

Diseño conceptual y análisis dinámico de un sistema de martillo accionado por un mecanismo de retorno rápido

Kevin Javier Gonzalez Luna
kegonzalezl@unal.edu.co

Ivan Felipe Malucho Suarez
imaluche @unal.edu.co

Juan David Hernández Daza
jhernandezda@unal.edu.co

Joseph Nicolas Mahecha Cruz
jomahecha@unal.edu.co

Nelson Arzola de la Peña

Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá D.C.
Facultad de Ingeniería.
2025.

Resumen

El presente proyecto desarrolla el diseño y modelado cinemático de un mecanismo de retorno rápido tipo Whitworth, modificado para operar como un martillo de impacto vertical. El objetivo principal consiste en transformar un movimiento rotacional uniforme, proporcionado por un motor eléctrico con reductor, en un movimiento alternativo de avance y retroceso con diferentes velocidades angulares efectivas, permitiendo un descenso lento y un retorno rápido del elemento percutor.

El rediseño propuesto introduce una variación estructural respecto al mecanismo clásico: el rodillo deslizante tradicional es reemplazado por un tornillo pasante que transmite directamente la fuerza entre la manivela motriz y la palanca ranurada. Esta modificación reduce el número de componentes, simplifica la fabricación y mantiene la eficiencia cinemática del sistema. La energía rotacional del motor se transmite desde el eje de entrada O_2 a la palanca oscilante pivotada en O_1 , la cual a su vez impulsa una biela articulada que acciona un bloque deslizante. Dicho bloque, fabricado en acero A36, cumple la función de martillo y se desplaza guiado por dos varillas lineales, ejecutando un golpe controlado durante la fase de avance.

El mecanismo completo se inscribe en un volumen máximo de $60 \times 60 \times 15$ cm y fue analizado mediante el método del lazo vectorial, considerando relaciones angulares, velocidades y aceleraciones instantáneas. Los resultados obtenidos muestran una correspondencia directa entre la velocidad angular de entrada y la aceleración lineal del martillo, validando el comportamiento asimétrico característico del retorno rápido. Este diseño demuestra una alternativa funcional, compacta y didáctica para el estudio de la conversión de movimiento rotacional en lineal alternativo, aplicable tanto en entornos académicos como en desarrollos de prototipos mecánicos ligeros.

Índice

Resumen	1
1. Fundamentación teórica	2
1.1. Movimiento de plano general	2
1.2. Movimiento plano de una partícula relativa a un sistema de referencia en rotación	2
1.3. Método del lazo vectorial	2
2. Fase de Diseño Conceptual	2
2.1. Variables del sistema	3
2.2. Modelo de prototipo inicial	3
3. Modelos teóricos empleados	3
3.1. Modelo cinemático	3
3.1.1. Relación entre α y δ	3
3.1.2. Análisis de velocidades	4
3.1.3. Lazo vectorial y velocidad del martillo	4
3.1.4. Análisis de aceleraciones	5
3.1.5. Aceleración del martillo mediante lazo vectorial	5
3.2. Gráficas	5

1. Fundamentación teórica

El análisis de mecanismos planos requiere el uso de conceptos fundamentales de cinemática y cinética, entre estos para el análisis del mecanismo se harán uso de:

1.1. Movimiento de plano general

El movimiento de plano general describe los valores de velocidad y aceleración de un punto de un sólido rígido por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\vec{V}_b = \vec{V}_a + \vec{V}_{b/a} = \vec{V}_a + (\vec{\omega} \times \vec{r}_{b/a}) \quad (1)$$

$$\vec{a}_b = \vec{a}_a + \vec{a}_{b/a} = \vec{a}_a + (\vec{\alpha} \times \vec{r}_{b/a}) + (\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{b/a})) \quad (2)$$

Donde:

- $\vec{\omega}$ y $\vec{\alpha}$ representan la velocidad y aceleración angular respectivamente, son iguales a la primera y segunda derivada del ángulo de rotación respecto al tiempo ($\dot{\theta}, \ddot{\theta}$)
- $\vec{r}_{b/a}$ representa el vector que une \vec{r}_a con \vec{r}_b

