dado lo anterior resulta necesario efectuar como trabajo futuro la caracterización del equipo SPM, Vibrometer VIB-10 dentro de su intervalo de operación considerando las afectaciones que produce por su acoplamiento invasivo en el sistema.

En cuanto al mecanismo fue observable que en los valores menores 1.5 V aplicados al motor este no fue capaz de generar movimiento en el mecanismo detectando un voltaje mínimo de operación que muy probablemente puede ser mejorado al disminuir la fricción entre los elementos mecánicos. Pero a pesar es aplicable caracterizar diferentes materiales o sustratos dopados con nanopartículas con efecto triboeléctrico a velocidades específicas.

Así que tomando en cuenta todos estos aspectos y analizando lo anterior, para mayor certidumbre en las mediciones es necesario emplear sistemas de medición no invasivos, revisar el mecanismo para identificación de zonas de fricción en la posibilidad de aumentar la eficiencia mecánica.

#### REFERENCIAS

- [1] López Lagunes, O. (2020, febrero). Diseño y modelado de un nanogenerador de energía eléctrica para sensores de la industria 4.0. Universidad Veracruzana. Recuperado 20 de diciembre de 2022, de [https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis\\_Octavio-Lopez-Lagunes.pdf](https://www.uv.mx/veracruz/miaplicada/files/2021/07/Tesis_Octavio-Lopez-Lagunes.pdf)
- [2] Molina Chafuelan, M. F. (2021). Modelamiento de un sistema de nanogeneradores eléctricos basado en los efectos tribo y piezoeléctrico [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Recuperado de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11214>
- [3] Pérez, A. (18 de Septiembre de 2021). Mecanismo de yugo escocés. Obtenido de mecapedia [http://www.mecapedia.uji.es/pages/mecanismo\\_de\\_yugo\\_escoces.html](http://www.mecapedia.uji.es/pages/mecanismo_de_yugo_escoces.html)
- [4] Sedong Kim, Hee-Geun Song, Dae-Chul Lee, Kwang-Bae Lee and Hyomin Jeong (2018) Torque Analysis of Scotch Yoke Type Hydraulic Actuator.
- [5] Sánchez, A. C. (7 de Febrero de 2021). Análisis Yugo Escocés - Axel López. Universidad Tecnológica de Tlaxcala.
- [6] AB, SPM Instrument. (Octubre de 2003). vibrometer vib-10 spm. Obtenido de SPM: [https://archive-resources.coleparmer.com/Manual\\_pdfs/98850-10.pdf](https://archive-resources.coleparmer.com/Manual_pdfs/98850-10.pdf)

Correo de autor de correspondencia: [josue.delvalle@leon.tecnm.mx](mailto:josue.delvalle@leon.tecnm.mx)