

Análisis e interpretación de la cinemática del tren alternativo según giro angular del cigüeñal

Analysis and interpretation of the kinematics of the reciprocating train according to the angular rotation of the crankshaft

Luis Baldemar Molina Morales¹ , Edwuin Paúl Lisintuña Toapanta² , Víctor Fabricio Moreno Riquero³ , Miguel Ángel Briones Espinoza⁴ , Manuel Rodrigo Passo Guamangate⁵ 

¹ Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, luismolina@itscv.edu.ec, Quevedo, Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, edwuinlisintuna@itscv.edu.ec, Quevedo, Ecuador

³ Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, victormoreno@itscv.edu.ec, Quevedo, Ecuador

⁴ Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, miguelbriones@itscv.edu.ec, Quevedo, Ecuador

⁵ Instituto Superior Tecnológico Ciudad de Valencia, manuelpasso@itscv.edu.ec, Quevedo, Ecuador

Autor para correspondencia: manuelpasso@itscv.edu.ec

RESUMEN

En este artículo se presentan los procedimientos realizados para medir y analizar la variación de la velocidad angular del émbolo de un motor de combustión interna de 2000 cc de cilindrada. Además, el artículo trata aspectos importantes de la medición de las oscilaciones de desplazamiento, aceleración y velocidad del émbolo. El método se basa en el desarrollo de un modelo matemático para obtener las curvas cinemáticas de comportamiento en el tren alternativo. El principio basado en función de las geometrías del pistón, biela y cigüeñal que también se utiliza para medir la velocidad angular real del árbol de levas teniendo en cuenta la relación 2 a 1, y este artículo tiene como objetivo demostrar la posibilidad de medir la velocidad y aceleración angular real del émbolo según el avance angular del cigüeñal. El método fue creado de forma completamente independiente durante las pruebas de investigación y desarrollo para motores de combustión interna. Este método es específico por su particular adaptabilidad para su uso en motores de potencia teniendo muy en cuenta la geometría del tren alternativo. El objetivo principal de este artículo es realizar una contribución práctica/teórica para todas las investigaciones más interesantes sobre el uso de la velocidad angular del émbolo como herramienta de diagnóstico para identificar el funcionamiento irregular del motor. El resultado del análisis muestra el comportamiento de la cinemática en un motor de 2000 cc, verificando que cada desplazamiento, velocidad y aceleración generada en base al giro del cigüeñal se relacione de manera directa o indirecta a la conducta de las pruebas mencionadas, determinando de manera efectiva la influencia de los parámetros ambientales en la función de cada comportamiento del émbolo que actúa en todo el segmento del pistón, biela y cigüeñal.

Palabras clave: Aceleración; Cigüeñal; Desplazamiento; Geometría; Velocidad

ABSTRACT

This paper presents the procedures used to measure and analyze the variation in the piston angular velocity of a 2000 cc internal combustion engine. In addition, the paper deals with important aspects of measuring displacement, acceleration and piston speed oscillations. The method is based on the development of a mathematical model to obtain the kinematic curves of behavior in the reciprocating train. The principle based on the geometries of the piston, connecting rod and crankshaft is also used to measure the actual angular velocity of the camshaft taking into account the 2 to 1 ratio, and this paper aims to demonstrate the possibility of measuring the actual angular velocity and acceleration of the piston according to the angular advance of the crankshaft. The method was created completely independently during research and develop-

ment tests for internal combustion engines. This method is specific for its particular adaptability for use in power engines taking into account the geometry of the reciprocating train. The main objective of this article is to make a practical/theoretical contribution to all the most interesting research on the use of piston angular velocity as a diagnostic tool to identify irregular engine operation. The result of the analysis shows the behavior of the kinematics in a 2000 cc engine, verifying that each displacement, speed and acceleration generated based on the crankshaft rotation is directly or indirectly related to the behavior of the mentioned tests, effectively determining the influence of the environmental parameters on the function of each piston behavior acting on the entire piston, connecting rod and crankshaft segment.