1.2. Movimiento plano de una partícula relativa a un sistema de referencia en rotación

Cuando se presentan casos donde el objeto se mueve dentro de un sistema en rotación (como es en nuestro caso el pasador que se mueve linealmente sobre la barra O_1B) es necesario usar las siguientes ecuaciones para encontrar las variables cinemáticas de un punto p dado:

$$\vec{V}_p = \vec{V}_p' + \vec{V}_{p/f} \quad (3)$$

$$\vec{a}_p = \vec{a}_p' + \vec{a}_{p/f} + a_{cor} \quad (4)$$

Donde:

- \vec{V}_p' y \vec{a}_p' representan las variables cinemáticas que posee el cuerpo producto de la rotación del sistema de referencia, se puede entender como un punto del sistema de referencia que coincide con p en todo momento
- $\vec{V}_{p/f}$ y $\vec{a}_{p/f}$ representan las variables cinemáticas del cuerpo relativas al sistema, en nuestro caso al ser un pasador sigue la geometría de la barra r_b
- a_{cor} representa la aceleración de Coriolis, la cual debe ser igual a $2\vec{\Omega} \times \vec{V}_{p/f}$ y es propia del sistema en rotación

1.3. Método del lazo vectorial

Permite analizar mecanismos mediante ecuaciones vectoriales que forman circuitos cerrados. Se aplica derivando sucesivamente respecto al tiempo para obtener velocidades y aceleraciones.

2. Fase de Diseño Conceptual

El mecanismo consiste en un sistema de barras articuladas accionado por un motor que produce un movimiento de martillo. Los componentes principales son:

- **Motor:** Proporciona rotación constante con velocidad angular ω_2 y aceleración angular $\alpha_2 = 0$
- **Barra motriz (O_2A):** De longitud r , conectada al motor en O_2 y al punto A
- **Barra acoplada (O_1B):** De longitud L variable aparente, articulada en O_1 y conectada en punto coincidente con A
- **Sistema de martillo:** Mecanismo articulado con barra de longitud constante K que produce el movimiento de impacto

2.1. Variables del sistema

- $\delta(t) = \omega_2 t$: Ángulo de la barra motriz (entrada del sistema)
- $\alpha(t)$: Ángulo de la barra acoplada (función de δ)
- $L(\delta)$: Distancia variable entre articulaciones
- $\omega_1 = \dot{\alpha}$: Velocidad angular de la barra acoplada
- $X_E(t)$: Posición del martillo
- R, D, K : Parámetros geométricos del mecanismo

2.2. Modelo de prototipo inicial

El proyecto se centra en el diseño y en la construcción de un mecanismo de retorno rápido basado en el mecanismo de Whitworth, modificado específicamente para funcionar como un martillo de forja. El objetivo principal es convertir el movimiento rotacional uniforme del motor eléctrico en un movimiento lineal alternativo con cinemática asimétrica, característica fundamental para que la fase de avance lento y controlado sea efectiva a la hora de transferir energía de impacto de forma eficiente. En la fase de retorno rápido, se busca reducir el tiempo muerto del ciclo, incrementando así la productividad del sistema.

La innovación central radica en una reinterpretación espacial y constructiva del mecanismo clásico. A diferencia de la configuración tradicional, el sistema ha sido reorientado noventa grados, posicionando el plano de movimiento en un eje vertical. Esta modificación permite que el bloque deslizante final actúe directamente como un martillo, aprovechando su carrera lineal para el golpeo. El principio de funcionamiento se basa en la transmisión de movimiento desde una manivela motriz, solidaria al eje del motor en el punto O_2 , hacia una palanca oscilante ranurada que pivota en O_1 .

Una solución de diseño clave sustituye el rodillo convencional por un tornillo pasante que actúa como un elemento de unión y guía. Este tornillo se desliza dentro de la ranura longitudinal de la palanca, estableciendo un contacto lineal directo que transmite el esfuerzo. Esta simplificación no solo facilita la fabricación y reduce el número de componentes, al eliminar el rodamiento intermedio, sino que también mantiene la esencia del mecanismo de deslizamiento que genera el efecto de retorno rápido.

