

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA

Principios de Dinámica
Mecanismo biela cigüeñal

Oscar Rojas
Diego Alejandro Chacón Rangel
Juan Sebastián Dueñas Salamanca
Andrés Felipe Rivera Torres

Presentado a:
Prof. Nelson Arzola de la Peña

Bogota D.C 14 de julio de 2019

Índice

	Página
1 Resumen	3
2 Fundamentación Teórica	3
2.1 El Cigüeñal	3
2.2 Biela	3
2.3 Equilibrio Estático	4
2.4 Equilibrio Dinámico	5
3 Fase de diseño conceptual	6
3.1 Balanceo	6
3.2 Análisis cinemático biela manivela	6
3.3 Análisis cinético	9
4 Materiales y equipos	9
4.1 PLA	9
4.2 Madera (MDF)	9
4.3 Impresora 3D	10
4.4 Corte Láser	11
4.5 Mototool	11
5 Desarrollo experimental	11
6 Resultados	13
7 Conclusiones	14
8 Referencias	15

1. Resumen

Uno de los mecanismos más comunes en la industria automotriz es el mecanismo biela cigüeñal, el cuál permite convertir el movimiento lineal que tienen los pistones a movimiento rotacional. En este informe se diseña, analiza, implementa y se prueba un prototipo a escala con el objetivo de estudiar la condición de equilibrio estático y dinámico del sistema.

Para el diseño del cigüeñal se busca determinar los contrapesos necesarios para lograr el balanceo. Se analiza dicho diseño obtenido: el comportamiento cinemático de los elementos (sus velocidades y aceleraciones en términos de la velocidad de giro); así como las reacciones y cargas periódicas que experimentan; Se analiza las consecuencias que puede traer el desbalance y observar el comportamiento de las vibraciones producto de dicho desbalance además del montaje y desmontaje de contrapesos, de esta manera estudiar las vibraciones, las reacciones y determinar el balance estático y dinámico del mecanismo.

2. Fundamentación Teórica

2.1. El Cigüeñal

Un cigüeñal es un eje configurado particularmente para transformar de manera eficiente el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa; se compone de diferentes partes como se puede evidenciar en la fig (1b)

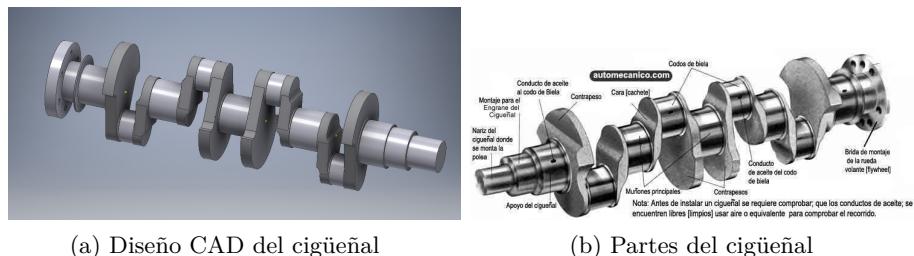


Figura 1: cigüeñal.

2.2. Biela

La biela es una conexión que mediante un bulón mantiene conectada el codo del cigüeñal al pistón permitiendo la transferencia de tipo de movimiento rotacional de una al lineal del otro debe ser ligera para evitar el desbalance tanto estático como dinámico.

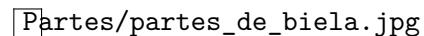


Figura 2: Biela

2.3. Equilibrio Estático

Al analizar el cigüeñal se puede identificar que se trata de un cuerpo restringido a girar alrededor de un eje fijo. Se busca que el cigüeñal gire con una velocidad angular constante ω ¹, lo que significa que no tendrá aceleración angular. Para un cuerpo que presenta rotación a lo largo de un eje se tiene que la suma de momentos que actúan sobre el cuerpo rígido es igual al cambio de momento angular mas el momento angular por la velocidad de giro.

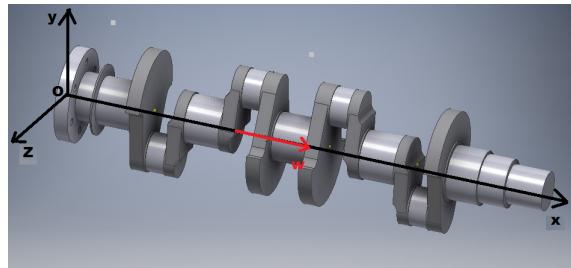


Figura 3: Análisis estático de un cuerpo de eje fijo

Esta relación puede ser expresada en términos de los productos de inercia. Como el sistema de referencia gira con ω velocidad angular produce, al ser la aceleración angular cero la sumatorio de momento queda:

$$\begin{aligned} H_O &= (I_x i + I_{xy} j + I_{xz} k) \\ \sum M_O &= (\dot{H}_O) + \omega \times H_O \\ \sum M_O &= (0i + (I_{xz}\omega^2)j + (-I_{xy}\omega^2)k) \end{aligned}$$

Como el cigüeñal no tiene una simetría respecto a nuestro plano xy los productos de inercia I_{xy} y I_{xz} son diferentes a 0 y como no tenemos aceleración angular nuestras ecuaciones de momentos se reducen al siguiente sistema:

$$\begin{aligned} \sum M_x &= 0 \\ \sum M_y &= I_{xz}\omega^2 \\ \sum M_z &= -I_{xy}\omega^2 \end{aligned}$$

Los momentos que se generan en el eje Y y Z son iguales si respecto a nuestro centro de masa se mantiene la simetría el cual se pudo analizar gracias al apoyo del software de inventor donde se puede ver que al momento de tener todos los contrapesos puestos en la posición indicada del cigüeñal el centroide del eje se encuentra en la mitad donde tiene simetría respecto a este punto, lo que permite que la sumatorio de momentos sea igual a cero y se dice que el cigüeñal se encuentre estáticamente balanceado. Donde las reacciones en los soportes donde se va ubicar el cigüeñal son la mitad del peso, gracias a esto al momento de aplicar la velocidad angular que se desea este no va a moverse en ninguno de los ejes coordinados del cigüeñal

Las reacciones que se ven en la figura 4 son la reacciones estáticas que permite que se mantenga el eje del cigüeñal en un movimiento que solo es rotación respecto a su eje

¹Esto se debe a que la potencia sera suministrada por un motor DC, cabe resaltar que un cigüeñal de un motor tendrá una velocidad angular variable debido al ciclo de Otto

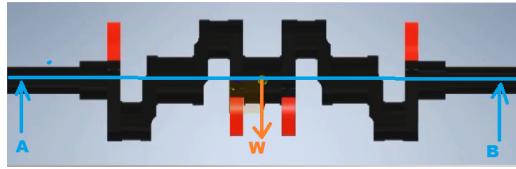


Figura 4: Cigüeñal Con todos los contrapesos

2.4. Equilibrio Dinámico

Un elemento en movimiento tiende a generar reacciones dinámicas debido a su inercia. haciendo la suposición de que el elemento esta constituido por partículas puntuales que giran respecto al eje se observa que el eje ejerce una fuerza centrípeta sobre las partículas, y así mismo estas ejercen una fuerza opuesta sobre el eje. aun en el caso en el que la sumatorio de fuerzas sea igual a 0 puede que se presente la formación de un par rotor que tendera a generar oscilaciones. Para contrarrestarlo se pueden añadir masas adicionales hasta llevar el par a 0 y así lograr un equilibrio dinámico.

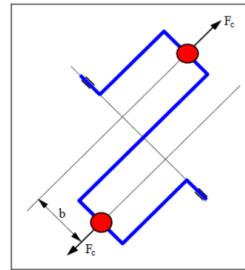


Figura 5: partículas en rotación tomado de [4]

Si se extiende el concepto a solidos rígido la inercia de la partícula se vuelve el producto de inercia de sólido rígido, este es el responsable de genera un momento. Para mantener al eje ubicado sobre su eje rotación los soportes deben ejercer una par que lo contrarrestare por lo tanto las reacciones dinámicas en los soportes serán:

$$A_y = \frac{I_{xy}\omega^2}{L}$$

$$B_y = \frac{-I_{xy}\omega^2}{L}$$

estas reacciones son las llamadas reacciones dinámicas, dependen de la velocidad de giro y de la geometría de los componentes. En el cigüeñal son las responsables de generar la vibraciones ya que son fuerzas periódicas dependientes del ángulo de giro del cigüeñal.

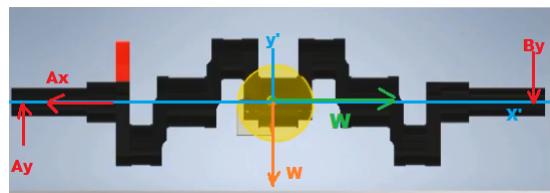


Figura 6: Reacciones dinámicas

3. Fase de diseño conceptual

3.1. Balanceo

Al momento de hacer girar el cigüeñal se generaran reacciones dinámicas que se logran equilibrar agregando los contrapesos y que se mantenga el equilibrio estático que ya se estudio, para lograr el balance del cigüeñal es necesario que el centro de masa se encuentre ubicado sobre el eje de giro. De lo contrario seria equivalente a que toda la masa estuviera girando a un radio de giro determinado ². Por ende el peso produciría una momento oscilante que tiende a perturbar el sistema.

Otro aspecto importante para lograr el equilibrio dinámico es que el producto de inercia sobre el eje de giro debe ser 0.

$$\sum M = I_{xy} * \omega^2 \quad (1)$$

Por teorema de los ejes paralelos se tiene:

$$I_{xy} = \bar{I}_{xy} + \bar{x}\bar{y}A \quad (2)$$

Con lo cual podemos simplificar el problema y no tener que contrarrestar el producto de inercia de todo el sistema sino para cada uno de los brazos del cigüeñal. Como los brazos son iguales se utilizará el mismo contrapeso para cada uno de ellos. El contrapeso necesario para contrarrestar debe cumplir que tenga el mismo producto de inercia.

Como los brazos del cigüeñal son simétrica respecto a su centro de masa $\bar{I}_{xy} = 0$ por lo que para contra restar el producto de inercia generado por el el brazo se debe colocar un contrapeso que sea cumpla que su masa por la distancia a el centro de masa es igual a la del brazo.

Con un contrapezo con forma de medio disco se tiene que el area y el producto de inercia son respectivamente: $A = \frac{\pi}{2}r^2$ y $\bar{y} = \frac{4r}{3\pi}$.

Gracias a estos cálculos se pudo diseñar la geometría específica del los contrapesos para lograr el objetivo de poder ver las consecuencias de las reacciones dinámicas en el movimiento rotacional del eje, la cual se puede ver y apreciadas físicamente con resortes que transmitan el movimiento y magnitud de las reacciones dinámicas que ya se analizaron.

El calculo del centroide con los contrapesos desbalanceados se realizo gracias al software de inventor y se puede notar como varia este punto respecto al eje con todos sus contrapesos como se ve en la siguiente figura

para que se pueda analizar las reacciones dinámicas que se generan el mecanismo es necesario quitar algún contrapeso esto hará que el centroide del momento de inercia del eje cambia y no se mantenga la simetría respecto a este punto , para esto fijamos un nivel de reacciones en el punto G Se ven que las reacciones del extremo del eje so lo momentos que ya habíamos.

3.2. Análisis cinemático biela manivela

En el sistema pistón es fundamental encontrar las variables cinemáticas de una en términos de la otra. Puesto que el sistema esta alimentado por un motor DC conectado al cigüeñal buscamos encontrar las variables cinemáticas del pistón.

Podemos hallar la velocidad del pistón a partir de la ecuación de Velocidad relativa.

$$\vec{V}_B = \vec{V}_+ \vec{V}_{B/A} \quad (3)$$

²radio de giro es equivalente a que toda la masa se encontrara girando a esa distancia del eje de giro

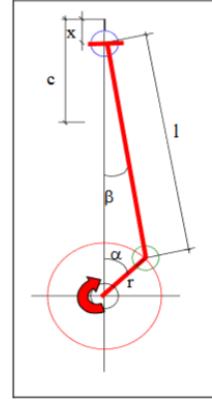


Figura 7: sistema biela manivela tomado de [4]

El mecanismo limita a el movimiento del pistón de manera que sea únicamente vertical por lo que al descomponer la ecuación 6 en componentes y teniendo en cuenta que $\vec{V} = r\omega$ se obtiene:

$$0 = (LA * \omega_A) * \sin(\theta_A) + (LB * \omega_B/A) * \sin(\theta_B) \quad (4)$$

$$V_B = (LA * \omega_A) * \cos(\theta_A) + (LA * \omega_B/A) * \cos(\theta_B)$$

Al despejar se obtiene la velocidad angular del biela relativa al brazo de cigüeñal (ω_B/A) y la velocidad del pistón (V_B).

$$\omega_B/A = \omega_A \frac{LA * \sin(\theta_A)}{LB * \sin(\theta_B)} \quad (5)$$

$$V_B = (LA * \omega_A) * \cos(\theta_A) + (LA * \omega_B/A) * \cos(\theta_B)$$

A partir de un análisis por computadora se puede obtener la velocidad en función de la posición determinada por el ángulo de giro.

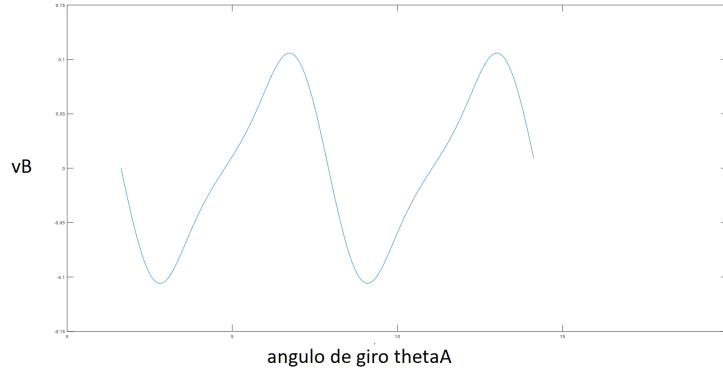


Figura 8: velocidad de pistón

Para obtener la aceleración se hace un procedimiento análogo donde

$$\vec{a}_B = \vec{a}_A + \vec{a}_{B/A} \quad (6)$$

$$\vec{a}_B = \vec{L}_A * \omega_A^2 + \vec{L}_B * \omega_B^2 + \vec{L}_B \alpha$$

al descomponer en vectores se tiene que

$$0 = -(LA * \omega_A) * \cos(\theta_A) + (LA * \omega_{B/A}^2) * \cos(\theta_B) + LB \sin(\theta_B) * \alpha \quad (7)$$

$$a_B = -(LA * \omega_A^2 * \sin(\theta_A) + (LB * \omega_{B/A}^2) * \sin(\theta_B)) + LB \sin(\theta_B) \alpha$$

Despejando se obtiene

$$\alpha = -\frac{LA * \omega_A * \cos(\theta_A) + (LA * \omega_{B/A}^2) * \cos(\theta_B)}{LB \sin(\theta_B)} * \quad (8)$$

$$a_B = -(LA * \omega_A^2 * \sin(\theta_A) + (LB * \omega_{B/A}^2) * \sin(\theta_B)) + LB \sin(\theta_B) \alpha$$

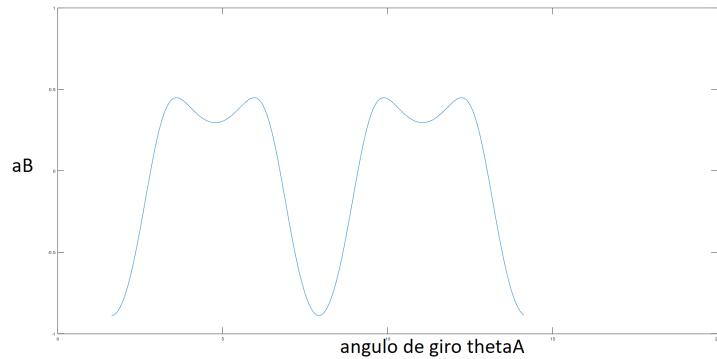


Figura 9: aceleración de pistón

Con los elementos de velocidad y aceleración se puede obtener como va ser el movimiento del pistón a lo largo del tiempo obteniendo así su función de ciclo de carrera

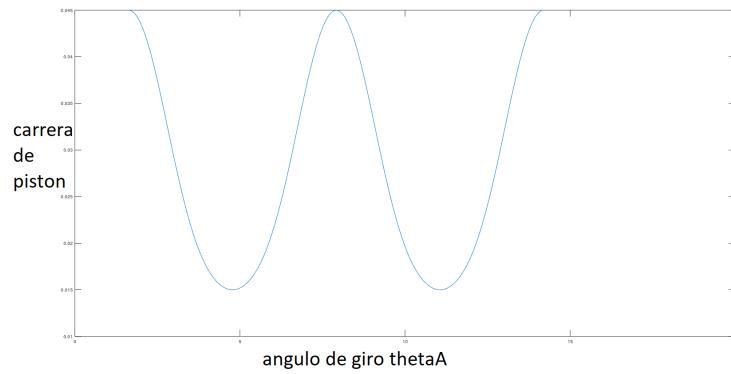


Figura 10: carrera pistón

3.3. Análisis cinético

Sobre el pistón están actuando su peso una fuerza proporcionada por la biela y una fuerza reactiva en la camisa que mantiene el pistón en su trayectoria vertical. utilizando las ecuaciones de movimiento.

$$\begin{aligned} F_{By} - m_p * g &= m_p * a_B \\ F_{By} &= m_p(g + a_B) \end{aligned} \quad (9)$$

La biela tiene movimiento plano general por lo que

$$\begin{aligned} \sum \vec{F} &= m * \vec{a}_G \\ \sum M &= \bar{I} * \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

aceleración del centro de masa

$$\begin{aligned} F_{Ay} + F_{By} - m_b * g &= m_b * a_{Gy} \\ F_{Ax} + F_{Bx} - m_b * g &= m_b * a_{Gx} \\ F_{Ax} + F_{Bx} &= \bar{I} * \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

La reacciones F_{Ax} y F_{Ay} son fuerzas que producen un momento sobre le cigüeñal y son conocidas como fuerzas alternantes y tiene una frecuencia igual a la de velocidad de giro del cigüeñal.

4. Materiales y equipos

4.1. PLA

El ácido poli-láctico es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Es un material altamente versátil, que se hace a partir de recursos renovables al 100 por ciento, como son productos ricos en almidón. Este ácido tiene muchas características equivalentes e incluso mejores que muchos plásticos derivados del petróleo, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos. Este material se uso para la impresión de las piezas del cigüeñal biela pistones y contrapesos , se buscaba que todas las piezas tuvieran la misma densidad y peso para lograr el efecto que se buscaba de ,mantener el equilibrio estático y dinámico del mecanismo.



Figura 11: PLA

4.2. Madera (MDF)

Tablero de fibras de madera de densidad media, unidas mediante adhesivos urea-formaldehído en un proceso de prensado continuo a altas temperaturas, lo que le otorga excelentes propiedades físicomecánicas y una gran calidad superficial. Sus características principales son:

- Superficie lisa y homogénea, fácil de pintar, enchapar y recubrir con laminados de alta presión y folios.
- Gran versatilidad de aplicaciones, que permite obtener excelentes terminaciones, con un importante ahorro de pintura y un menor desgaste de herramientas.
- Densidad y comportamiento uniforme, ideal para moldurar, curvar, fijar, fresar, entre otros.

Se utilizo este tipo de material para la construcción de la bancada ya que es un material que es útil por sus características para la construcción de estructuras como en este caso la bancada. la cual tiene una buena rigidez, este material se modelo y se corto a láser para obtener las especificaciones deseadas para la bancada, además de permitir el fácil desmontamiento del mecanismo para lograr el cambio de los contrapesos.



Figura 12: Bancada elaborada en MDF

4.3. Impresora 3D

Una impresora 3D es una máquina capaz de imprimir figuras con volumen a partir de un diseño hecho por ordenador. Con volumen quiere decir que tiene ancho, largo y alto. Una impresora 3D lo que realmente hace es producir un diseño 3D creado con el ordenador en un modelo 3D físico (real).

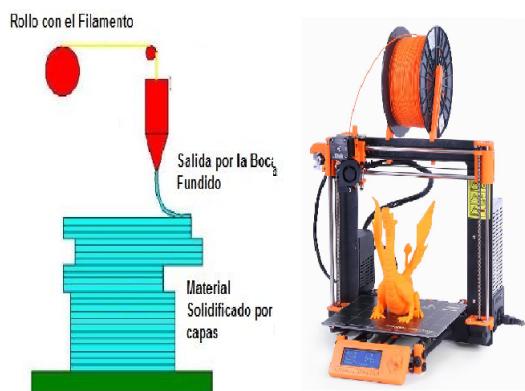


Figura 13: Impresora 3D

Las impresoras 3D utilizan múltiples tecnologías de fabricación e intentaremos explicar de forma sencilla cómo funcionan. Las impresoras 3D lo que hacen es crear un objeto con sus 3 dimensiones y esto lo consigue construyendo capas sucesivamente hasta conseguir el objeto deseado. El proceso que utilizan estas impresoras para crear el objetos por capas se llama "proceso aditivo", en la actualidad existen muchos tipos de impresoras para este caso específico se utilizo la siguiente, las piezas se modelaron y se imprimieron en este tipo de proceso ya que nos permitía lograr la misma densidad para cada una de las masas indicado para lograr el análisis deseado el proceso que usa la impresora 3D es el siguiente

Adición de polímeros o FDM: Lo que hace es ir fundiendo un filamento (hilo) de polímero mediante un pico (boca de salida) y depositando capa sobre capa el material fundido hasta crear el objeto sólido. En esta tecnología, el propio material se va añadiendo por capas hasta crear la forma deseada. Este mismo proceso hace que las piezas que encuentran en voladizo necesiten material de apoyo para que la impresora pueda seguir imprimiendo las caspas, esto mismo genera que al tener la pieza impresa se necesite de un proceso de mecanizado para obtener las piezas al estilo que se buscaban

4.4. Corte Láser

Debido a que es un método rápido, eficaz y con alta precisión nos ayuda a mejorar la calidad del mecanismo y a tener unos buenos acabados al finalizar el corte; además que el material escogido tiene dificultades a la hora de cortarse. Su precisión es de aproximadamente 0.01 mm y su potencia en el corte es de 3000 watts. El corte láser se utilizó para las piezas de MDF que se tenían para la estructura diseñada de la bancada, con esta máquina se cortaron las partes necesarias y especificadas de la bancada

4.5. Mototool

Para el proceso de mecanizado de las piezas después de la impresión se utilizó el mototool para quitar el material de apoyo que se adicionó en la impresión para lograr la obtención de las piezas, se eligió esta herramienta ya que el mototool es una máquina para trabajo fino, limpio y delicado, tanto para generar cortes precisos, tallar, pulir como acabados de lujo. Su diseño permite ser muy versátil y fácil de utilizar con lo que es posible aplicar en un sin número de tareas hecho con nuestras manos esto nos permitió lograr obtener el acabado deseado hasta en las secciones más pequeñas que se tenían principalmente en las piezas como las bielas y el cigüeñal.



Figura 14: Mototool

5. Desarrollo experimental

Para el desarrollo experimental se modelaron todas las piezas con apoyo y soporte del software de Inventor, a partir de los cálculos de las geometrías necesarios para conseguir el efecto buscado en el mecanismo, en el mismo software se realizó el diseño de la bancada para el soporte de los elementos del mecanismo, el montaje total del mecanismo en software se ve en la siguiente figura

A partir de diseño de las piezas en Inventor y Mediante el uso de la impresión 3d que hace parte de una línea de manufactura aditiva, logramos materializar los diseños con una alta precisión, calidad y resistencia. Estas piezas al ser impresas se pasaron por un proceso de mecanizado por el material

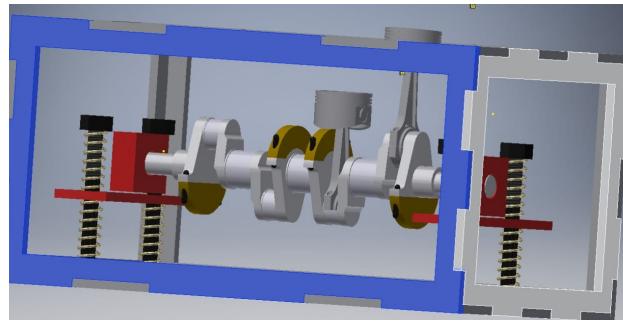


Figura 15: Mecanismo Modelado en INventor

aditivo que es resultante de la impresión 3D, en la siguiente imagen se ve el resultado de las piezas en 3d



Figura 16: Eje Impreso En 3D

Para la la construcción de la bancada como material escogido por sus característica se utilizo el MDF el cual fue cortado por láser para tener la piezas necesarias y exactas para la construcción de la estructura de soporte y su geometría exacta para ser precisos al momento de montar las el mecanismo en el soporte, finalmente la bancada fue completada con tubos de jeringa para el movimiento traslaciones de los pistones, se escogió este tipo de material por su geometría y precisión con el diseño que se tenia en los pistones ya modelados, además de la poco fricción que se genera entre el APL y el el material de las jeringas, en la siguiente imagen se ve el montaje de la bancada después del proceso de corte láser



Figura 17: Bancada echa en MDF

Finalmente se realizo el montaje total de las piezas, para esto también se utilizo el soporte de los resortes para poder el efecto de las vibraciones en el mecanismo al momento de aplicarle o quitarle los contrapesos ya antes mencionados, el resultado final del mecanismo se ve en la siguiente figura

La unión con el motor que se utilizo se creo con mangueras ya que se necesitaba un material elástico que nos permita que a pesar de que se generen movimientos a parte del rotacional el motor siga funcionando con normalidad

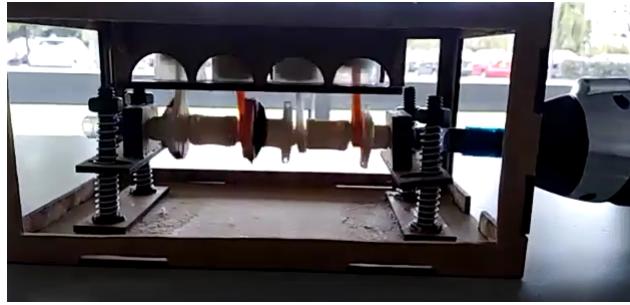


Figura 18: Ensamble Final del mecanismo

6. Resultados

Con el montaje completado se pueden realizar las comparaciones del movimiento que generaba la bancada con y sin los contrapesos, además del buen funcionamiento del mecanismo biela, pistón y cigüeñal

Para el análisis de los resultados en el momento que el cigüeñal no se encontraba con los contrapesos esperando que este se evidenciara al cambio en el movimiento con los resortes instalados en la bancada, para este primer caso se puede evidenciar como las reacciones dinámicas eran mucho más grandes ya que se permitía un movimiento trasversal más marcado que en el caso que no se encontraban los contrapesos este hecho se puede evidenciar en la siguiente imagen donde se toma , el momento donde el cigüeñal giraba con velocidad angular constante sin contrapesos



Figura 19: Funcionamiento del cigüeñal sin contrapesos

En la imagen anterior se puede apreciar como el cigüeñal no solo tiene movimiento rotacional si no también genera movimientos trasversal a través de los soportes que tiene este, se pueden ver experimentalmente como actúan las reacciones dinámicas en el movimiento de la bancada, en la imagen anterior se puede ver como el extremo del eje se encuentra variando respecto a su eje neutro, este movimiento se puede apreciar gracias a los resortes quienes transmiten el movimiento a través de ellos. El caso contrario de la situación anterior es la configuración donde el cigüeñal se encuentra con todos los contrapesos donde ,este se encuentra en estabilidad estática y dinámica, a pesar de que teóricamente se buscaba que no se generara ningún movimiento trasversal en el momento de aplicar la velocidad angular en el cigüeñal no se logró este efecto de manera perfecta ya que se veían pequeños movimientos y oscilaciones en los resortes .A pesar de esto se lograba a identificar la diferencia que tenía el cigüeñal, al tener puesto los contrapesos completos y ningún contrapeso así mismo cuando el cigüeñal solo se encontraba con 2 o 3 contrapesos se veía el cambio del movimiento oscilatorio en el cigüeñal en la siguiente imagen se ven la comparación del cigüeñal con el mecanismo completos y con solo 2 contrapesos

Se puede ver claramente que en la imagen anterior los extremos del cigüeñal se encuentran el eje



Figura 20: Funcionamiento del cigüeñal con contrapesos

neutro del mecanismo además de que no se la variación de movimientos en los resortes, se puede ver la gran importancia que tiene la simetría de los componentes sobre el punto central del mecanismo. Además del cambio considerado que tiene este al tener su configuración completa respecto al caso en el que no tiene todos sus contrapesos, en estos ensayos también se realizaron la comparación con el mecanismo cuando se encontraba con 2 contrapesos, al igual que en los casos anteriores se notaba la diferencia de movimiento trasversal respecto a su eje, se ilustrada en la siguiente imagen, también se nota como el eje neutro del cigüeñal varía en cada uno de los extremos de este



Figura 21: Funcionamiento del cigüeñal con contrapesos

Al comparar las tres imágenes se puede notar como el eje neutro se encuentra siempre en la mitad del eje el caso donde el mecanismo tiene todos sus contrapesos

7. Conclusiones

- El conocimiento estático de muchas piezas es de gran importancia para aplicaciones específicas de la ingeniería, a pesar de esto gran parte de los diseños de máquinas, se encuentran con movimientos por lo que el estudio dinámico de sus reacciones y movimientos es de gran importancia para la buena aplicación de estas máquinas.
- Para el diseño de este mecanismo se pudieron evidenciar las grandes ventajas que se tiene al conocer el funcionamiento dinámico y estático de los mecanismos ya que nos permiten modificar sus características para poder encontrar soluciones prácticas para aplicaciones en ingeniería.

8. Referencias

Referencias

- [1] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston y Phillip J. Cornwell (2010). Mecánica vectorial para ingenieros:Dinámica, 9na Ed., Mc Graw-Hill.
- [2] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston y Phillip J. Cornwell (2010). Mecánica vectorial para ingenieros:estatica, 9na Ed., Mc Graw-Hill.
- [3] Juan D. (2017) DISEÑO DEL SISTEMA DE BALANCEO DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN MONO CILÍNDRICO PARA OPERAR CON COMBUSTIBLES MÚLTIPLES Y DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN O POR CHISPA
- [4] UCLM. CINEMÁTICA Y DINÁMICA DEL MOTOR tomado de:
["https://previa.uclm.es/profesorado/porraysoriano/motores/temas/cinematica_ydinamica.pdf"](https://previa.uclm.es/profesorado/porraysoriano/motores/temas/cinematica_y_dinamica.pdf)