Key words: Acceleration; Crankshaft; Displacement; Geometry; Velocity

1. INTRODUCCIÓN

En base (Mena, 2019; Pulkrabek, 2004) en este análisis, se pretende determinar el comportamiento cinemático del conjunto de pistón. Cada pieza del conjunto de pistón se analizó utilizando las ecuaciones del movimiento del mecanismo de manivela deslizante. La Tabla 1 muestra la configuración del motor a la que se debe aplicar el mecanismo de manivela deslizante de un motor debido a las fuerzas de combustión e inercia durante el funcionamiento del motor. Además, también se ve afectado por las fuerzas centrífugas de las piezas giratorias (Cakir, 2021). Para analizar el mecanismo de manivela deslizante del motor específico, se debe realizar el cálculo de la velocidad angular del motor y el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del pistón. Por lo tanto, para calcular los parámetros de la cinemática se requiere los datos adjuntos de la tabla 1, en el cual, se hace uso de parámetros como el diámetro del pistón, carrera, relación de compresión, longitud de biela, número de cilindros y avance de encendido, datos muy importantes para dar inicio con el cálculo de estos valores cinemáticos:

Tabla 1. Variables de la geometría del motor de combustión interna

UNIDADES		
Diámetro pistón	85	mm
Carrera	88	mm
Relación de compresión	10	:1
Longitud de biela	150	mm
Número de cilindros	4	
Avance al encendido	10	°

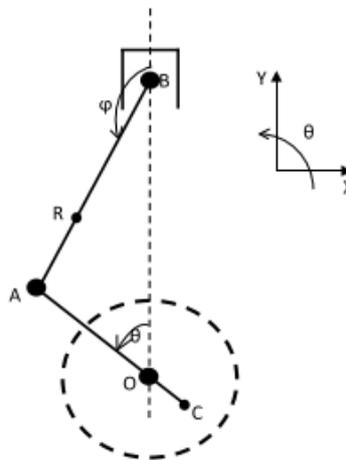
Según (Gupta, 2012; Guzzella & Onder, 2009) menciona que los motores de combustión interna de gasolina son aquellos que queman su combustible, que es una mezcla de aire y gasolina, desde el carburador o inyector dentro del cilindro. Estos motores convierten la energía química almacenada en su combustible en energía térmica durante la carrera de potencia del pistón (Viet Nguyen & Nguyen Duy, 2018; Wani, 2020). La energía térmica producida por la combustión del combustible se utiliza para el movimiento del pistón (Heywood, 2018; Stone, 1999). Durante el funcionamiento del motor de cuatro tiempos del pistón, varias partes del motor se ven sometidas a diferentes tensiones. También algunas partes sufren deformaciones. Todas estas

tensiones y deformaciones deben estudiarse para que el motor de gasolina pueda diseñarse de manera óptima (Jatkar & Dhanwe, 2013). Las magnitudes, variaciones y tiempos de exposición a las tensiones y temperaturas experimentadas son los principales factores que controlan los componentes del motor de combustión interna en servicio. La función del análisis de tensiones es calcular estas cantidades para poder predecir la vida útil de los componentes (Bulatović et al., 2011).

En base a las variables de la geometría del tren alternativo se menciona que la cinemática del mecanismo de manivela está formada por pistón, biela y cigüeñal (Nigus, 2015). En la formulación del mecanismo de manivela, como la cinemática del pistón y la cinemática de la biela de un motor, se indican los parámetros de un motor ya existente en las tablas 1.

Para el modelado cinemático del movimiento de la biela que es un eslabón importante dentro de un motor de combustión. Conecta el pistón al cigüeñal y es responsable de transferir potencia del pistón al cigüeñal y enviarla a la transmisión. La biela, como un componente del mecanismo del cigüeñal, es crucial para formular la cinemática de la biela (Nigus, 2015).

Figura 1. Modelo simplificado del tren alternativo



Fuente: (Viet Nguyen & Nguyen Duy, 2018)

En la figura 1 se muestra un modelo simple de un motor de combustión interna que consiste en un pistón ubicado en un cilindro que está conectado al cigüeñal a través de la biela y simplificado para moverse en un plano, con símbolos $AB = l$ (longitud de la biela), $AR = j_l$ (centro de gravedad de la biela desde el centro del muñón del cigüeñal), $OA = r$ (radio de giro del cigüeñal) y $OC = h$ (centro de masa del cigüeñal desde el centro del cojinete principal) (Bulatović et al., 2011; Nigus, 2015).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En base a (Bolivar, 2012; Fernández & Baptista, 2013) se ha determinado la metodología para el análisis e interpretación de la cinemática que actúan en el pistón en función del despla-

miento angular del cigüeñal puede ser abordada mediante los siguientes pasos:

Definición del sistema: Identificar el sistema a estudiar, en este caso, el mecanismo del pistón y su relación con el cigüeñal.