Finalmente, el movimiento angular oscilante de la palanca ranurada se transmite a través de una biela articulada al bloque deslizante o martillo. Este conjunto completa la transformación cinemática, guiando el martillo en su trayectoria vertical. Como resultado, se obtiene un dispositivo robusto y funcional que sincroniza perfectamente la entrada de rotación continua con la salida de impacto repetitivo.

Cabe destacar que el modelado presentado se encuentra sujeto a posibles modificaciones, ya que aún está pendiente el diseño definitivo de la estructura o soporte del mecanismo. Dicho componente será determinante para definir la disposición final de los ejes, la ubicación del motor y los puntos de anclaje, por lo que es posible que se requieran ajustes dimensionales o constructivos en el modelo actual una vez se integre el sistema de soporte completo.

3. Modelos teóricos empleados

3.1. Modelo cinemático

3.1.1. Relación entre α y δ

El análisis geométrico del mecanismo permite establecer la relación fundamental entre los ángulos. A partir del triángulo formado por las longitudes r , d y L , se obtiene:

$$L^2 = r^2 + d^2 - 2rd \cos(90^\circ + \delta) \quad (5)$$

Usando la identidad $\cos(90^\circ + \delta) = -\sin(\delta)$, se tiene:

$$L = \sqrt{r^2 + d^2 + 2rd \sin(\delta)} \quad (6)$$

Por la ley de senos:

$$\frac{L}{\sin(90^\circ + \delta)} = \frac{r}{\sin(90^\circ - \alpha)} \quad (7)$$

Como $\sin(90^\circ - \alpha) = \cos(\alpha)$ y $\sin(90^\circ + \delta) = \cos(\delta)$, resulta:

$$\frac{L}{\cos(\delta)} = \frac{r}{\cos(\alpha)} \quad (8)$$

De donde se obtiene la relación entre los ángulos:

$$\cos(\alpha) = \frac{r \cos(\delta)}{L} \quad (9)$$

Sustituyendo la expresión de L :

$$\cos(\alpha) = \frac{r \cos(\delta)}{\sqrt{r^2 + d^2 + 2rd \sin(\delta)}} \quad (10)$$

3.1.2. Análisis de velocidades

Sabemos que la barra O_2A tiene velocidad y aceleración angulares, y al no presentar traslación, aplicamos rotación respecto a eje fijo:

$$\vec{V}_a = \omega_2 \times \vec{r}, \quad \nless \delta^\circ$$

Podemos escribir una descomposición relativa de \vec{V}_a :

$$\vec{V}_a = \vec{V}_a' + \vec{V}_{a/f}$$

donde \vec{V}_a' sigue la trayectoria del sistema de rotación y $\vec{V}_{a/f}$ es la velocidad relativa.

$$V_{a/f} = (\sin \alpha \cos \delta + \sin \delta \cos \alpha) \omega_2 r \quad (11)$$

Además:

$$V_a' = \cos(\alpha - \delta) V_a \quad (12)$$

De donde:

$$\omega_1 L = [\cos(\alpha) \cos(\delta) + \sin(\alpha) \sin(\delta)] \omega_2 r$$

Por tanto, la velocidad angular del eslabón es:

$$\omega_1 = \dot{\alpha} = \frac{\omega_2 r}{L} [\cos(\alpha) \cos(\delta) + \sin(\alpha) \sin(\delta)] \quad (13)$$

3.1.3. Lazo vectorial y velocidad del martillo

Planteando el lazo vectorial para el mecanismo, se tiene:

$$\vec{R} + \vec{K} = \vec{D} + \vec{X}_E \quad (14)$$

Al proyectar en los ejes x y y :

$$R \cos \alpha - X_E - K \cos \beta = 0$$

$$R \sin \alpha - K \sin \beta - D = 0$$

Elevando ambas ecuaciones al cuadrado y sumando:

$$K^2 = R^2 - 2R(X_E \cos \alpha + D \sin \alpha) + X_E^2 + D^2$$

Derivando K^2 respecto al tiempo t , y sabiendo que K es constante:

$$0 = -2R \frac{d}{dt} (X_E \cos \alpha + D \sin \alpha) + 2X_E \dot{X}_E$$

Desarrollando:

$$2X_E\dot{X}_E - 2R[\dot{X}_E \cos \alpha - X_E\dot{\alpha} \sin \alpha + D\dot{\alpha} \cos \alpha] = 0$$