Modelado geométrico: Crear un modelo geométrico del mecanismo. Esto incluye definir las dimensiones del pistón, la biela y el cigüeñal, así como su disposición en el espacio.

Establecimiento de parámetros: Definir los parámetros de entrada, como la velocidad angular del cigüeñal, la longitud de la biela, el diámetro del pistón, entre otros.

Ecuaciones de movimiento: Derivar las ecuaciones que describen el movimiento del pistón en función del tiempo. Esto puede incluir el uso de coordenadas polares o cartesianas.

Análisis cinemático: Utilizar las ecuaciones derivadas para analizar aspectos como:

- Desplazamiento: La posición del pistón en función del ángulo de rotación del cigüeñal.
- Velocidad: La velocidad del pistón en función del tiempo y rotación del cigüeñal.
- Aceleración: La aceleración del pistón, que puede ser calculada a partir de la velocidad en función del tiempo y rotación del cigüeñal.

Análisis de resultados: Interpretar los resultados obtenidos de las simulaciones o pruebas en el modelo matemático y compararlos con modelos teóricos o experimentales. Evaluar la influencia de diferentes parámetros en el comportamiento del pistón.

Optimización: Si es necesario, ajustar los parámetros del diseño para mejorar el rendimiento del pistón, como la eficiencia del motor o la reducción de vibraciones.

Documentación: Registrar todo el proceso, resultados y conclusiones para futuras referencias o para la presentación a otros interesados.

Esta metodología proporciona un enfoque sistemático para analizar la cinemática del pistón en un motor, permitiendo optimizar su funcionamiento y entender mejor su comportamiento dinámico.

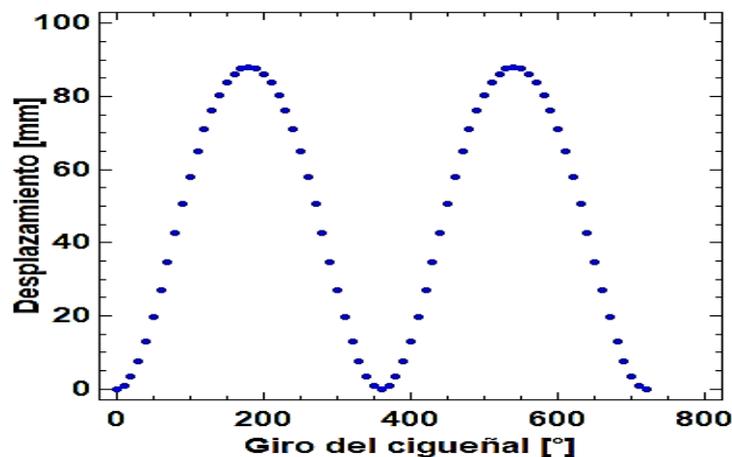
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

Para dar inicio con la parte de resultados es necesario tener una base de fórmulas de la matemática del automóvil el cual tendrá variaciones en función del giro angular del cigüeñal.

Para este apartado del análisis del desplazamiento se basa en el recorrido o carrera que realiza el pistón en su recorrido del PMS al PMI. Desarrollando pruebas de variación angular del cigüeñal de 10° de escala hasta llegar a los 2 giros del cigüeñal.

Figura 2. Gráfica desplazamiento vs giro del cigüeñal
Gráfico de Desplazamiento vs Giro del cigüeñal



Fuente: Statgraphics

La figura 2 muestra los puntos de dispersión del desplazamiento o recorrido del pistón “carrera” en base al giro del cigüeñal, teniendo datos como el punto máximo de desplazamiento en el PMS con 88 mm a 180° y 540° y el punto mínimo de desplazamiento en el PMI con 0 mm a 0°, 360° y 720°, concluyendo que de acuerdo a la figura mostrada se cumple 2 giros del cigüeñal o 720°, teniendo 2 recorridos del pistón y 1 ciclo termodinámico.

En base la gráfica mostrada del desplazamiento vs giro del cigüeñal se presenta la siguiente ecuación de regresión ajustada:

- Variable independiente X: Giro del cigüeñal (°)
- Variable dependiente Y: Desplazamiento (mm)

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo ajustado para describir la relación entre Desplazamiento y Giro del cigüeñal.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$(\text{Desplazamiento} = 49,0825 - 0,0000140785 * \text{Giro del cigüeñal}^2 \quad (1))$$

Esta ecuación está ajustada a un rango de confianza del 95%, el cual la carrera sería dependiente del ángulo de giro del cigüeñal.

Análisis de la velocidad del émbolo

A continuación, se realiza el análisis del comportamiento matemático de la velocidad del émbolo en función del giro de cigüeñal, el cual se tendrá una magnitud de cm/s.

Se usó la siguiente ecuación matemática:

$$V_e = R_c * N * \sin(\theta) + \lambda * \sin(2\theta) / 2$$

La velocidad con que se desplaza el pistón en su recorrido del PMS al PMI viene determinado por radio de giro de cigüeñal, revoluciones del motor, expresión trigonométrica del ángulo de

giro del cigüeñal y una relación del radio de giro del cigüeñal en función de la longitud de biela, ya que todos estos parámetros determinan directamente proporcional a la velocidad del pistón.

Donde:

V_e =Velocidad del émbolo

R_c =Radio de giro del cigüeñal

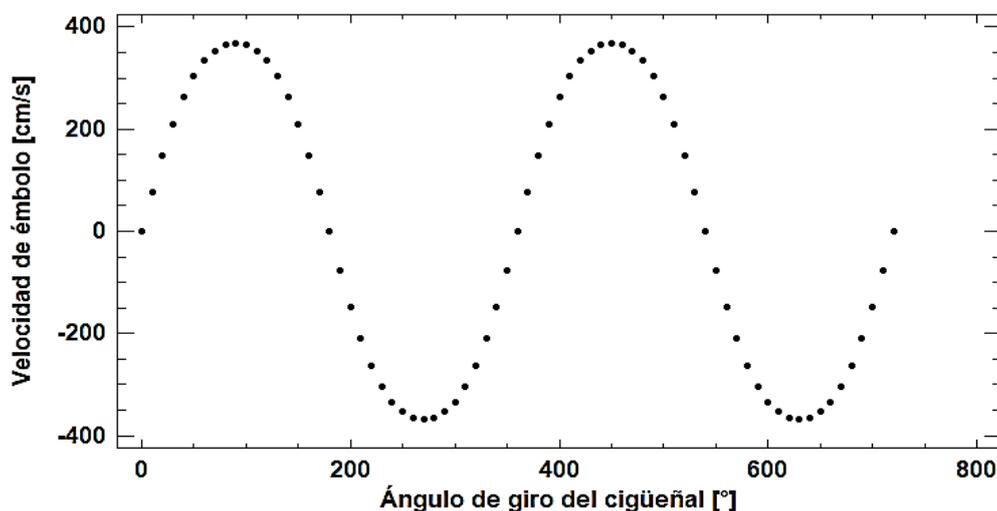
N =Revoluciones del motor

α =Ángulo de giro del cigüeñal en radianes

λ =Relación radio de giro del cigüeñal/longitud de biela

En base a esta ecuación se pudo obtener los siguientes puntos de dispersión:

Figura 3. Gráfica de dispersión de velocidad del émbolo vs ángulo de giro del cigüeñal



Fuente: Statgraphics

La gráfica muestra los puntos de dispersión el cual indica que las velocidades máximas de subida se dan cuando el cigüeñal se encuentra a 90° en proceso de admisión en el punto más bajo de la aspiración y 450° en el punto más bajo del tiempo de explosión e iniciando el escape con una velocidad del pistón de 360 cm/s, de la misma manera se puede observar las velocidades máximas de bajada a 270° en proceso de inicio de la compresión y 630° en medio recorrido del tiempo de escape con una velocidad de bajada de 360 cm/s y de la misma manera se aprecia las velocidades muertas o neutras cuando el cigüeñal se encuentra en 0°, 180°, 360°, 540° y 720° de 0 cm/s a 780 rpm.

Análisis de la aceleración del émbolo

Se usó la siguiente ecuación matemática:

$$(\alpha\omega = R_c * N^2 * [\cos(\alpha) + \lambda * \cos(2\alpha)] / 100) \quad (3)$$

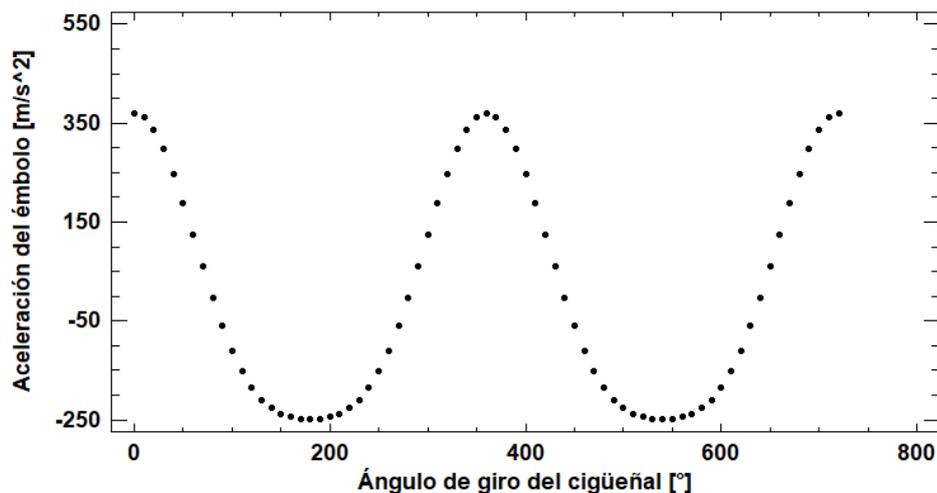
Al igual que la ecuación para la velocidad, la aceleración está directamente relacionada al radio de giro del cigüeñal, revoluciones del motor y una función trigonométrica del ángulo de giro del cigüeñal.

Donde:

$$\alpha\omega = \text{Aceleración angular}$$

A continuación, se realice el análisis del comportamiento de la aceleración del émbolo en función de los parámetros del giro angular del cigüeñal, su magnitud es m/s^2 .

Figura 4. Gráfica de la aceleración angular del émbolo vs ángulo de giro del cigüeñal

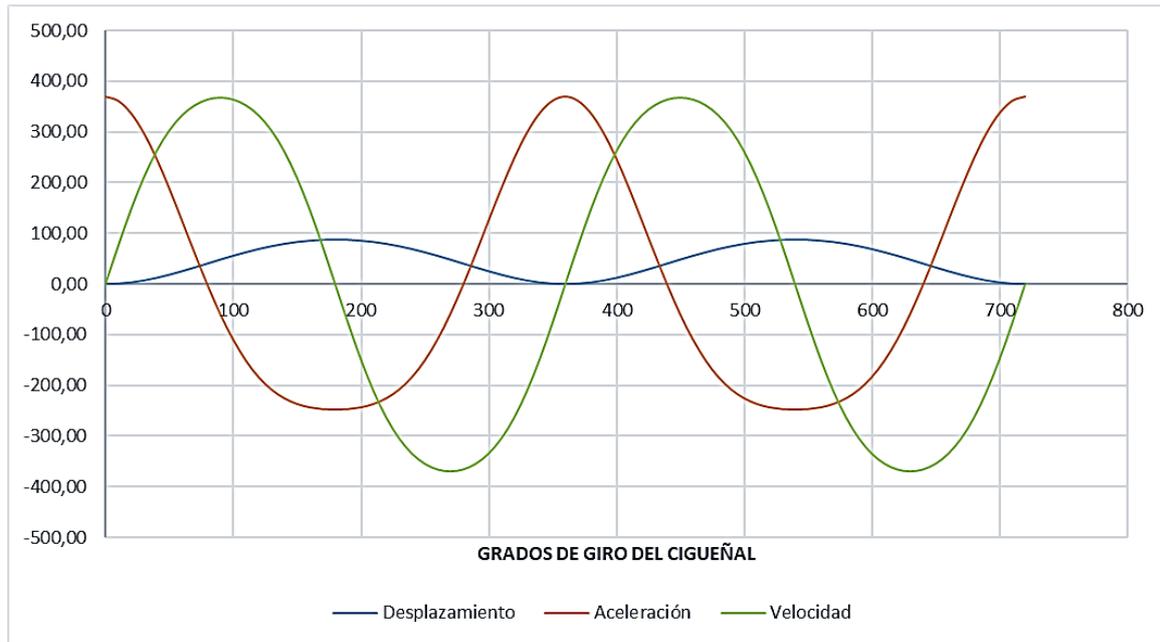


Fuente: Statgraphics

La gráfica muestra los puntos de dispersión el cual indica que las aceleraciones máximas de subida se dan cuando el cigüeñal se encuentra a 0° y 720° con 380 m/s^2 en proceso de admisión en el punto más bajo de la aspiración y 360° donde está finalizando el tiempo de explosión de igual manera con , en consecuente se observa las aceleraciones máximas de bajada a 180° en proceso de finalización de la admisión de gases y 540° en recorrido del tiempo de escape con 380 m/s^2 . En conclusión, se puede entender que existe un amortiguamiento de la aceleración, teniendo un diferencial de 110 m/s^2 a 780 rpm .

En la siguiente gráfica se presenta un comportamiento de las 3 gráficas mostrada anteriormente para su mejor enfoque de análisis a 800 y 2000 rpm .

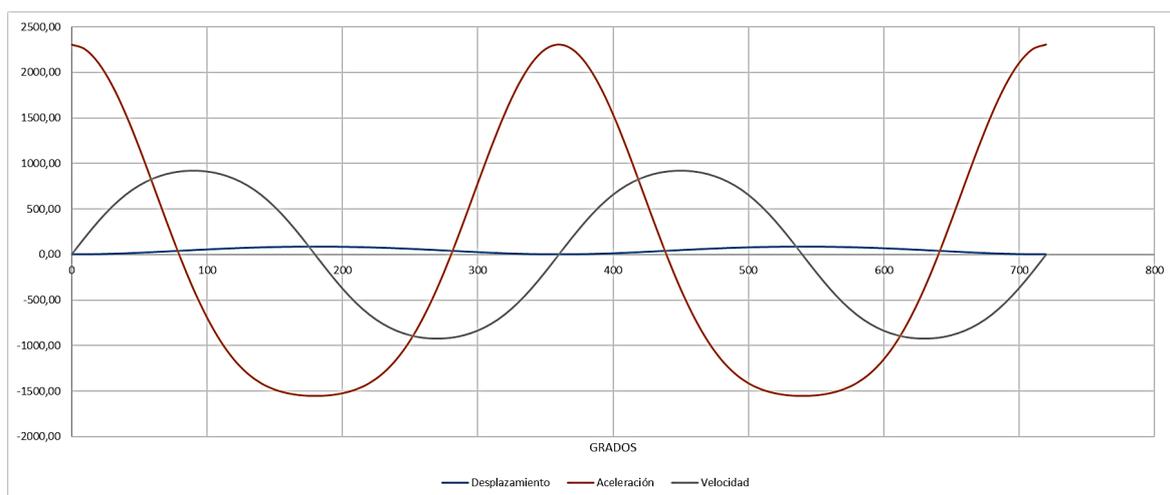
Figura 5. Comportamiento de las curvas en función del giro del cigüeñal a 800 RPM



Fuente: Autores

En base a la figura 5 se determina que el desplazamiento se mantiene constante el dato de 88 mm ya que es la carrera, sin embargo, la velocidad y la aceleración angular sufren los cambios de comportamiento de acuerdo a la variación de rpm, con velocidades a tope superior de y tope bajo de , en esta condición la aceleración al tope superior es de y al lado inferior de . Los puntos de en los que se generan los valores más altos tanto de la velocidad como de la aceleración es cuando el cigüeñal está a 0° para la velocidad angular y 90° para la aceleración angular, indicando que se cada 360° de giro del cigüeñal estos valores tendrán sus datos más altos.

Figura 6. Comportamiento de las curvas en función del giro del cigüeñal a 2000 RPM



Fuente: Autores

En base a la figura 6 se determina que el desplazamiento se mantiene constante el dato de 88 mm ya que es la carrera, sin embargo, la velocidad y la aceleración angular sufren los cambios de comportamiento de acuerdo a la variación de rpm para este caso 2000, con velocidades a tope superior de y tope bajo de , en esta condición la aceleración al tope superior es de y al lado inferior de según como muestra la gráfica obtenida. Los puntos de en los que se generan los valores más altos tanto de la velocidad como de la aceleración es cuando el cigüeñal está a 0° para la velocidad angular y 90° para la aceleración angular, indicando que se cada 360° de giro del cigüeñal estos valores tendrán sus datos más altos.

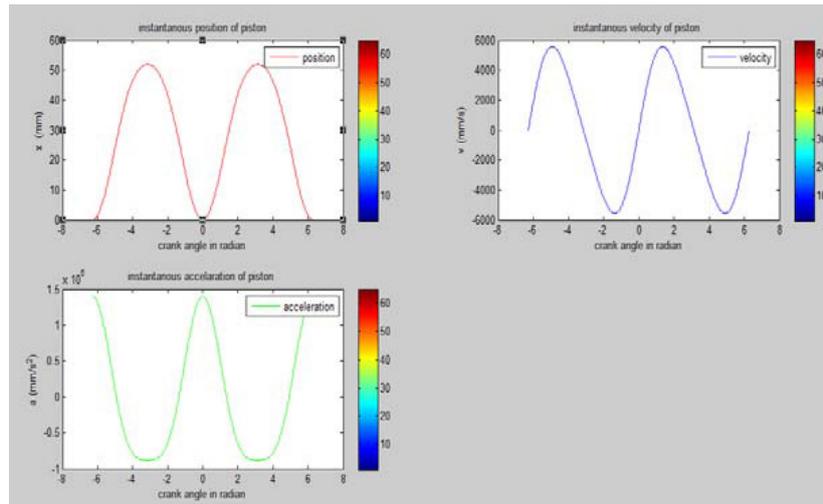
En resumen, en base al desplazamiento que da inicio a su trayectoria de recorrido la velocidad experimenta un cambio angular en la función seno y la aceleración experimenta un cambio angular en la función coseno, dicho de esta manera el inicio de las trayectorias de la velocidad se da desde el punto del origen y la aceleración se da con $369,06 \text{ m/s}^2$. Se aprecia que la velocidad tiene un desfase oscilante de 90° al momento de encontrar el valor más alto del comportamiento angular, algo más que se puede mencionar es que la aceleración tiene menor acción al momento de iniciar la fase de compresión y que se puede observar en la figura 5 y 6.

DISCUSIÓN

En función (Nigus, 2015) la metodología que se usa de modelado para la cinemática del mecanismo de manivela se ha derivado sistemáticamente considerando la configuración geométrica del mecanismo de manivela del motor de combustión interna. En donde el autor realiza un análisis de la velocidad y aceleración del conjunto del tren alternativo y que de igual forma se propone un modelo matemático en donde se pueda obtener el comportamiento del mismo según los parámetros geométricos del conjunto mecánico. Las conclusiones se extraen de la siguiente manera:

- A través de la consideración del mecanismo de manivela, la posición, la velocidad y la aceleración se formulan adecuadamente tanto (Nigus, 2015) y el autor del presente artículo.
- La relación entre las variaciones de las velocidades y aceleraciones angulares en base al cambio de giro del cigüeñal.

Figura 7. Gráfica de la cinemática del conjunto del tren alternativo según (Nigus, 2015)



Fuente: (Nigus, 2015)

Este resultado de (Nigus, 2015) muestra una simulación realizada en Matlab, sin embargo se propone un modelo matemático y se demuestra que tanto el desplazamiento, velocidad y aceleración angular tienen similitudes de inicio del comportamiento de curva de los parámetros ya mencionados y demostrados en las figuras 5 y 6.

4. CONCLUSIONES

Mantener en equilibrio un motor de combustión interna encendido es muy difícil, ya que tiene muchas piezas móviles. En particular, el equilibrio es importante en sistemas que funcionan a velocidades variadas, ya que la velocidad de funcionamiento ideal del motor afecta el consumo de combustible, la vida útil del motor, la vibración y el ruido.

En el presente estudio, se comparó el análisis cinemático del conjunto del pistón del motor con las mediciones matemáticas experimentales y se intentó determinar la velocidad de trabajo estable que está a 90° y 450° del giro del cigüeñal a 368,61 m/s a 800 rpm. En este sentido, se desarrolló el modelo teórico además de los resultados experimentales. Se abordaron adecuadamente las relaciones entre las velocidades y aceleraciones aplicados en los mecanismos del tren alternativo.

Al variar parámetros de la geometría del tren alternativo los valores de las variables analizadas van a tener cambios significativos tanto en la velocidad y aceleración como se muestra en la figura 6 en el cual los resultados aumentan en función que las revoluciones aumentan. Por lo que los resultados del análisis pueden ser utilizados para optimizar el diseño del pistón y su entorno, lo que puede llevar a mejoras en la eficiencia del motor, reducción de desgaste y aumento de la durabilidad.

Se ha determinado que el pistón realiza un movimiento alternativo, que puede ser descrito mediante ecuaciones de movimiento rectilíneo uniforme y acelerado, dependiendo de la fase del

ciclo de trabajo. La cinemática del pistón está íntimamente relacionada con el movimiento del cigüeñal. La conversión de movimiento rotativo a lineal es fundamental para el funcionamiento del motor.

REFERENCIAS

- Bolivar, A. (2012). Dimensiones epistemológicas y metodológicas de la investigación (auto) biográfica. *Dimensões epistemológicas e metodológicas da pesquisa (auto) biográfica*, 1, 27-69. https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Bolivar/publication/282869436_Dimensiones_epistemologicas_y_metodologicas_de_la_investigacion_auto_biografica/links/5620d8f908aed8dd1940c5f3/Dimensiones-epistemologicas-y-metodologicas-de-la-investigacion-auto-biografica.pdf
- Bulatović, Ž. M., Štavljanin, M. S., Tomić, M. V., Knežević, D. M., & Biočanin, S. L. (2011). Measurement and analysis of angular velocity variations of twelve-cylinder diesel engine crankshaft. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(8), 3043-3061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.05.002>
- Cakir, M. (2021). Experimental dynamic analysis of the piston assembly of a running single-cylinder diesel engine. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(4), 235-242. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/20464177.2019.1665257>
- Fernández, C., & Baptista, P. (2013). Metodología de la Investigación-Roberto Hernández Sampieri. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9).
- Gupta, H. N. (2012). *Fundamentals of internal combustion engines*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- Guzzella, L., & Onder, C. (2009). *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems*. Springer Science & Business Media.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd edition. ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>
- Jatkar, D. K., & Dhanwe, M. S. S. (2013). Dynamic Analysis of single cylinder petrol engine. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN*, 2248-9622. <https://www.academia.edu/download/31353172/GS3311771183.pdf>
- Mena, L. (2019). *Compilador de ejercicios de motores de combustión interna Diesel-Gasolina* (Segunda ed.). <https://pdfcoffee.com/folleto-de-ejercicios-de-motores-de-combustion-interna-3-pdf-free.html>
- Nigus, H. (2015). Kinematics and Load Formulation of Engine Crank Mechanism. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*. <https://doi.org/https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3257.1928>
- Pulkrabek, W. W. (2004). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126(1), 198-198. <https://doi.org/https://doi.org/10.1115/1.1669459>
- Stone, R. (1999). *Introduction to internal combustion engines* (Vol. 3). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.014>

- Viet Nguyen, D., & Nguyen Duy, V. (2018). Numerical Analysis of the Forces on the Components of a Direct Diesel Engine. *Applied Sciences*, 8(5).
- Wani, P. R. (2020). Crankshaft. In P. A. Lakshminarayanan & A. K. Agarwal (Eds.), *Design and Development of Heavy Duty Diesel Engines: A Handbook* (pp. 525-573). Springer Singapore. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-0970-4_15