Simplificando:

$$\boxed{X_E\dot{X}_E = R[\dot{X}_E \cos \alpha - X_E\dot{\alpha} \sin \alpha + D\dot{\alpha} \cos \alpha]}$$

Finalmente, la velocidad del punto E:

$$\boxed{\dot{X}_E = \frac{R\dot{\alpha}[D \cos \alpha - X_E \sin \alpha]}{X_E - R \cos \alpha}} \quad (15)$$

3.1.4. Análisis de aceleraciones

Tal como en el análisis de velocidades sabemos que la barra O_2A tiene velocidad y aceleración angulares, y al no presentar traslación, aplicamos rotación respecto a eje fijo:

$$\vec{a}_a = (\alpha_2 \times \vec{r}), \quad \nabla \delta^\circ + (\omega_2 \times (\omega_2 \times \vec{r})), \quad \nabla \delta^\circ$$

Donde el primer y segundo termino representan la aceleracion tangencial y normal de a respectivamente. Ahora podemos reescribir la aceleracion de a como parte de O_3B , obteniendo la siguiente relacion:

$$\vec{a}_a = \vec{a}'_a + \vec{a}_{a/f} + \vec{a}_{cor}$$

Donde:

■

$$\vec{a}'_a = (\alpha_1 \times \vec{L}), \quad \nabla \alpha^\circ + (\omega_1 \times (\omega_1 \times \vec{L})), \quad \nabla \alpha^\circ$$

■

$$\vec{a}_{cor} = (2\omega_1 \times \vec{V}_{a/f}), \quad \nabla \alpha^\circ$$

■

$$a_{a/f} = \nabla \alpha^\circ$$

Sabiendo esto proyectamos todos los vectores respecto a sus componentes rectangulares, obteniendo respectivamente para X e Y:

$$(a'_a)_t \sin \alpha + (a_{a/f}) \cos \alpha = \omega_2^2 r \cos(\delta) + \alpha_2 R \sin(\delta) - 2\omega_1 V_{a/f} \sin \alpha - \omega_1^2 L \cos \alpha$$

$$(a'_a)_t \cos \alpha - (a_{a/f}) \sin \alpha = \alpha_2 R \cos(\delta) - \omega_2^2 R \sin(\delta) - 2\omega_1 V_{a/f} \cos \alpha + \omega_1^2 L \sin \alpha$$

Solucionando el sistema para α_1 y $a_{a/f}$:

$$\alpha_1 = \frac{\omega_2^2 r \sin(\alpha - \delta) + \alpha_2 R \cos(\alpha - \delta) - 2\omega_1 V_{a/f}}{L} \quad (16)$$

$$a_{a/f} = \omega_2^2 r \cos(\alpha - \delta) + \alpha_2 R \sin(\delta - \alpha) - \omega_1^2 L \quad (17)$$

3.1.5. Aceleración del martillo mediante lazo vectorial

Volviendo a derivar la ecuación del lazo vectorial:

$$\ddot{X}_E = R \frac{[\ddot{\alpha}A - \dot{\alpha}^2 B - \dot{\alpha}\dot{X}_E \sin \alpha]D_{en} - \dot{\alpha}A(\dot{X}_E + R\dot{\alpha} \sin \alpha)}{D_{en}^2} \quad (18)$$

donde:

$$\begin{aligned} A &= D \cos \alpha - X_E \sin \alpha, \\ B &= D \sin \alpha + X_E \cos \alpha, \\ D_{en} &= X_E - R \cos \alpha. \end{aligned}$$

3.2. Gráficas

usando ec.15 y ec.18 para graficar la velocidad y aceleracion del martillo con respecto al tiempo: