



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de la dinámica de una máquina excavadora con  
ayuda de la herramienta CAD/CAE Working Model**

Trabajo de Investigación para optar el Grado de  
Bachiller en Ingeniería Mecánico - Eléctrica

**Diego Eduardo Mechán Casiano  
Stefano Jean Paul Mujica Winchonlong**

**Asesor:  
Dr. Ing. Carlos Jahel Ojeda Díaz**

**Piura, diciembre de 2020**



## Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad analizar la dinámica del movimiento de la excavadora hidráulica Komatsu- PC4000, para lo cual se procedió a separar dicho trabajo de investigación en cuatro capítulos.

El primer capítulo describe una breve reseña histórica de las máquinas excavadoras a lo largo del tiempo y las aplicaciones que se han implementado en su evolución. El segundo capítulo describe los fundamentos teóricos del mecanismo brazo articulado, en donde se definen conceptos cinemáticos y dinámicos que son necesarios para entender el funcionamiento de la máquina.

En el tercer capítulo se aplica los conceptos mencionados en el capítulo 2 para entender el comportamiento de la excavadora hidráulica Komatsu-PC4000, además se mencionan ciertos aspectos técnicos de importancia en la excavadora. El capítulo 4 se hace uso de los softwares *Working Model* y *SolidWorks* para mostrar un prototipo de la máquina y luego realizar los cálculos numéricos y gráficos de velocidades, aceleraciones y fuerzas presentes en la máquina. Para un mejor entendimiento del funcionamiento de la excavadora se eligieron 4 posiciones críticas con la finalidad de conocer las reacciones que se producen en las uniones de los elementos de la máquina y las tensiones a las cuales están sometidos los pistones.



## Tabla de contenido

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                      | 13 |
| Capítulo 1.....                                                         | 15 |
| Estado del arte de las máquinas excavadoras .....                       | 15 |
| 1.1 Reseña histórica .....                                              | 15 |
| 1.2 Tipos de máquinas.....                                              | 15 |
| 1.3 Uso de la máquina excavadora .....                                  | 17 |
| 1.4 Estado actual .....                                                 | 19 |
| 1.4.1 Las excavadoras del siglo XXI.....                                | 19 |
| Capítulo 2.....                                                         | 21 |
| Fundamentos teóricos para la dinámica de brazos articulados.....        | 21 |
| 2.1 Conceptos básicos de los elementos articulados.....                 | 21 |
| 2.1.1 Mecanismo .....                                                   | 21 |
| 2.1.2 Grados de libertad.....                                           | 22 |
| 2.1.3 Cinemática.....                                                   | 23 |
| 2.2 Análisis del mecanismo de la excavadora.....                        | 24 |
| 2.2.1 Análisis cinemático .....                                         | 24 |
| 2.2.2 Análisis dinámico .....                                           | 25 |
| 2.3 Definición de términos.....                                         | 26 |
| Capítulo 3.....                                                         | 29 |
| Comportamiento mecánico de la máquina excavadora .....                  | 29 |
| 3.1 Fundamentos de la máquina excavadora .....                          | 29 |
| 3.2 Descripción de los elementos constitutivos de la pala mecánica..... | 32 |
| 3.3 Análisis cinemático y cinético del brazo articulado .....           | 34 |
| 3.3.1 Análisis cinemático .....                                         | 34 |
| 3.3.2 Análisis cinético del mecanismo.....                              | 37 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 4.....                                                            | 43 |
| Análisis dinámico con Working Model del brazo articulado de la pala .....  | 43 |
| 4.1 Obtención del modelo CAD .....                                         | 43 |
| 4.1.1 Cabina .....                                                         | 44 |
| 4.1.2 Pluma .....                                                          | 44 |
| 4.2 Obtención del modelo en Working Model.....                             | 47 |
| 4.3 Análisis cinemático y cinético: simulaciones en Working Model 2D ..... | 54 |
| 4.3.1 Análisis estático .....                                              | 54 |
| 4.3.2 Análisis de volcadura .....                                          | 57 |
| 4.3.3 Análisis cinético .....                                              | 58 |
| 4.4 Cálculo de la velocidad de los cilindros hidráulicos.....              | 59 |
| 4.5 Gráficas de los puntos críticos del movimiento de la excavadora.....   | 61 |
| 4.6 Análisis de resultados.....                                            | 62 |
| 4.6.1 Análisis de la excavadora sin carga .....                            | 62 |
| 4.6.2 Análisis de la excavadora con carga.....                             | 66 |
| Conclusiones.....                                                          | 71 |
| Recomendaciones .....                                                      | 73 |
| Referencias bibliográficas.....                                            | 75 |
| Planos .....                                                               | 77 |

## Lista de figuras

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Retroexcavadora Komatsu PC4000-6.....                                                         | 16 |
| Figura 2. Pala Frontal Komatsu PC4000-6. ....                                                           | 16 |
| Figura 3. Usos de la excavadora. A) retroexcavadora, B) Carga en “V”, C) Desbroce, D) Taludes.<br>..... | 18 |
| Figura 4. Excavadora “Big-Muskie”.....                                                                  | 19 |
| Figura 5. Mecanismo de 4 barras formado por elementos articulados.....                                  | 22 |
| Figura 6. Mecanismo de una excavadora.....                                                              | 23 |
| Figura 7. Movimiento del brazo de la excavadora KOMATSU PC 4000-6.....                                  | 27 |
| Figura 8. Fuerzas de la excavación.....                                                                 | 31 |
| Figura 9. Partes de una máquina excavadora.....                                                         | 33 |
| Figura 10. Diagrama cinemático del brazo de la excavadora.....                                          | 34 |
| Figura 11. Diagrama de cuerpo libre de la pluma de la excavadora.....                                   | 39 |
| Figura 12. Diagrama de cuerpo libre del brazo de la excavadora.....                                     | 40 |
| Figura 13. Diagrama de cuerpo libre de la cuchara.....                                                  | 41 |
| Figura 14. Partes de la Máquina Excavadora.....                                                         | 41 |
| Figura 15. Pieza 1 – Cabina.....                                                                        | 44 |
| Figura 16. Pieza 2 – Pluma.....                                                                         | 44 |
| Figura 17. Pieza 3 – Brazo.....                                                                         | 45 |
| Figura 18. Pieza 4 – Unión.....                                                                         | 45 |
| Figura 19. Pieza 5 – Unión Recta.....                                                                   | 46 |
| Figura 20. Pieza 5 – Cuchara.....                                                                       | 46 |
| Figura 21. Ubicación del icono ‘Guardar’.....                                                           | 47 |
| Figura 22. Ubicación del cambio de datos en la ventana ‘Guardar’.....                                   | 48 |
| Figura 23. Configuración para el archivo DXF.....                                                       | 48 |
| Figura 24. Interfaz para eliminar datos que no se desean exportar.....                                  | 49 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 25. Ubicación de la configuración números y unidades. ....            | 49 |
| Figura 26. Ventana de configuración de números y unidades.....               | 50 |
| Figura 27. Ubicación del icono ‘Importar’.....                               | 50 |
| Figura 28. Ventana para importar el archivo de interés.....                  | 51 |
| Figura 29. Pieza de color rojo importada a la interfaz de Working Model..... | 51 |
| Figura 30. Configuración para convertir a polígono.....                      | 52 |
| Figura 31. Ubicación del icono ‘apariencia’.....                             | 52 |
| Figura 32. Cuadro de dialogo apariencia.....                                 | 53 |
| Figura 33. Pala mecánica de una excavadora hidráulica. ....                  | 53 |
| Figura 34. Posición de la excavadora en contacto con el suelo.....           | 54 |
| Figura 35. Posición del brazo cuando soporta la carga.....                   | 55 |
| Figura 36. Posición del brazo a la altura máxima con carga. ....             | 56 |
| Figura 37. Posición del brazo en el instante de vaciado.....                 | 56 |
| Figura 38. Cabina, Fuerzas.....                                              | 57 |
| Figura 39. Cabina, Fuerza Resultante.....                                    | 58 |
| Figura 40. Lista de pines a analizar de la excavadora.....                   | 58 |
| Figura 41. Esquema del cilindro hidráulico de doble efecto.....              | 59 |
| Figura 42. Cilindro hidráulico de la Komatsu PC4000-6.....                   | 60 |
| Figura 43. Secuencia de movimiento de la excavadora.....                     | 61 |
| Figura 44. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin A. ....    | 62 |
| Figura 45. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin B. ....    | 62 |
| Figura 46. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin C. ....    | 63 |
| Figura 47. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin D. ....    | 63 |
| Figura 48. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin E.....     | 64 |
| Figura 49. Comportamiento de la tensión en el pistón del brazo.....          | 64 |
| Figura 50. Comportamiento de la tensión en la cuchara.....                   | 65 |
| Figura 51. Comportamiento de la tensión en la pluma. ....                    | 65 |
| Figura 52. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin A. ....    | 66 |
| Figura 53. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin B. ....    | 67 |
| Figura 54. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin C. ....    | 67 |
| Figura 55. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin D. ....    | 68 |
| Figura 56. Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin E.....     | 68 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 57. Comportamiento de la tensión del pistón en el brazo. ....  | 69 |
| Figura 58. Comportamiento de la tensión del pistón de la cuchara..... | 69 |
| Figura 59. Comportamiento de la tensión del pistón en la pluma. ....  | 70 |





### Lista de tablas

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Parámetros de altura y profundidad máximos permitidos. ....                | 30 |
| Tabla 2. Parámetros de diseño de la cuchara de la excavadora. ....                  | 30 |
| Tabla 3. Longitudes del brazo y la pluma de la excavadora. ....                     | 30 |
| Tabla 4. Fuerzas permitidas de operación. ....                                      | 31 |
| Tabla 5. Pesos de operación máximos y presión sobre el suelo de la excavadora. .... | 31 |
| Tabla 6. Parámetros de diseño de los cilindros hidráulicos. ....                    | 32 |
| Tabla 7. Parámetros del movimiento rotacional de la excavadora. ....                | 32 |
| Tabla 8. Masas de la máquina excavadora. ....                                       | 47 |
| Tabla 9. Fuerzas en la posición "a" . ....                                          | 54 |
| Tabla 10. Fuerza en la posición "b" . ....                                          | 55 |
| Tabla 11. Fuerza en la posición "c" . ....                                          | 56 |
| Tabla 12. Fuerza en la posición "d" . ....                                          | 57 |
| Tabla 13. Resumen de las fuerzas en los cilindros de los pistones . ....            | 66 |
| Tabla 14. Resumen de las fuerzas en los cilindros de los pistones con carga. ....   | 70 |



## Introducción

La industria de la agricultura y la minería en los últimos años ha ido creciendo de manera favorable, tal es el caso, que en los últimos 25 años el Perú ha venido consolidando su posición como uno de los principales proveedores en los exigentes mercados mundiales de alimentos; esto da paso a que la minería y la agricultura se complementen generando grandes sinergias en beneficio de la población. Cabe resaltar que se trata de la minería no metálica, puesto que esta se centra en la extracción de recursos minerales, tal como lo hace la Mina de Fosfatos Bayóvar, por ejemplo, cuyo objetivo principal es la extracción de fosfatos.

Tanto para la agricultura como para la minería, en muchas actividades es necesario desplazar cantidades importantes de material sólido en ambientes no estructurados y es aquí donde entran a tallar los cargadores frontales y las retroexcavadoras, esta última es de interés especial en este trabajo de investigación.

Una vez mencionado la maquinaria de interés y alguna de sus aplicaciones, en este trabajo de investigación se pretende analizar el comportamiento cinemático y dinámico de la excavadora hidráulica con ayuda de *Working Model*, el cual es un software de simulación muy amigable con el usuario que permite simplificar los cálculos de velocidades, aceleraciones y fuerzas presentes en la máquina de trabajo al momento de realizar las actividades de excavación, carga y descarga del fosfato en la mina.

Para obtener el modelo esquemático que se usó para realizar los cálculos necesarios, se hizo uso de la herramienta CAD *SolidWorks*, la cual permitió tener una geometría aproximada tanto en distancias como en forma de la excavadora Komatsu PC-4000.



## **Capítulo 1**

### **Estado del arte de las máquinas excavadoras**

#### **1.1 Reseña histórica**

La primera máquina excavadora data del año 1835, cuando un inventor estadounidense llamado William Otis, diseña la primera máquina excavadora. Sin embargo, debido a que, en esa época, la mano de obra era escasa y cara, no se pudo desarrollar dicha idea.

Fue hasta 20 años más tarde que recién se logró implementar esa maquinaria en diferentes obras tales como contrición de ferrocarriles y minería.<sup>1</sup>

Desde esos años, la utilización de estas máquinas, así como su requerimiento, se ha elevado de manera exponencial y por ello, su desarrollo. Con motores que llegan a tener una potencia de 4000 HP y poder tener hasta 810 000 kg como peso de operación.

#### **1.2 Tipos de máquinas**

Se pueden clasificar<sup>2</sup> de la siguiente manera:

- a. Según su accionamiento:
  - Excavadora de cable
  - Excavadora Hidráulica
- b. Según su sistema de translación
  - Excavadoras montadas sobre cadena
  - Excavadoras montadas sobre ruedas
  - Excavadoras montadas sobre rieles
  - Excavadoras montadas sobre barcos
- c. Según el tipo de operación:
  - Excavadora normal
  - Excavadora de mordazas
  - Excavadora de tambor

Además, en Perú se usa diferentes modelos de excavadoras, por ejemplo:

---

<sup>1</sup> Evolución de la máquina pesada, IMCOTEC

<sup>2</sup> Maquinaria y Equipo de Construcción, maquinariaspesadas.org



**Figura 1.** Retroexcavadora Komatsu PC4000-6.

Fuente: Julián, O. (2020). Fotografía tomada desde la Mina de Bayóbar.



**Figura 2.** Pala Frontal Komatsu PC4000-6.

Fuente: Julián, O. (2020). Fotografía tomada desde la Mina de Bayóbar.

### 1.3 Uso de la máquina excavadora

Para tener una idea de cuál es el uso que se le da a una excavadora, es necesario conocer los componentes. Una excavadora está constituida por lo que se llama una casa, tren de rodaje, pluma, palo y cubo. Estos componentes cuentan con motores, pistones y algunos con engranajes para mover el equipo, levantar el cucharón y un lugar para que alguien se siente y tenga el control de la maquinaria.

Los principales usos de una excavadora son cavar zanjas, agujeros y cimientos, cargar, girar y desplazar objetos, otorgando el poder para hacer estas tareas de una manera más fácil y eficaz.

Existe una amplia gama de industrias para las que son utilizadas, incluyendo la silvicultura, la minería y todo tipo de construcción. Además de excavar, estas máquinas se utilizan comúnmente para proyectos como la demolición, el manejo de materiales o simplemente el levantamiento pesado de objetos.

Debido a la existencia de una amplia gama de utilidades, tiene sentido que haya diferentes tipos de excavadoras, lo más adecuado es encontrar la que se acomode para el trabajo en cuestión. Un ejemplo es una excavadora de ruedas y orugas, que es perfecta cuando el trabajo requiere cosas como excavación, manipulación de materiales, corte de cepillos, demolición, minería a cielo abierto, trabajo forestal y mucho más. Existen excavadoras de gran escala que se usan para trabajos de gran tamaño.

También existen miniexcavadoras, que son más pequeñas y ligeras, lo que hace que sean más fáciles de transportar de forma rápida y eficiente en cuanto a construcción se refiere. Estos tipos de excavadoras compactas son ideales para zanjas, así como una amplia gama de trabajos de servicios públicos.

Algunos métodos que se realiza en los Trabajos en excavación y carga se muestran en las siguientes figuras.

A)



B)



C)



D)



**Figura 3.** Usos de la excavadora. A) retroexcavadora, B) Carga en "V", C) Desbroce, D) Taludes.

Fuente: Maquinaria pesada repuestos en general. (s. f.).

## 1.4 Estado actual

### 1.4.1 Las excavadoras del siglo XXI

Los trabajos realizados por la excavadora son y siguen siendo extender, cavar, extraer y volcar, Independientemente del tamaño (desde gigantescas a diminutas), del estilo (sobre orugas o ruedas) y de la aplicación (desde dragado subacuático a excavaciones mineras).

Actualmente, la mayor parte de los fabricantes de excavadoras del mundo comienzan con esas cuatro funciones simples como la base para el diseño de cada máquina. Pero a medida que se produjeron avances tecnológicos en áreas clave de la hidráulica y del posicionamiento preciso (sistema de navegación global por satélite, GNSS) de las máquinas de construcción, la excavadora del siglo XXI ha dejado atrás a las pioneras de la industria.

**1.4.1.1 Las mega excavadoras.** Un tipo de excavadora moderna son las enormes excavadoras hidráulicas, las cuales son máquinas de gran producción, poderosas y autopropulsadas sobre orugas, que pueden realizar espectaculares operaciones de excavación, extracción, descarga, etc., predominantes en el sector minero a partir de la evolución de las excavadoras del S.XX y que con el paso del tiempo incorporaron la hidráulica, los automatismos, la electrónica, la informática, etc.; gracias a esto fueron convirtiéndose en auténticos gigantes que pueden llegar a pesar 1000 toneladas, como es el caso del modelo de mayor envergadura. Estas máquinas las fabrican cuatro marcas: Caterpillar, Hitachi, Komatsu y Liebherr.



**Figura 4.** Excavadora “Big-Muskie”.

Fuente: Ránking de las 10 excavadoras hidráulicas más grandes del mundo (s. f.).

**1.4.1.2 Las excavadoras de obra pública.** Si desde el principio de los tiempos el hombre ha destinado esfuerzos e imaginación al desarrollo de maquinaria cada vez más eficaz ha sido, obviamente, con el objetivo de sustituir la fuerza humana por la mecánica haciendo el trabajo menos fatigoso. También lo realiza para poder llevar a cabo obras de mayor envergadura y en menor tiempo.

La evolución y adaptación de la maquinaria de obras públicas, es otro de los avances de las excavadoras modernas, si bien se remonta en su concepto más primario a siglos anteriores, hay que encuadrarla en el XX, limitarla a los últimos cien años en los que los equipos de obra han pasado de un estadio evolutivo en el que poco, o nada, había cambiado desde hacía varios siglos, a una desenfrenada carrera paralela a la del resto de avances tecnológicos, más y más acelerada cuanto más nos acercábamos a la frontera del siglo XXI. Puede decirse que la historia y evolución de la maquinaria de obras públicas, construcción y minería concentra sus hitos fundamentales en la segunda mitad del siglo XX y en lo que llevamos del actual.

En ninguna otra época histórica han sido tantos y tan definitivos los avances como en los últimos sesenta años, hasta tal punto que los rasgos morfológicos o tecnológicos de cualquiera de los tipos de equipos de obras públicas o excavación actuales son deudos de las técnicas aplicadas a finales del siglo XX. (Ránking de las 10 excavadoras hidráulicas más grandes del mundo, s. f.).

**1.4.1.3 Excavadores Eléctricas.** La irrupción del motor eléctrico no se frena en el sector de la automoción. A partir de los coches se ha saltado a un amplio abanico de vehículos. Motos, autobuses y camiones han abrazado también esta forma alternativa de propulsión.

Hay otras áreas, en cambio, más resistentes al cambio del motor eléctrico, esto ocurre con sectores donde el motor eléctrico tiene mayores complicaciones para su instalación. Es el caso de los vehículos pesados de obra o para la minería. Se trata monstruos de metal, cuyo peso se cuenta por decenas de toneladas. La potencia que necesitan es enorme, y su consumo energético, muy elevado.

Un ejemplo de la excavadora eléctrica es la Caterpillar pesa 26 toneladas y se ha transformado incorporándole una batería de 300 kWh (solo este componente pesa 3,4 toneladas). Su autonomía está entre las 5 y las 7 horas. El caso de la excavadora de Caterpillar no es único. Y tampoco rompe récords de tamaño. Este lo ostenta de momento el camión de volquete que se adaptó en Suiza. Su batería es de 700 kWh y puede desarrollar 800 caballos de potencia “Tipos de excavadoras y sus diferentes usos -PerúConstruye” (2020).

## Capítulo 2

### Fundamentos teóricos para la dinámica de brazos articulados

#### 2.1 Conceptos básicos de los elementos articulados

La dinámica está constituida por dos disciplinas (Cinemática y cinética), que son importantes para el correcto entendimiento del funcionamiento de un elemento articulado y el diseño de mecanismos.

La representación simplificada de una máquina (cuerpos rígidos unidos por articulaciones) son los mecanismos que están conformados por elementos articulados, los cuales permiten el movimiento definido.

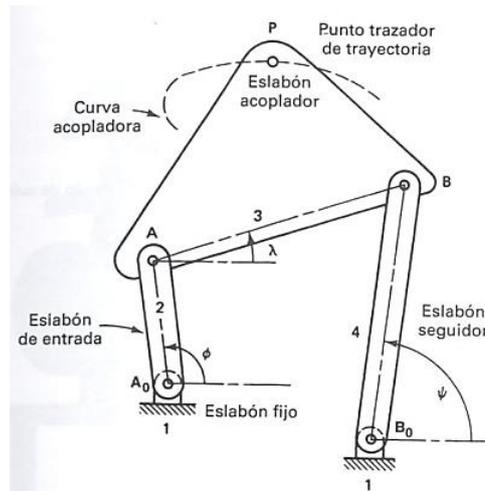
##### 2.1.1 Mecanismo

Un mecanismo es un conjunto de elementos dispuestos que permiten la transferencia de movimiento y fuerza. Fuente: Erdman, Sandor, Cera & Sandor (1998). En cambio, una máquina permite la transferencia de energía por medio del movimiento.

Para los mecanismos que funcionan a elevadas velocidades, primero se realiza un análisis cinemático de las velocidades y aceleraciones, para posteriormente realizar el análisis dinámico con las fuerzas estáticas y dinámicas generadas por las aceleraciones. Fuente: Norton R. (2000)

Un elemento articulado consiste en elementos rígidos conectados mediante pasadores o juntas prismáticas, que forman cadenas cinemáticas. Fuente: Erdman, Sandor, Cera & Sandor (1998). Si las cadenas cinemáticas están unidas a un elemento fijo y por lo menos con un grado de libertad, se denominan mecanismos. Caso contrario, si tal unión no tiene movilidad se denomina estructura.

El mecanismo más simple es el formado por 4 elementos, el cual se muestra en la figura:



**Figura 5.** Mecanismo de 4 barras formado por elementos articulados.

Fuente: Erdman, Sandor, Cera & Sandor (1998).

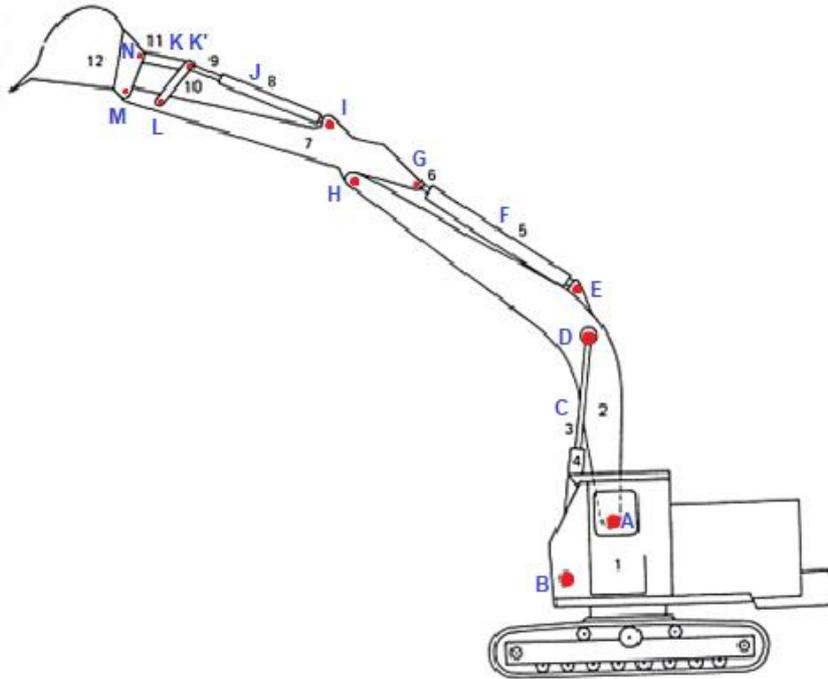
### 2.1.2 Grados de libertad

Los grados de libertad de un mecanismo representa a los parámetros (medidas) necesarios para que una posición en el espacio quede completamente definida para cualquier tiempo, por lo que el sistema deberá estar referenciado a cualquier sistema de referencia seleccionado.

Cada junta del mecanismo eliminará dos grados de libertad entre elementos sucesivos. Por lo tanto, la ecuación de Gruebler que permite determinar los grados de libertad de un mecanismo de " $n$ " elementos conectados por  $f_1$  juntas de pasador y considerando a la tierra como elemento fijo, es:

$$F = 3(n - 1) - 2f_1 \quad (1)$$

Una excavadora se considera que tiene 12 elementos (considerando a la cabina como elemento fijo), 3 juntas deslizantes (cilindro – pistón) y 12 juntas de pasador, tal como se muestra en la Figura.



**Figura 6.** Mecanismo de una excavadora.

Fuente: Erdman, Sandor, Cera & Escalona (1998).

Entonces, los grados de libertad de una excavadora son:

$$F = 3(12 - 1) - 2(15) = +3$$

Los elementos articulados de la excavadora requieren de 3 coordenadas de entrada para determinar la posición de los elementos referidos a la cabina.

En caso se desee considerar las juntas de rodamiento y deslizamiento, se emplea la ecuación de Gruebler ampliada:

$$F = 3(n - 1) - 2f_1 - 1f_2 \quad (2)$$

$f_2$  representa a las juntas que permiten dos grados de movimiento relativo (rodamiento y deslizamiento).

### 2.1.3 Cinemática

Consiste en el estudio del movimiento independientemente de las fuerzas que las producen, es decir, el estudio de la posición, la velocidad, aceleración, desplazamiento y rotación del elemento, constituyéndose en una importante etapa dentro del diseño de elementos articulados. Fuente: Castillo Ramírez (2005).

La cinemática tiene como objetivo diseñar los movimientos deseados del conjunto de elementos considerados en el análisis, y determinar matemáticamente las posiciones,

velocidades y aceleraciones que se producen para un posterior análisis de fuerzas. Fuente: Castillo Ramírez (2005).

Generalmente, en el diseño de máquinas reales se considera a los elementos que lo conforman como poco flexibles, ya que se diseñan con materiales con bajo coeficiente de deformación. Por lo tanto, el análisis cinemático de una máquina excavadora se suponen las deflexiones despreciables y los elementos que la conforman como rígidos Fuente: Castillo Ramírez (2005).

El análisis cinemático busca obtener la posición de todos los elementos de entrada e intermedios del mecanismo, determinar las velocidades y aceleraciones de estos, para que posteriormente, se determinen tales parámetros a lo largo de un ciclo de movimiento. Fuente López C. (2017).

## **2.2 Análisis del mecanismo de la excavadora**

Para poder iniciar a realizar un análisis dinámico de un sistema es necesario determinar las aceleraciones que se presentan en este, el valor de esta variable se puede determinar mediante la realización de un análisis cinemático. Fuente: Ipiña U. (2016). Es por ello por lo que en esta sección primero se hablará de la teoría presente en un análisis cinemático de una excavadora y posteriormente se hablará propiamente de un análisis dinámico.

### **2.2.1 Análisis cinemático**

Cuando se menciona un análisis cinemático, es necesario hablar de la resolución de tres problemas que se presentan en mecanismos Fuente: Ipiña U. (2016):

Problema de posición: este es un problema de gran complejidad, ya que se trata de un análisis a un comportamiento no lineal. En este problema consisten en determinar la posición y número de los elementos, así como el grado de libertad del sistema.

Cálculo de velocidades y aceleraciones: este es de resolución sencilla debido a que es un problema lineal. La resolución de este problema nos determina las velocidades y aceleraciones de diferentes elementos del sistema al realizar un cambio de velocidad y/o aceleración de uno de los elementos del mecanismo.

Análisis de posiciones sucesivas: este último problema consiste en evaluar las variables de velocidad, aceleración en las diferentes posiciones que se presenta el elemento en un ciclo de desplazamiento.

Para determinar las velocidades se utilizará la siguiente ecuación:

$$V_b = V_a + w_a \times r_{b/a} + V_{rel} \quad (3)$$

Donde:

$V_b$ : representa el punto b que está relacionado con a.

$V_a$ : representa la velocidad en el punto a sobre el cual se analiza el punto b.

$\omega_a$ : representa la velocidad angular en el punto a.

$r_{b/a}$ : representa la distancia que hay entre el punto b y a.

$V_{rel}$ : presenta la velocidad que se produce en el punto b a causa de otra velocidad. En un análisis realizado a un punto próximo al origen este valor se omite.

Para determinar las aceleraciones se usa la siguiente expresión:

$$a_e = a_c + \alpha_c \times r_{e/c} - \omega_c^2 \times r_{e/c} + a_{rel} + 2\omega_c \times V_{rel} \quad (4)$$

Donde:

$a_e$ : representa la aceleración en el punto e.

$a_c$ : representa la aceleración del punto c sobre la cual se realiza el análisis del punto e.

$\alpha_c$ : representa la aceleración angular presente en el punto c.

$r_{e/c}$ : representa la recta que separa a los puntos c y e.

$\omega_c$ : representa la velocidad angular presente en el punto c.

$a_{rel}$ : representa la aceleración que se produce en el punto 'e' a causa de una aceleración originada por un punto relacionado con el punto 'e' pero que es diferente a la  $\alpha_c$  ya evaluada.

### 2.2.2 Análisis dinámico

Cuando se desea realizar un análisis dinámico de un sistema aparece la variable masa, la cual interviene en variables como la fuerza o los momentos Fuente: Ipiña U. (2016). En este tipo de análisis también se tiene en cuenta el cálculo de las reacciones, que son aplicados para el cálculo resistente de los elementos

**2.2.2.1 Teoremas fundamentales de la dinámica.** A continuación, se hará una breve mención de los fundamentos dinámicos que se hacen presente en un análisis dinámico de una excavadora, los cuales son:

**2.2.2.2 La segunda ley de Newton.** Como se conoce esta ley de Newton establece una relación de la fuerza con la masa y aceleración que posee un cuerpo en un determinado instante. Para poder realizar un análisis simplificado y porque se cree que aplica perfectamente al análisis del mecanismo que se va a realizar, se considera la masa del

elemento constante durante todo el análisis. Con ello la ecuación que describe este comportamiento es la que se encuentra en el estudio. Fuente: Ipiña U. (2016):

$$\sum_{i=1}^N F_{\text{ext}}^i = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(m \cdot v_G) = m \cdot a_G \quad (5)$$

De la cual  $a_G$  es la aceleración de su centro de gravedad y  $p$  la cantidad de movimiento sólido.

**2.2.2.3 Teorema del Momento Cinético.** Este teorema hace referencia a las fuerzas exteriores que actúan sobre el elemento a estudiar en un punto determinado. La ecuación que describe a esta variable es expresada en el estudio Fuente: Ipiña U. (2016), y se expresa a continuación:

$$N_o = \frac{dH_o}{dt} + v_o \quad (6)$$

Donde:

$N_o$  = es el momento de fuerzas exteriores respecto del punto de análisis.

$H_o$  = es el momento cinético respecto el punto de análisis.

$v_o$  = la velocidad en el punto de análisis.

Cuando se tiene el caso en que el punto de análisis es el centro de masas del elemento a analizar se elimina el último término y queda:

$$N_G = \frac{dH_G}{dt} \quad (7)$$

### 2.3 Definición de términos

La mecánica es una parte del análisis científico que se encarga del estudio de los movimientos, el tiempo y las fuerzas, y se clasifica en análisis estático y dinámico. La estática realiza el estudio de sistemas estacionarios, es decir, de aquellos en que el tiempo no es un parámetro influyente mientras que el estudio dinámico se refiere a los sistemas que son cambiantes en el tiempo. Fuente: Shigley & Uicker (1980).

Una máquina se define como la combinación de cuerpos resistentes que contienen mecanismos y por medio de ellos se producen fuerzas significativas útiles para realizar un trabajo acompañado de movimientos determinados.

El eslabón es un cuerpo rígido, se usa para designar una pieza de una máquina o un componente de un mecanismo. Dentro de un mecanismo, el eslabón de entrada o impulsor debe estar conectado entre sí con la finalidad de que se transmita movimiento al seguidor o

eslabón de salida; las conexiones entre eslabones se conocen como pares cinemáticos. Fuente: Shigley & Uicker (1980).

El orden de un eslabón corresponde al número de nodos por eslabón, es decir, binarios, ternarios, cuaternarios, etc.

Las juntas son uniones entre dos o más eslabones, las cuales permiten un movimiento entre los eslabones conectados. También existen las semijuntas, las cuales permiten tanto el rodamiento como el deslizamiento.

La determinación del número y orden de eslabones y juntas que son necesarios para producir movimiento de denomina síntesis de número. Permite conocer todas las posibles combinaciones de eslabones que producirán cualquier GDL.

La rotabilidad es la capacidad de que por lo menos un eslabón que forma parte de una cadena cinemática realice una revolución completa con respecto a los otros eslabones y mediante esto defina la clase de la cadena cinemática. Fuente: Norton R. (2009).

La revolvabilidad es un término que se usa para indicar los eslabones que pueden girar dentro de una cadena.

La cadena cinemática es el ensamble de eslabones que se encuentran conectados móvilmente mediante articulaciones, de manera que se produzca un movimiento controlado en respuesta a un movimiento que se le asigna. Fuente: Shigley & Uicker (1980).

La movilidad de un mecanismo corresponde al número de parámetros de entrada que se deben controlar de manera independiente, con la finalidad de hacer cambiar de posición al dispositivo. Se puede clasificar según el número de grados de libertad. Fuente: Shigley & Uicker (1980).

El movimiento de un cuerpo rígido, para un caso en general dentro de un marco de referencia único en el plano bidimensional, tendrá movimiento complejo, el cual presenta la combinación del movimiento de rotación y traslación. En el caso tridimensional, existirá la rotación alrededor de un eje y traslación simultánea. Fuente: Norton R. (2009).

La rotación pura se presenta cuando un punto, dentro de un cuerpo, que corresponde al centro de rotación no posee movimiento con respecto al marco de referencia estacionario (Norton, 2009).

La traslación pura de un cuerpo sucede cuando los puntos del cuerpo describen trayectorias paralelas, es decir al trazar una línea de referencia en el cuerpo, este cambia su posición, pero no su orientación angular.

El movimiento complejo de un cuerpo corresponde a una combinación simultánea de rotación y traslación, es decir, cualquier línea de referencia que es trazada en el cuerpo cambia su posición y su orientación angular, además los puntos en el cuerpo recorrerán trayectorias

no paralelas y el centro de rotación variará constantemente de ubicación. Fuente: Norton R. (2009).

El ángulo de transmisión se define como el valor absoluto del ángulo agudo del par de ángulos formado en la intersección de dos eslabones y varía conforme el eslabonamiento pasa por su intervalo de movimiento. Además, se considera como una medida de la calidad de transmisión de fuerza y velocidad en la junta. Fuente: Norton R. (2009).

El marco de referencia inercial es un término utilizado para denotar un sistema que por acción propia no tiene aceleración.

La posición de un punto en el cuerpo se define mediante un vector posición, los ejes de referencia son arbitrarios y se eligen de acuerdo con el observador.

El desplazamiento de un punto corresponde al cambio de su posición y se define como la distancia en línea recta entre la posición inicial y la final de un punto que se ha movido con respecto al marco de referencia. Fuente: Norton R. (2009).

La velocidad es la tasa de cambio de posición con respecto al tiempo, esta velocidad puede ser angular o lineal de acuerdo con el tipo de movimiento que realiza el cuerpo.

La aceleración, es la tasa de cambio de la velocidad con respecto al tiempo, dichas aceleraciones pueden ser angulares o lineales.

La componente de Coriolis se hace presente cuando una junta deslizante está presente en un eslabón rotatorio.

Un cuerpo en movimiento que es observado desde un sistema de referencia móvil es denominado movimiento relativo, este concepto es utilizado para el cálculo de la velocidad y la aceleración relativa, en el caso que existan. Fuente: Erdman, Sandor, Cera & Escalona (1998).

El radio en donde se concentra toda la masa del cuerpo se denomina radio de giro.

El centro de percusión corresponde a un punto del cuerpo, que cuando es golpeado por una fuerza, tendrá asociado con este otro punto denominado centro de rotación, en donde las fuerzas de reacción serán nulas. Fuente: Norton R. (2009).

## Capítulo 3

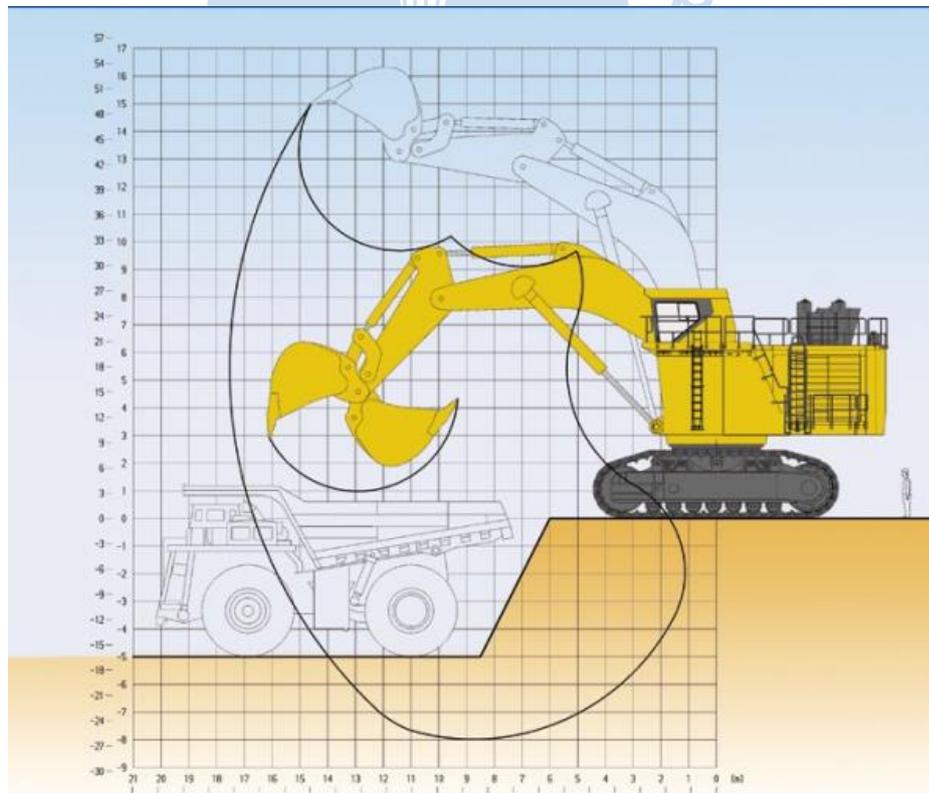
### Comportamiento mecánico de la máquina excavadora

#### 3.1 Fundamentos de la máquina excavadora

La máquina excavadora seleccionada para hacer el análisis es la KOMATSU PC 4000-6 con número de serie 08180 & 08181, la cual es usada en el sector minero del Perú. Dicha excavadora posee dos variaciones de uso, una es como pala frontal y la otra como excavadora.

En el presente trabajo se realizará un análisis cinético y cinemático de la máquina KOMATSU funcionando como excavadora.

La Figura 7, muestra el trazo del recorrido permisible, que puede realizar el brazo de la máquina cuando funciona como excavadora.



**Figura 7.** Movimiento del brazo de la excavadora KOMATSU PC 4000-6.

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6.

Los límites máximos de trabajo como excavadora se muestran en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Parámetros de altura y profundidad máximos permitidos.

| Parámetros                                    | Unidades (mm) |
|-----------------------------------------------|---------------|
| Altura máxima de excavación                   | 15 000        |
| Altura máxima de descarga                     | 9 700         |
| Profundidad máx. de excavación                | 8 000         |
| Alcance máx. de excavación                    | 17 500        |
| Alcance máx. de excavación al nivel del suelo | 16 650        |

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

Los límites de trabajos son datos necesarios que se usaran para establecer las restricciones de la máquina al momento de realizar la simulación.

Las características de la cuchara o balde de la excavadora, que son obtenidos del catálogo y se observan en la **Tabla 2**, serán útiles para establecer las dimensiones y realizar el diseño CAD, para posteriormente importarlo y utilizarlo en la simulación, además brindan información acerca de la magnitud y el tipo de carga que puede tener el brazo de la excavadora durante el trabajo.

**Tabla 2.** Parámetros de diseño de la cuchara de la excavadora.

| Capacidad de balde (Colmado 1:1) SAE | Ancho | Número de dientes | Paquete elementos de desgaste (WP) | Peso | Densidad máx. de material (Suelto) |
|--------------------------------------|-------|-------------------|------------------------------------|------|------------------------------------|
| m <sup>3</sup>                       | mm    | -                 | -                                  | ton  | ton/ m <sup>3</sup>                |
| 19,0                                 | 3 050 | 5                 | 3                                  | 22,4 | 2,1                                |
| 22,0                                 | 3 790 | 6                 | 2                                  | 23,0 | 1,8                                |
| 23,0                                 | 3 790 | 6                 | 2                                  | 23,4 | 1,7                                |

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

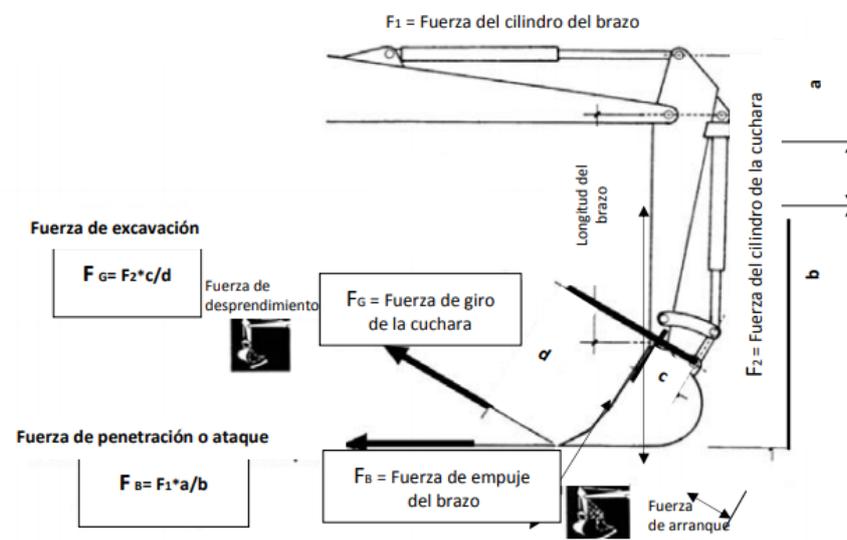
Las dimensiones de las demás partes mecánicas de una excavadora también están definidas por el tipo de trabajo realizado, para el caso del trabajo como excavadora, las dimensiones del brazo y la pluma serán:

**Tabla 3.** Longitudes del brazo y la pluma de la excavadora.

| Parámetros     | Dimensiones (mm) |
|----------------|------------------|
| Largo de pluma | 9 750            |
| Largo de brazo | 4 500            |

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

La Fuerza de empuje del brazo o balancín de la excavadora que ejerce el cilindro hidráulico que actúa sobre él y que se considera aplicada en los dientes. Esta fuerza es llamada (en las fichas técnicas de los fabricantes) Fuerza de Penetración o Ataque, y es la que se produce cuando se hinca el cazo.



**Figura 8.** Fuerzas de la excavación.

Fuente: Procedimientos seguros con maquinaria.

**Tabla 4.** Fuerzas permitidas de operación.

| Parámetros               | Dimensiones (kN) |
|--------------------------|------------------|
| Fuerza de arranque (SAE) | 1 155 kN         |
| Fuerza de desgarre (SAE) | 1 050 kN         |

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

Los pesos de operación aproximados y la presión sobre el suelo de la KOMATSU PC 4000-6, cuando funciona como excavadora, tiene una cuchara con una capacidad de 22,0 m<sup>3</sup>, longitud de brazo de 4.5m y longitud de pluma de 9.75m, según el ancho de las orugas o zapatas, se muestran en la tabla siguiente.

**Tabla 5.** Pesos de operación máximos y presión sobre el suelo de la excavadora.

| Ancho de zapata (mm) | Peso de operación (ton) | Presión sobre el suelo (N/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| 1 200                | 394                     | 21,6                                        |
| 1 500                | 399                     | 17,5                                        |

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

Las características del sistema hidráulico, los cuales son determinados por los cilindros de la marca Catsu, que son montados específicamente para las excavadoras del tipo PC4000,

se muestran en la **Tabla 6**, las cuales servirán para calcular la velocidad de todos los cilindros que forman parte de la mecánica.

**Tabla 6.** Parámetros de diseño de los cilindros hidráulicos.

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| Flujo nominal (salida total)     | 1 140 l/min   |
| Ajuste de válvula de alivio      | 310 bar       |
| Tasa de flujo de giro            | 1 590 l/min   |
| Filtros en línea de alta presión | 200 micras    |
| <b>Diámetro</b>                  | <b>1100mm</b> |

Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

El accionamiento eléctrico para el sistema del giro de la pala excavadora es dado por un motor eléctrico de inducción de jaula ardilla, los parámetros que se obtienen del motor serán importantes debido a que brindan información sobre el torque y la velocidad angular que es otorgado a la pala mecánica.

**Tabla 7.** Parámetros del movimiento rotacional de la excavadora.

|                                     |                    |
|-------------------------------------|--------------------|
| Motores hidráulicos y cajas de giro | 2                  |
| Freno de giro, servicio             | freno hidráulico   |
| Freno de giro, estacionamiento      | húmedo, multidisco |
| <b>Velocidad de giro (máxima)</b>   | <b>4,0 rpm</b>     |

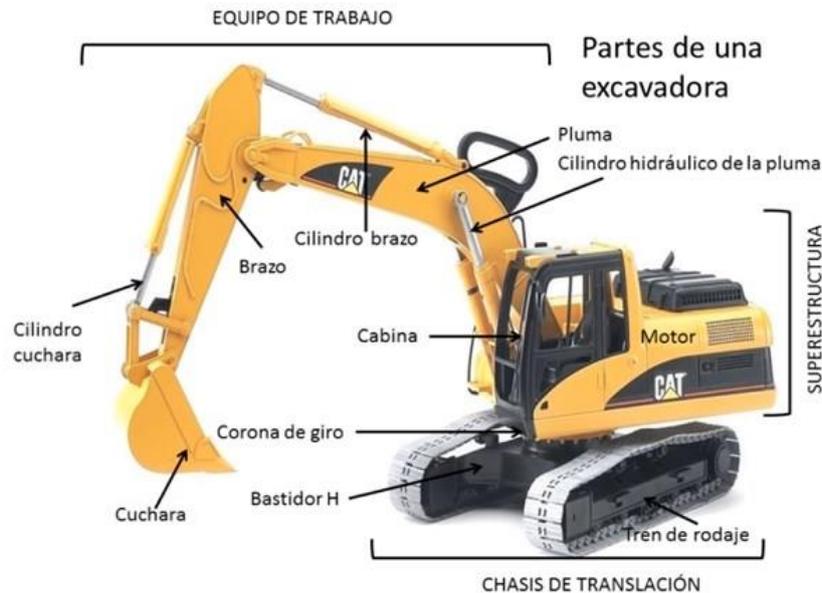
Fuente: Catálogo KOMATSU PC 4000-6 (s.f.).

### 3.2 Descripción de los elementos constitutivos de la pala mecánica

Las excavadoras hidráulicas o retroexcavadoras son máquinas diseñadas y fabricadas para realizar labores de excavación en diversos tipos de suelos.

La pala excavadora está constituida por los siguientes elementos fundamentales:

- La pluma.
- El brazo.
- La cuchara.
- Cilindro Hidráulico de la pluma.
- Cilindro de cuchara.
- Cilindro de brazo.



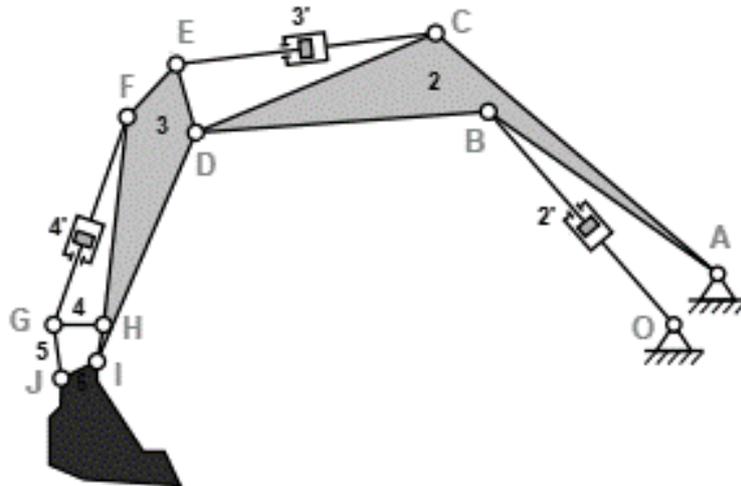
**Figura 9.** Partes de una máquina excavadora.

Fuente: "EXCAVADORA HIDRÁULICA ¿Qué es y cómo funciona?" (2019).

- **La pluma:** Es un elemento de sección variable compuesto de una viga de acero en cajón que se encuentra articulado en la parte delantera del tractor a la derecha de la cabina del operador.
  - **El brazo:** Al igual que la pluma este elemento también es de sección variable, uno de sus extremos se encuentra articulado en la punta de la pluma mientras que el otro en la cuchara.
  - **La cuchara:** Es el elemento que sirve de recipiente para depositar el material excavado, consta de dientes en su borde con el objetivo de facilitar el arranque de los materiales.
  - **Cilindro Hidráulico de la pluma:** Son dos cilindros hidráulicos apoyados en el tractor y conectados en el codo de la pluma, su función es controlar los movimientos de esta.
  - **Cilindro de cuchara:** Son dos cilindros hidráulicos que están apoyados en el brazo y conectados en el vértice de la cuchara, estos cilindros tienen la función de controlar los movimientos de la cuchara.
  - **Cilindro de brazo:** Es un cilindro hidráulico apoyado en la pluma y conectado en el extremo anterior del brazo, está encargado de controlar los movimientos del brazo.
- Fuente: "EXCAVADORA HIDRÁULICA ¿Qué es y como funciona?" (2019).

### 3.3 Análisis cinemático y cinético del brazo articulado

#### 3.3.1 Análisis cinemático



**Figura 10.** Diagrama cinemático del brazo de la excavadora.

Fuente: Elaboración propia.

Se tienen 5 sólidos rígidos y 11 juntas de análisis.

#### ▪ Velocidad y aceleración del punto B

Con respecto al punto O:

$$\overline{V_B} = \overline{V_O} + \overline{\omega_2} \times \overline{r_{B/O}} + \overline{V_{rel.I}}$$

$$\overline{a_B} = \overline{a_O} + \overline{\alpha_2} \times \overline{r_{B/O}} - \omega_2^2 \times \overline{r_{B/O}} + \overline{a_{rel.I}} + 2 \overline{\omega_2} \times \overline{V_{rel.I}}$$

Donde:

$\overline{\omega_2}$  : Velocidad angular de la pluma.

$\overline{\alpha_2}$  : Aceleración angular de la pluma.

$\overline{V_{rel.I}}$  : Velocidad relativa del pistón 2'

#### ▪ Velocidad y aceleración del punto C

Con respecto al punto A:

$$\overline{V_C} = \overline{V_A} + \overline{\omega_2} \times \overline{r_{C/A}}$$

$$\overline{a_C} = \overline{a_A} + \overline{\alpha_2} \times \overline{r_{C/A}} - \omega_2^2 \times \overline{r_{C/A}}$$

▪ **Velocidad y aceleración del punto D**

Con respecto al punto A:

$$\overline{V}_D = \overline{V}_A + \overline{\omega}_2 \times \overline{r}_{D/A}$$

$$\overline{a}_D = \overline{a}_A + \overline{\alpha}_2 \times \overline{r}_{D/A} - \omega_2^2 \times \overline{r}_{D/A}$$

Con respecto al punto B:

$$\overline{V}_D = \overline{V}_B + \overline{\omega}_2 \times \overline{r}_{D/B}$$

$$\overline{a}_D = \overline{a}_B + \overline{\alpha}_2 \times \overline{r}_{D/B} - \omega_2^2 \times \overline{r}_{D/B}$$

▪ **Velocidad y aceleración del punto E**

Con respecto al punto C:

$$\overline{V}_E = \overline{V}_C + \overline{\omega}_2 \times \overline{r}_{E/C} + \overline{V}_{rel.II}$$

$$\overline{a}_E = \overline{a}_C + \overline{\alpha}_2 \times \overline{r}_{E/C} - \omega_2^2 \times \overline{r}_{E/C} + \overline{a}_{rel.II} + 2 \overline{\omega}_2 \times \overline{V}_{rel.II}$$

Donde:

$\overline{V}_{rel.II}$  : Velocidad relativa del pistón 3'

Con respecto al punto D:

$$\overline{V}_E = \overline{V}_D + \overline{\omega}_2 \times \overline{r}_{E/D}$$

$$\overline{a}_E = \overline{a}_D + \overline{\alpha}_2 \times \overline{r}_{E/D} - \omega_2^2 \times \overline{r}_{E/D}$$

▪ **Velocidad y aceleración del punto F**

Con respecto al punto E:

$$\overline{V}_F = \overline{V}_E + \overline{\omega}_3 \times \overline{r}_{F/E}$$

$$\overline{a}_F = \overline{a}_E + \overline{\alpha}_3 \times \overline{r}_{F/E} - \omega_3^2 \times \overline{r}_{F/E}$$

Donde:

$\overline{\omega}_3$  : Velocidad angular del brazo.

$\overline{\alpha}_3$  : Aceleración angular del brazo.

▪ **Velocidad y aceleración del punto G**

Con respecto al punto F:

$$\overline{V}_G = \overline{V}_F + \overline{\omega}_3 \times \overline{r}_{G/F} + \overline{V}_{rel.III}$$

$$\overline{a}_G = \overline{a}_F + \overline{\alpha}_3 \times \overline{r}_{G/F} - \omega_3^2 \times \overline{r}_{G/F} + \overline{a}_{rel.III} + 2 \overline{\omega}_3 \times \overline{V}_{rel.III}$$

Donde:

$\overline{V}_{rel.II}$  : Velocidad relativa del pistón 4'

▪ **Velocidad y aceleración del punto H**

Con respecto al punto G:

$$\overline{V}_H = \overline{V}_G + \overline{\omega}_4 \times \overline{r}_{H/G}$$

$$\overline{a}_H = \overline{a}_G + \overline{\alpha}_4 \times \overline{r}_{H/G} - \omega_4^2 \times \overline{r}_{H/G}$$

Donde:

$\overline{\omega}_4$  : Velocidad angular del sólido rígido 4.

$\overline{\alpha}_4$  : Aceleración angular del sólido rígido 4.

Con respecto al punto F:

$$\overline{V}_H = \overline{V}_F + \overline{\omega}_3 \times \overline{r}_{H/F}$$

$$\overline{a}_H = \overline{a}_F + \overline{\alpha}_3 \times \overline{r}_{H/F} - \omega_3^2 \times \overline{r}_{H/F}$$

▪ **Velocidad y aceleración del punto I**

Con respecto al punto H:

$$\overline{V}_I = \overline{V}_H + \overline{\omega}_3 \times \overline{r}_{I/H}$$

$$\overline{a}_I = \overline{a}_H + \overline{\alpha}_3 \times \overline{r}_{I/H} - \omega_3^2 \times \overline{r}_{I/H}$$

▪ **Velocidad y aceleración del punto J**

Con respecto al punto G:

$$\overline{V}_J = \overline{V}_G + \overline{\omega}_5 \times \overline{r}_{J/G}$$

$$\overline{a}_J = \overline{a}_G + \overline{\alpha}_5 \times \overline{r}_{J/G} - \omega_5^2 \times \overline{r}_{J/G}$$

Donde:

$\overline{\omega}_5$  : Velocidad angular del sólido rígido 5.

$\overline{\alpha}_5$  : Aceleración angular del sólido rígido 5.

Con respecto al punto I:

$$\overline{V}_J = \overline{V}_I + \overline{\omega}_6 \times \overline{r}_{J/I}$$

$$\overline{a}_J = \overline{a}_I + \overline{\alpha}_6 \times \overline{r}_{J/I} - \omega_6^2 \times \overline{r}_{J/I}$$

Donde:

$\overline{\omega}_6$  : Velocidad angular de la cuchara.

$\overline{\alpha}_6$  : Aceleración angular de la cuchara.

### 3.3.2 **Análisis cinético del mecanismo**

En el apartado anterior se desarrolló el análisis cinemático del mecanismo, en el cual, se determinaron las velocidades y aceleraciones de cada elemento del mecanismo. En esta sección se procederá a realizar el análisis dinámico mediante la integración del análisis cinético y estático por medio del principio D'Alembert, el cual, permitirá determinar el efecto de las aceleraciones en el movimiento, las reacciones en los pares cinemático de cada elemento del mecanismo. Este análisis es válido cuando es movimiento se realiza en un solo plano.

**3.3.2.1 Principio D'Alembert.** Generalmente, las ecuaciones formulas por Newton para el análisis de fuerzas son válidas solo para sistemas estáticos y en equilibrio, las cuales se muestran a continuación.

$$\sum F_X = 0 \quad \sum M_{P1} = 0$$

$$\sum F_Y = 0 \quad \sum M_{P2} = 0$$

$$\sum M_P = 0 \quad \sum M_{P3} = 0$$

D'Alembert realizó la reordenación de las ecuaciones planteadas por Newton para el análisis de sistemas "cuasiestáticos" a partir de situaciones dinámicas. Fuente: Norton R. (2007). Este arreglo matemático permite resolver a los problemas dinámicos por los métodos estáticos de Newton.

$$\sum F - ma_{CG} = 0 \quad (8)$$

$$\sum T - I\alpha = 0 \quad (9)$$

Se determina una Fuerza de Inercia respecto al Centro de Gravedad del elemento  $F_{in} = -ma_{CG}$ , y un Momento de Inercia  $T_{in} = -I\alpha$ ; para lo cual, se realizará el análisis para cada elemento del mecanismo.

**3.3.2.2 Diagrama de cuerpo libre de los elementos del mecanismo.** Para determinar las reacciones en las juntas de unión de los elementos y el efecto de las fuerzas que ejercen los pistones, se descomponen cada una de ellas para posteriormente poder aplicar las ecuaciones de equilibrio.

Al estar en el plano XY, se considera el efecto de la masa, por ende, el peso del elemento en el análisis.

▪ **Elemento 2**

Se calcula el valor de la aceleración en el centro de gravedad del mecanismo:

$$\overline{a_{CG2}} = \overline{a_{CG1}} + \overline{\alpha_2 \times r_{G2/0}} + \overline{\omega_2 \times \omega_2 \times r_{G2/0}}$$

Con el valor de  $a_{CG2}$  y  $\alpha_2$  se determina los valores de fuerza y momento de inercia para el elemento 2.

$$F_{in} = -m_2 a_{CG2}$$

$$T_{in} = -I\alpha_2$$

Se aplican las ecuaciones de equilibrio para determinar cada una de las fuerzas y reacciones en las juntas.

$$\sum F_X = 0$$

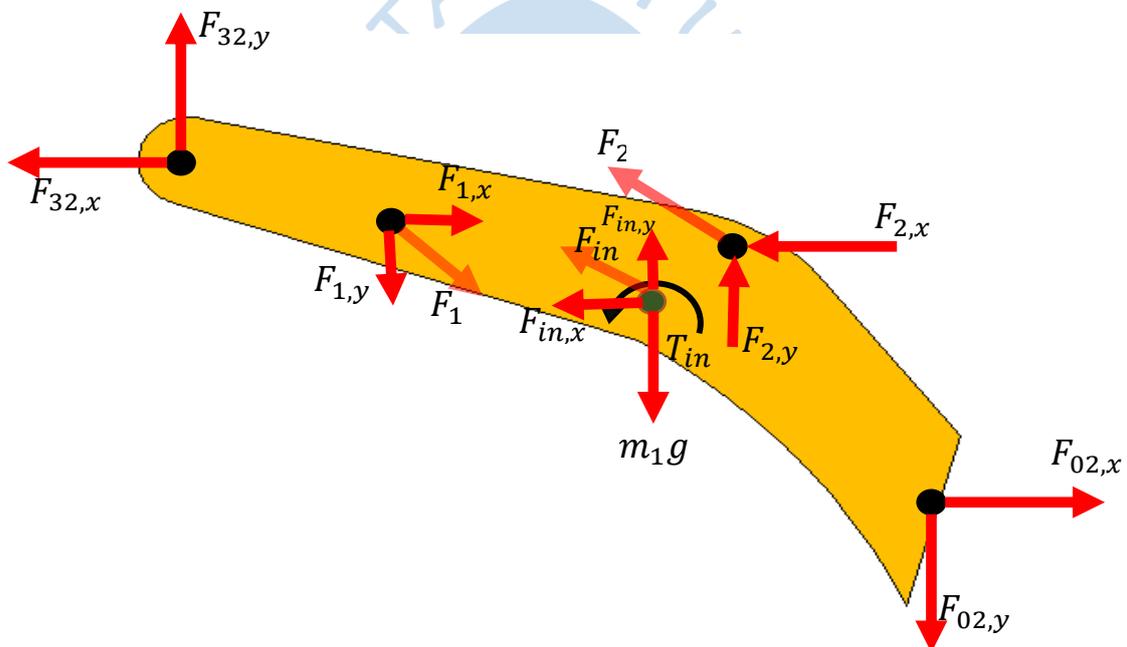
$$F_{1,x} + F_{02,x} - F_{2,x} - F_{in,x} - F_{32,x} = 0$$

Para el análisis cinético, se tomó como referencia el diagrama de cuerpo libre propuesto en el artículo 'Dynamic Analysis of an Excavator During Digging Operation'. Fuente: Yoshida, Koizumi, Tsujiuchi, Jiang & Nakamoto (2013).

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{32,y} + F_{2,y} + F_{in,y} - F_{02,y} - m_2g - F_{1,y} = 0$$

$$\sum M_{CG1} = 0$$



**Figura 11.** Diagrama de cuerpo libre de la pluma de la excavadora.

Fuente: Elaboración propia.

### ▪ Elemento 3

Se determina los valores de fuerza y momento de inercia en función de sus componentes X e Y.

Se calcula el valor de la aceleración en el centro de gravedad del mecanismo:

$$\overline{a_{CG3}} = \overline{a_{CGD}} + \overline{\alpha_3 x r_{G3/D}} + \overline{\omega_3 x \omega_3 x r_{G3/D}}$$

$$F_{in} = -m_3 a_{CG3}$$

$$T_{in} = -I\alpha_3$$

Se aplican las ecuaciones de equilibrio para determinar cada una de las fuerzas y reacciones en las juntas:

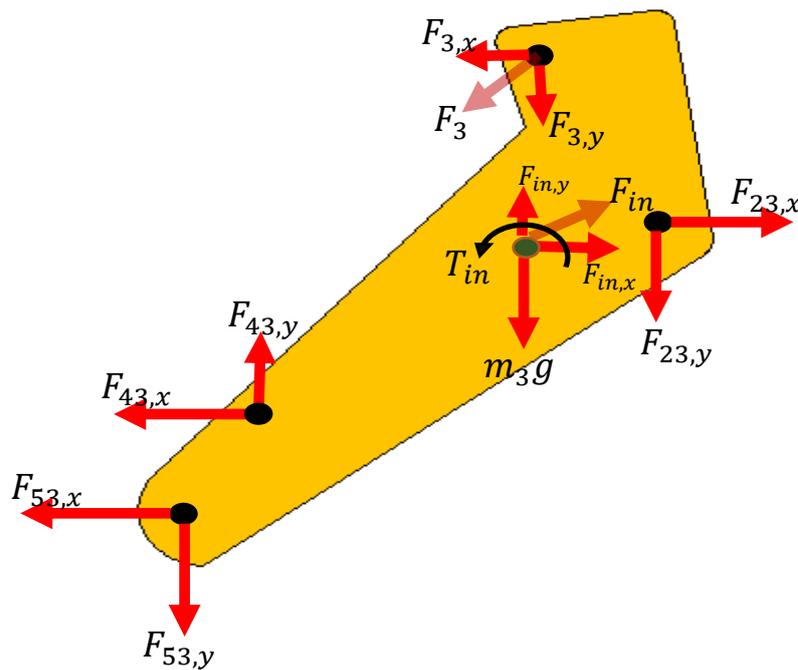
$$\sum F_x = 0$$

$$F_{23,x} + F_{in,x} - F_{3,x} - F_{43,x} - F_{53,x} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{43,y} + F_{in,y} - F_{53,y} - m_3g - F_{23,y} - F_{3,y} = 0$$

$$\sum M_{CG1} = 0$$



**Figura 12.** Diagrama de cuerpo libre del brazo de la excavadora.

Fuente: Elaboración propia.

#### ▪ Elemento 5

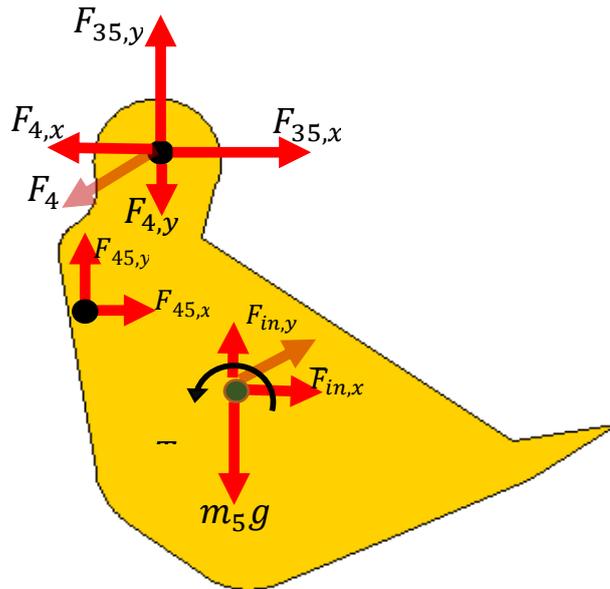
Para el elemento 5, se determinan los valores de fuerza y momento de inercia en función de sus componentes X e Y. Se considera una fuerza externa  $F_4$  que representa la carga en el cucharón.

Se calcula el valor de la aceleración en el centro de gravedad del elemento:

$$\overline{a_{CG5}} = \overline{a_I} + \overline{\alpha_5 x r_{G5/I}} + \overline{\omega_5 x \omega_5 x r_{G5/I}}$$

$$F_{in} = -m_5 a_{CG5}$$

$$T_{in} = -I \alpha_5$$



**Figura 13.** Diagrama de cuerpo libre de la cuchara.

Fuente: Elaboración propia.

Se aplican las ecuaciones de equilibrio para determinar cada una de las fuerzas y reacciones en las juntas del elemento 5:

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{in,x} + F_{45,x} + F_{35,x} - F_{4,x} = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{35,y} + F_{45,y} + F_{in,y} - m_5 g - F_{4,y} = 0$$

$$\sum M_{CG5} = 0$$

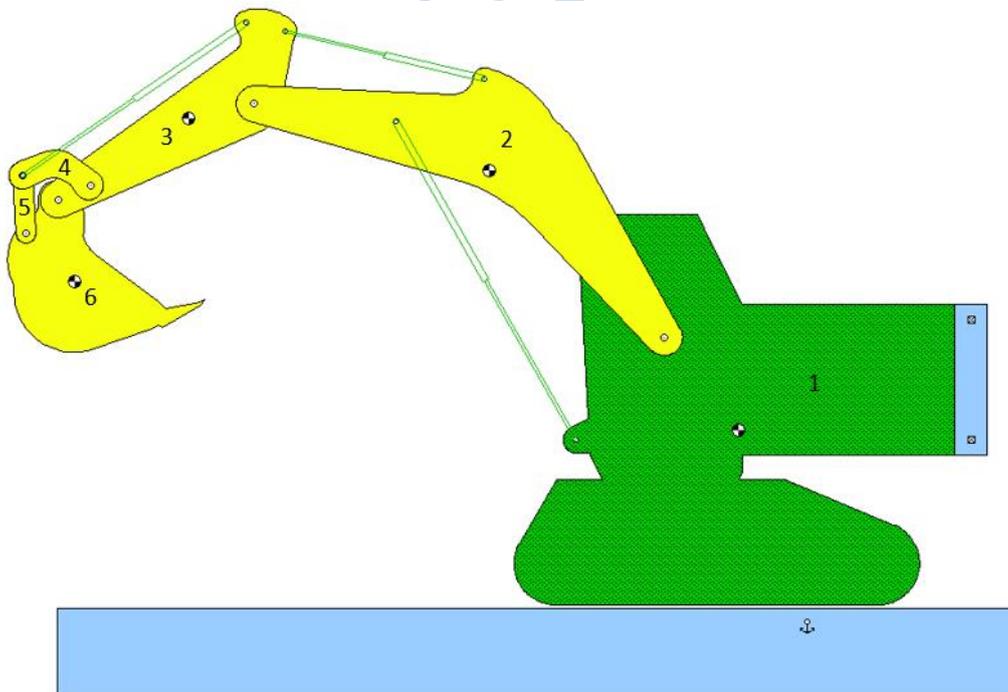


## Capítulo 4

### Análisis dinámico con Working Model del brazo articulado de la pala

#### 4.1 Obtención del modelo CAD

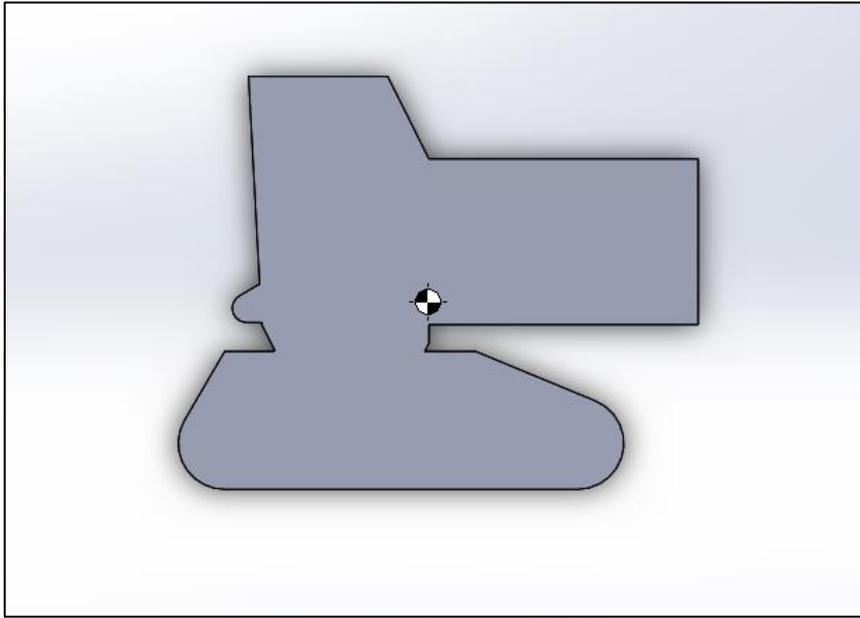
Se decidió dividir la máquina excavadora en 6 principales piezas:



**Figura 14.** Partes de la Máquina Excavadora.

Fuente: Elaboración propia.

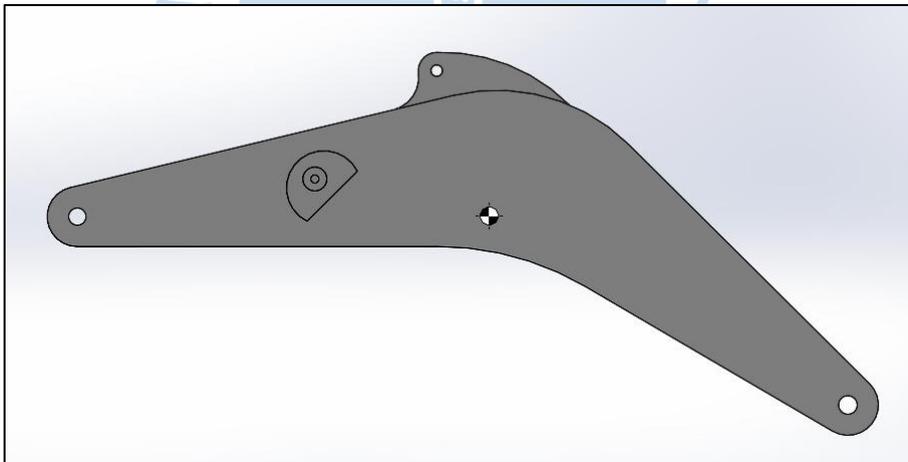
#### 4.1.1 Cabina



**Figura 15.** Pieza 1 – Cabina.

Fuente: Elaboración propia.

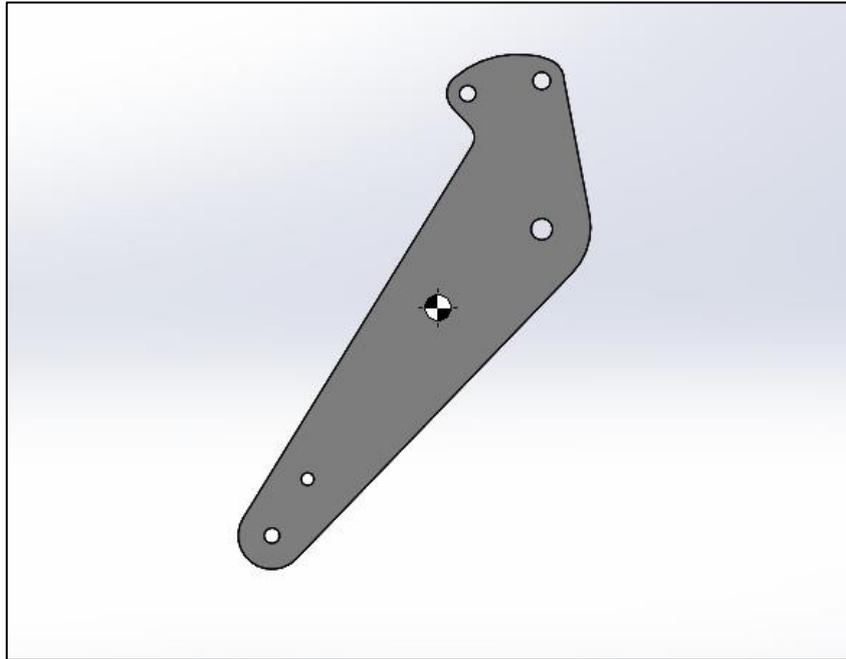
#### 4.1.2 Pluma



**Figura 16.** Pieza 2 – Pluma.

Fuente: Elaboración propia.

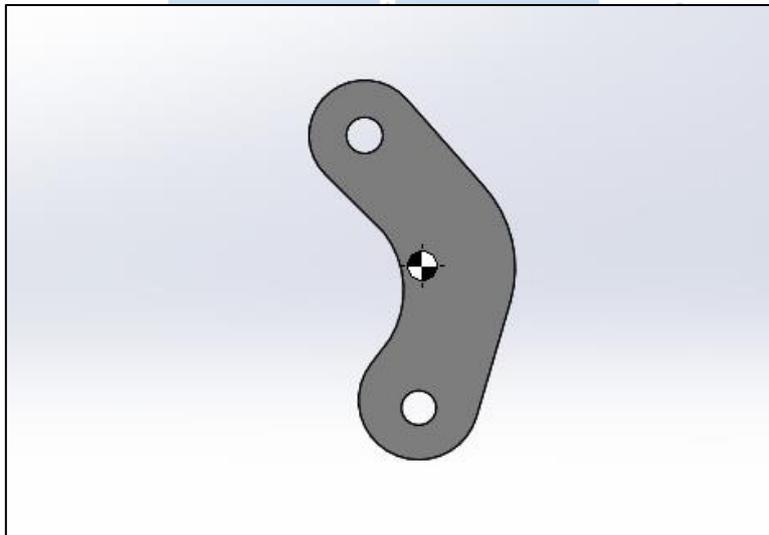
#### 4.1.3 Pieza 3: Brazo



**Figura 17.** Pieza 3 – Brazo.

Fuente: Elaboración propia.

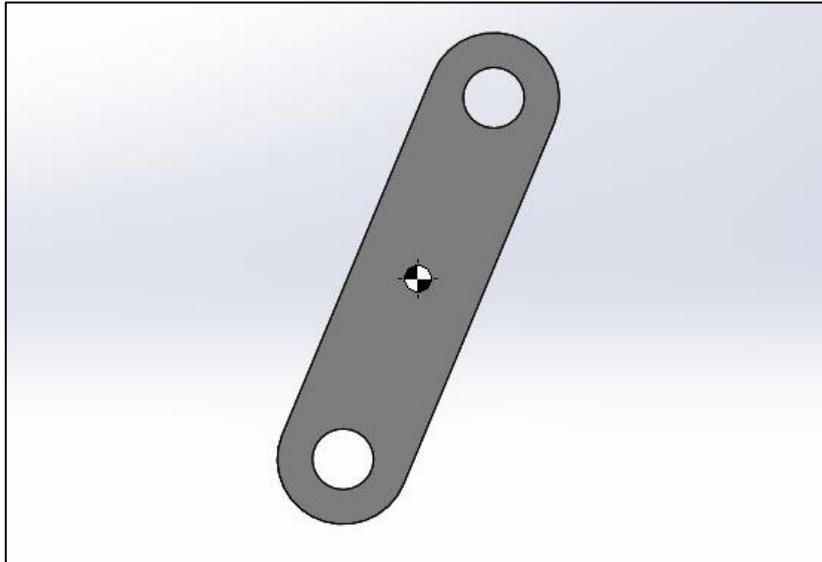
#### 4.1.4 Unión 1



**Figura 18.** Pieza 4 – Unión.

Fuente: Elaboración propia.

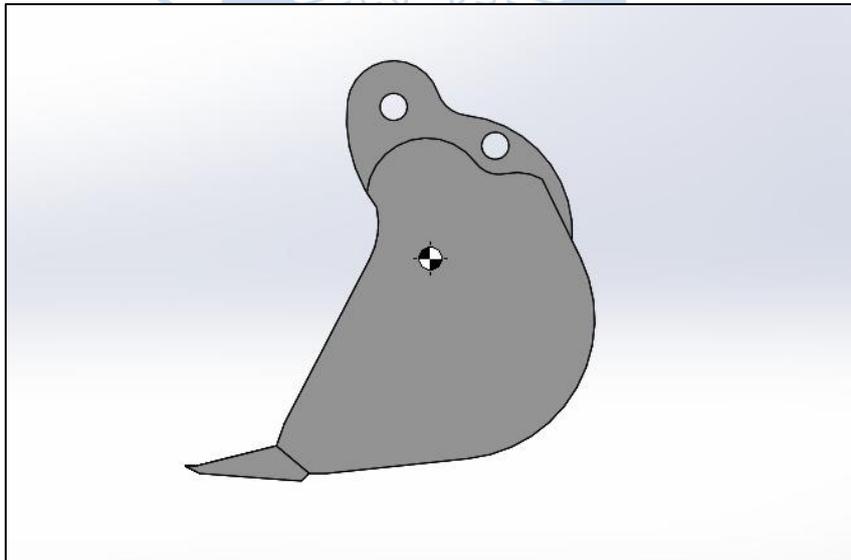
#### 4.1.5 Unión Recta



**Figura 19.** Pieza 5 – Unión Recta

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.6 Cuchara



**Figura 20.** Pieza 5 – Cuchara.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.7 Masas de los elementos de la excavadora

Las masas de cada elemento de la máquina excavadora fueron obtenidas del “Manual de Mantenimiento de la Excavadora Hidráulica Komatsu PC4000-6”, se consideró la masa individual de cada pieza y los elementos de unión; para la parte de la cabina se considera la masa total de la oruga, el motor, la bomba, los ductos, entre otros elementos, además se

considera como masa adicional el contrapeso. A continuación, se presenta una tabla resumen de las masas totales por elemento.

**Tabla 8.** Masas de la máquina excavadora.

| Elemento                      | Masa (kg) |
|-------------------------------|-----------|
| Pluma + pines                 | 30735     |
| Brazo + pines                 | 15811     |
| Cuchara + dientes + pines     | 26213     |
| Barra de unión con la cuchara | 1805      |
| Barra de dirección            | 1128      |
| Cabina + orugas               | 307240    |
| Contrapeso                    | 37000     |
| Cilindros hidráulicos         | 2330      |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Obtención del modelo en Working Model

El software 'Working Model' solo permite importar archivos con la extensión '**.DXF**', es por esta razón que, una vez obtenidos los modelos CAD, en el software SolidWorks se procede a guardar los archivos realizados en el mismo con la extensión '**.DXF**', siguiendo el siguiente procedimiento.

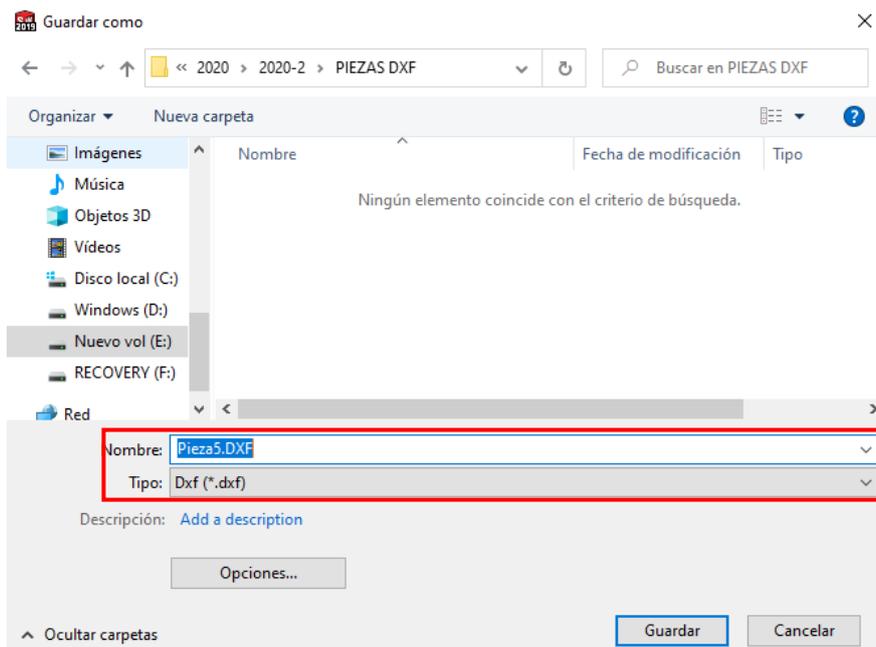
Dentro de la interfaz de SolidWorks, se ubica el icono 'Guardar', seleccione 'Guardar como'



**Figura 21.** Ubicación del icono 'Guardar'.

Fuente: Elaboración propia.

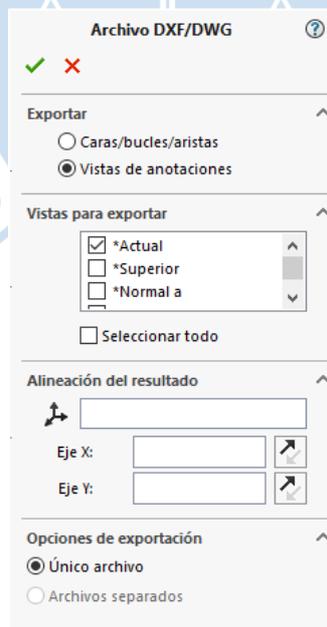
Una vez ubicado el icono, le aparecerá la ventana de Figura 22, en donde se debe escribir el nombre del archivo y seleccionar en tipo de extensión, la extensión '**.DXF**', una vez que se haya realizado estos pasos se procede a guardar el archivo en la carpeta que crea conveniente.



**Figura 22.** Ubicación del cambio de datos en la ventana ‘Guardar’.

Fuente: Elaboración propia.

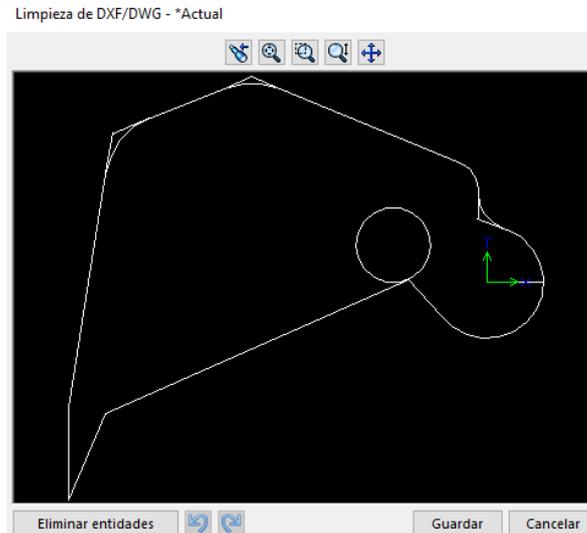
Luego de guardar el archivo, inmediatamente se muestran las siguientes opciones en la interfaz del SolidWorks, tal como lo muestra la Figura 23, donde se debe seleccionar los parámetros necesarios a exportar.



**Figura 23.** Configuración para el archivo DXF.

Fuente: Elaboración propia

Luego que se seleccionen los parámetros adecuados, seleccionar el botón aceptar, e inmediatamente se mostrará la Figura 24, que es necesaria para eliminar ciertas curvas que quizá son indeseables o que no se requieren en el perfil.

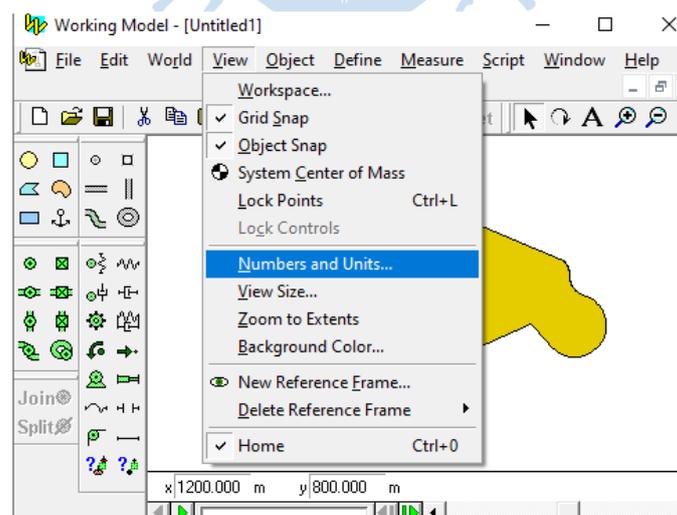


**Figura 24.** Interfaz para eliminar datos que no se desean exportar.

Fuente: Elaboración propia.

Ya realizados los pasos anteriores, en la interfaz gráfica del software Working Model, se procede a realizar los siguientes pasos para importar las piezas realizadas en SolidWorks.

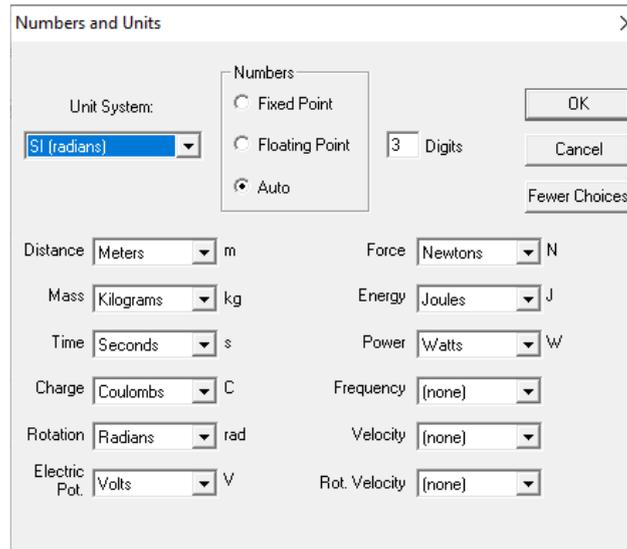
Antes de importar los archivos, se debe asegurar que las dimensiones en Working Model coincidan con las dimensiones de la pieza a importar, puesto que Working Model asumirá que es así, en caso de querer cambiar las unidades se debe buscar los comando que se muestran en la Figura 25.



**Figura 25.** Ubicación de la configuración números y unidades.

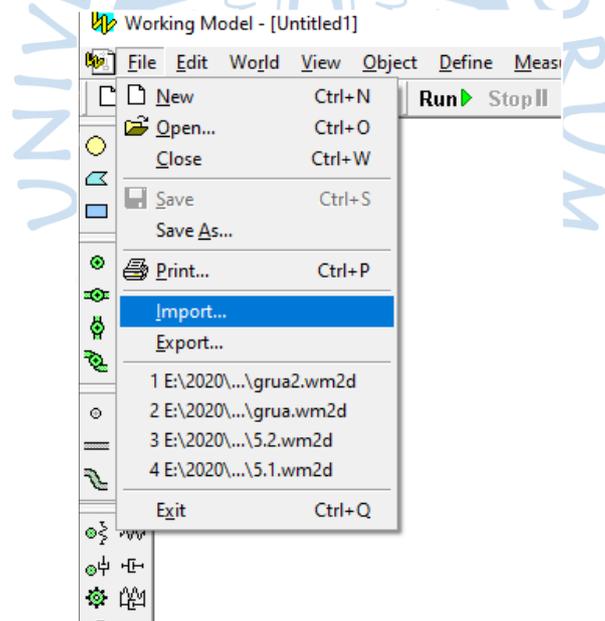
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se selecciona el comando de ‘Números y unidades’, aparecerá la ventana de la Figura 26, en donde se deben elegir los valores que se crean necesarios.



**Figura 26.** Ventana de configuración de números y unidades.

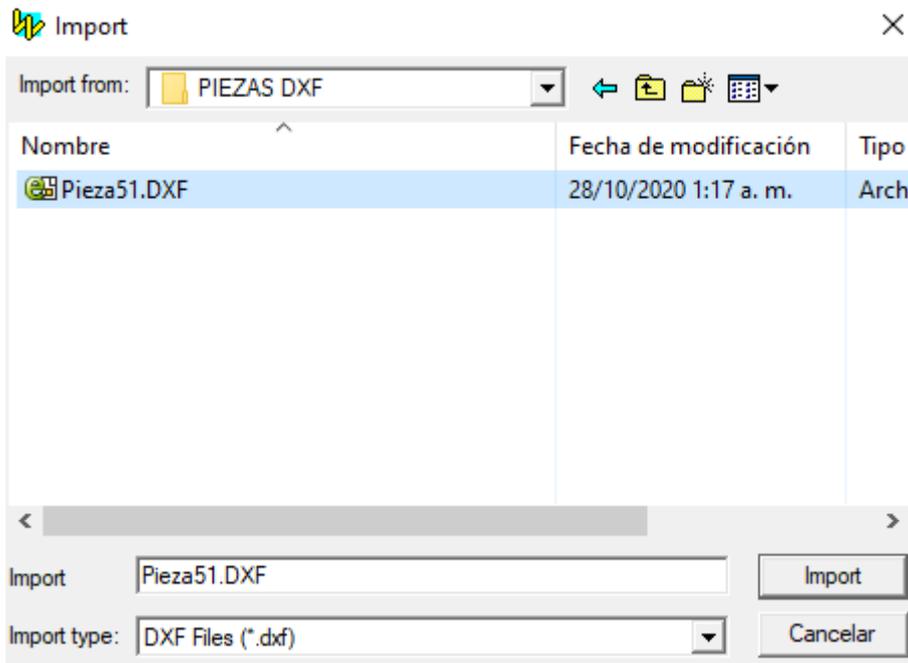
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 27.** Ubicación del icono ‘Importar’.

Fuente: Elaboración propia.

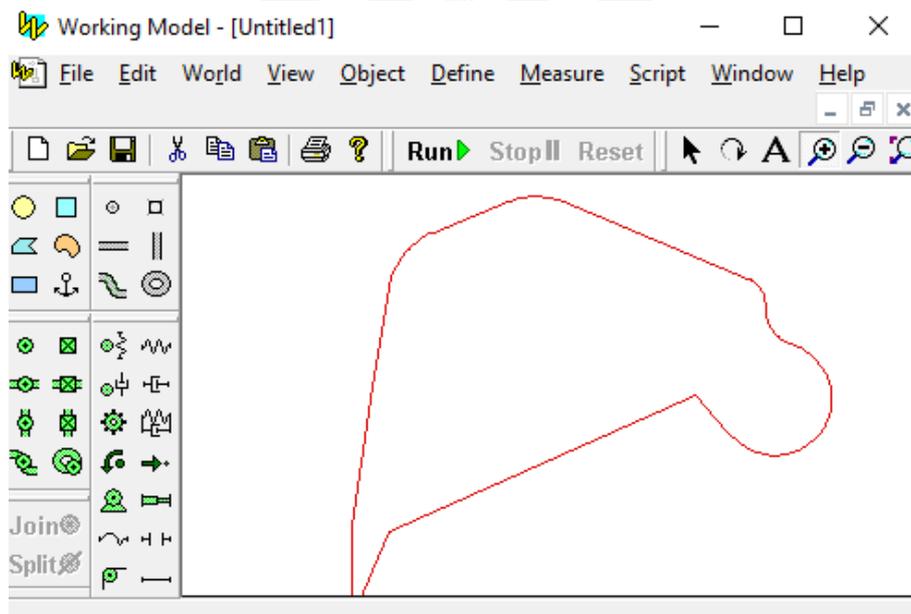
Tal como se muestra en la Figura 27, Seleccionar la opción importar, para importar a la interfaz de Working Model la pieza CAD, cuando se selecciona la opción importar aparece la ventana para seleccionar el archivo que se desea importar, tal como lo muestra la Figura 28.



**Figura 28.** Ventana para importar el archivo de interés.

Fuente: Elaboración propia.

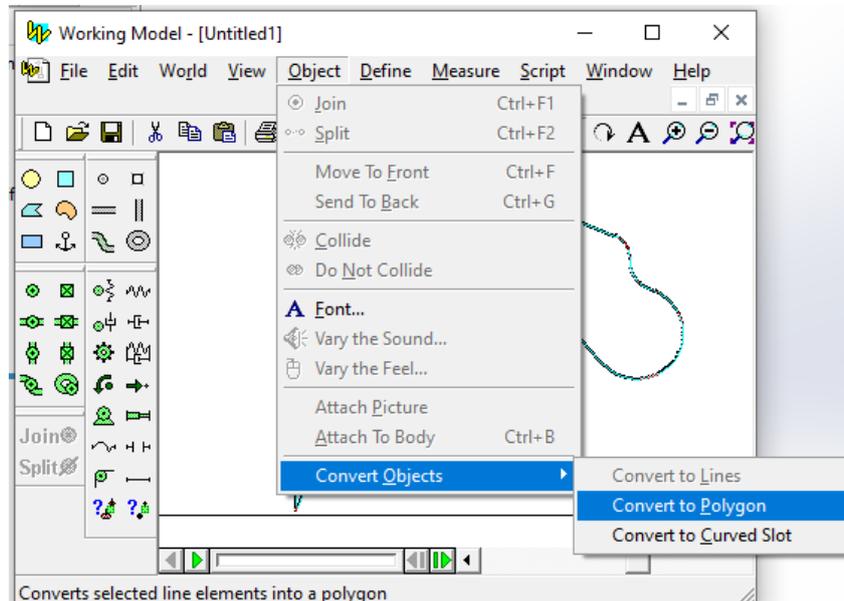
Luego, en la interfaz de Working Model, tal como lo muestra la Figura 29, aparece la pieza importada con líneas de color rojo, lo que indica que el sólido no está definido, pues está definido por líneas que fácilmente se pueden trasladar, causando que la pieza quede incompleta.



**Figura 29.** Pieza de color rojo importada a la interfaz de Working Model.

Fuente: Elaboración propia.

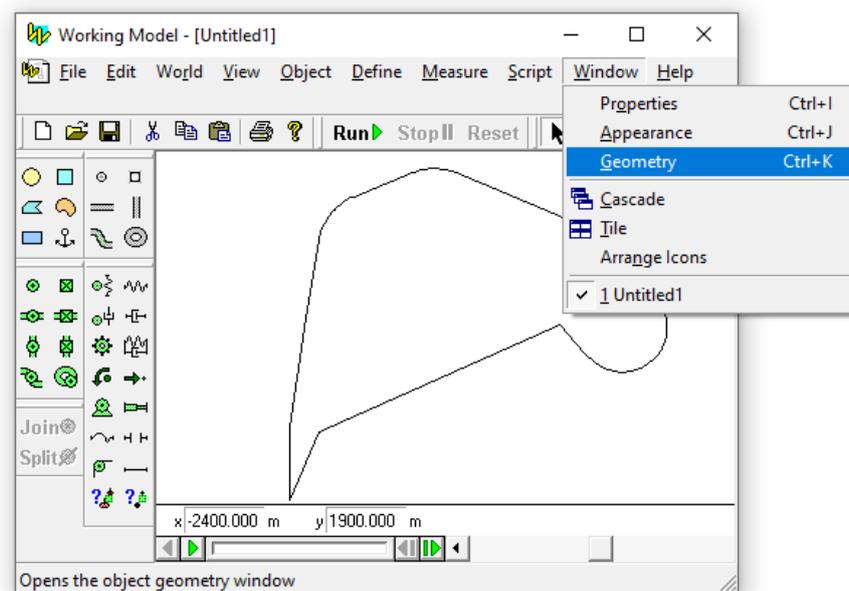
Por este motivo, se debe convertir toda la pieza a un polígono, con la finalidad de tener una sola pieza, pues esto es lo que se quiere. La Figura 30, muestra los pasos para convertir la pieza importada a un polígono.



**Figura 30.** Configuración para convertir a polígono.

Fuente: Elaboración propia.

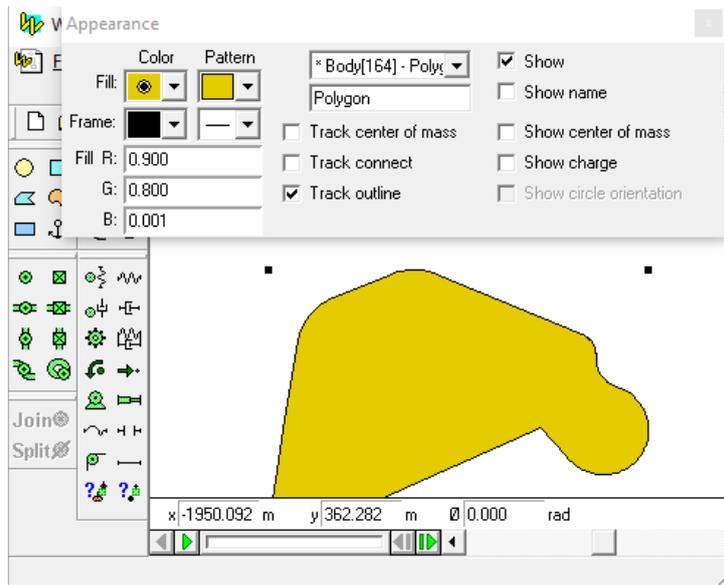
Siendo la pieza importada un polígono, se puede modificar la apariencia que se crea conveniente para la pieza, En la interfaz del Working Model, seleccionar el botón 'Window', luego elegir la opción apariencia, tal como lo muestra la Figura 31.



**Figura 31.** Ubicación del icono 'apariencia'.

Fuente: Elaboración propia.

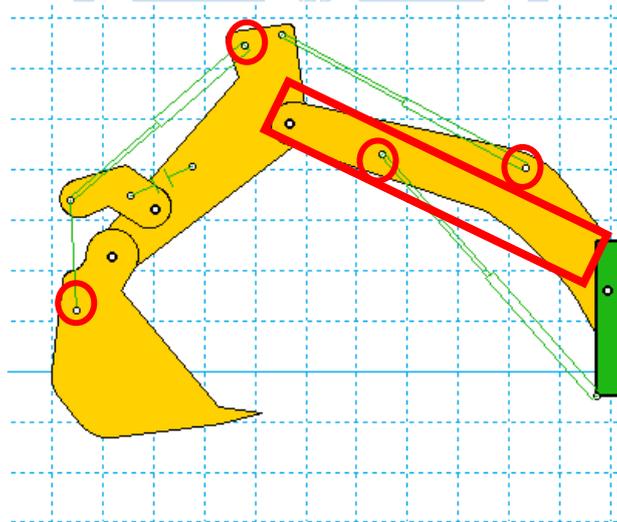
Se puede seleccionar los colores y el estilo que se crean convenientes utilizar.



**Figura 32.** Cuadro de dialogo apariencia.

Fuente: Elaboración propia.

Se sigue el mismo procedimiento para las otras piezas que conforman la pala de la excavadora hidráulica. Una vez importadas las piezas, se procede a unir las, para lo cual se utiliza una junta de pasador para rotación (Pin joint), además se fija la base con un punto fijo (Anchor), y para representar los cilindros hidráulicos se colocan pistones en las partes necesarias de la pala. La pieza unida queda de la siguiente manera.



**Figura 33.** Pala mecánica de una excavadora hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

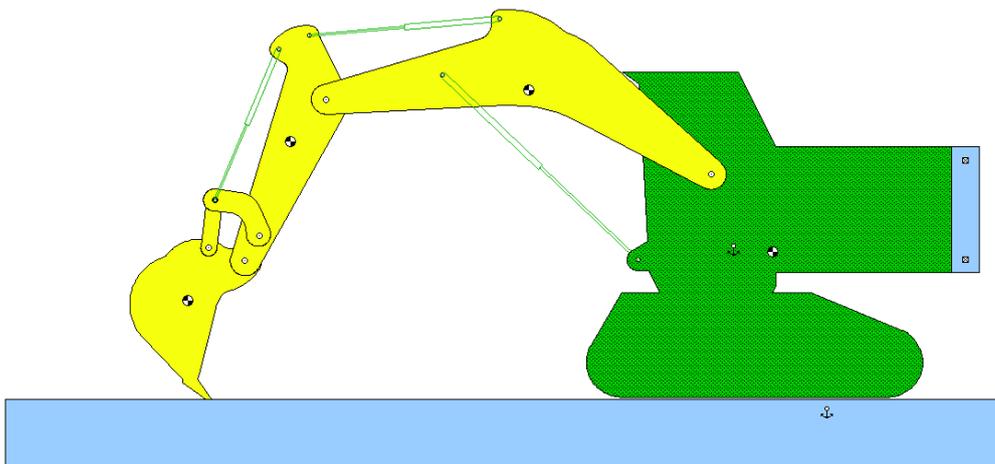
En la Figura 33, se muestra la Pala mecánica de la excavadora hidráulica completamente terminada, el rectángulo de color rojo señala el cilindro hidráulico, el cuadrado de color rojo indica el punto fijo que se utilizó para fijar la base, y las circunferencias de color rojo indican los puntos de unión que permiten que las partes del brazo puedan moverse.

### 4.3 Análisis cinemático y cinético: simulaciones en Working Model 2D

#### 4.3.1 Análisis estático

En el análisis estático que se desarrollará en la máquina excavadora se tomarán 4 momentos significativos de la maquina en el proceso de excavar el terreno y posterior, descargar el material.

**Primer Momento:** En instante, la cuchara de la máquina excavadora se pone en contacto con la superficie, dando como resultado una fuerza de contacto, este afectará también a los demás componentes y generará un momento.



**Figura 34.** Posición de la excavadora en contacto con el suelo.

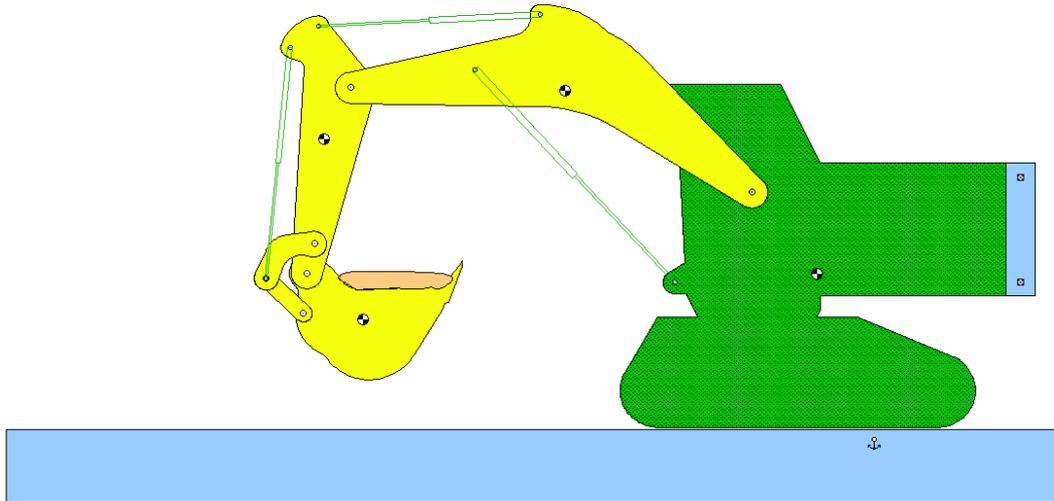
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 9.** Fuerzas en la posición "a".

| Pines | Fuerzas (kN) |
|-------|--------------|
| A     | 1963         |
| B     | 811.4        |
| C     | 133          |
| D     | 130.1        |
| E     | 376.7        |

Fuente: Elaboración propia.

**Segundo Momento:** En este segundo instante, la cuchara ya extrajo el material y se dispone a transportarlo. Se considerará en este cálculo, la fuerza del peso que adicionará el material extraído.



**Figura 35.** Posición del brazo cuando soporta la carga.

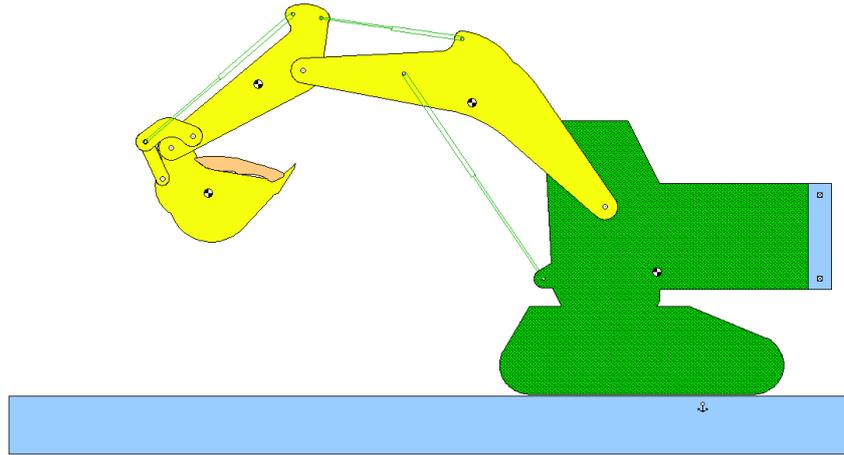
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 10.** Fuerza en la posición "b".

| Pines | Fuerzas (kN) |
|-------|--------------|
| A     | 2211         |
| B     | 699.5        |
| C     | 996.1        |
| D     | 1331         |
| E     | 923.7        |

Fuente: Elaboración propia.

**Tercer Momento:** Ahora, la pluma de la máquina excavadora llega a su punto más alto y es el instante antes de la descarga.



**Figura 36.** Posición del brazo a la altura máxima con carga.

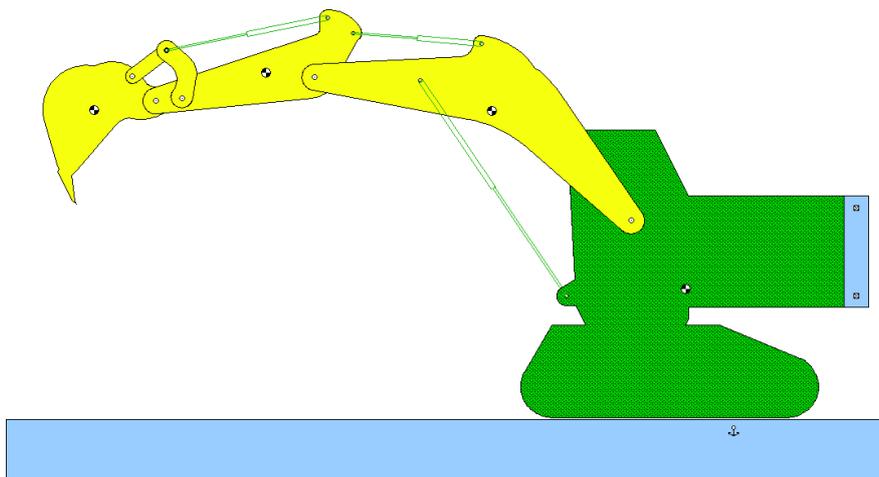
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 11.** Fuerza en la posición "c".

| Pines | Fuerzas (kN) |
|-------|--------------|
| A     | 2624         |
| B     | 1297         |
| C     | 1743         |
| D     | 1742         |
| E     | 1001         |

Fuente: Elaboración propia.

**Cuarto Momento:** Después de descargar, el brazo, pluma y cuchara, quedan en posición horizontal.



**Figura 37.** Posición del brazo en el instante de vaciado.

Fuente: Elaboración propia.

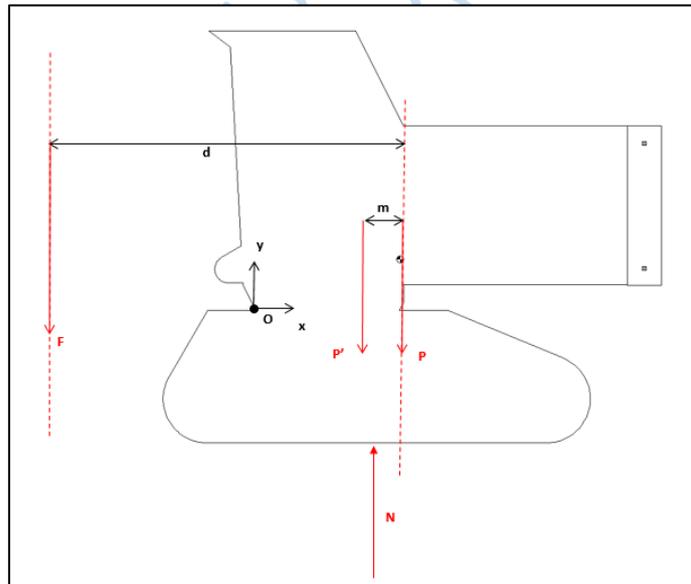
**Tabla 12.** Fuerza en la posición "d".

| Pines | Fuerzas (kN) |
|-------|--------------|
| A     | 1963         |
| B     | 1455         |
| C     | 212.6        |
| D     | 369.9        |
| E     | 464.7        |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.2 Análisis de volcadura

Se analizará en el Cuarto Momento, si existe volcadura:



**Figura 38.** Cabina, Fuerzas.

Fuente: Elaboración propia.

Datos:

Masa de la Cabina: 307240 kg

Fuerza  $F = 464.7$  kN

Distancia  $d = 13160$  mm

Distancia del punto O a la línea de acción de N = 2570.83 mm

Distancia del punto O al Centro de Masa = 3086.5 mm

Se tendrá:

$$P = m * g = 307240 * 9.81 \rightarrow P = 3014.024 \text{ kN}$$

$$N = m \cdot g + F = 3014.024 \text{ kN} + 464.7 \text{ kN} \rightarrow N = 3478.724 \text{ kN}$$

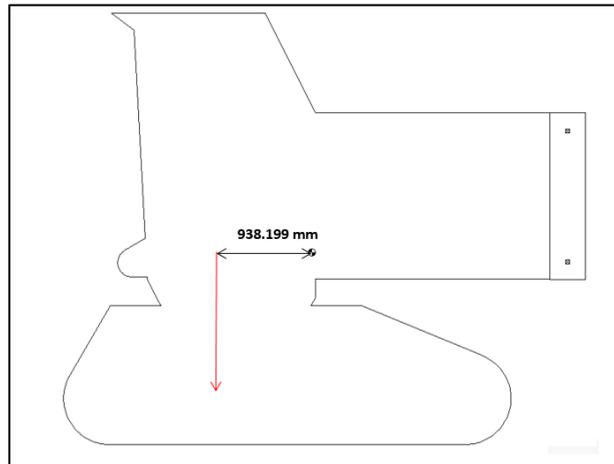
$$\sum M_o = -F \cdot d + N \cdot (2570.83 \text{ mm}) - P' \cdot m$$

$$0 = -(464.7 \text{ kN}) \cdot (13160 \text{ mm}) + (3478.724 \text{ kN}) \cdot (2570.83 \text{ mm}) - (3014.024 \text{ kN}) \cdot m$$

$$(3014.024 \text{ kN}) \cdot (m) = 2827.756 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

$$m = 938.199 \text{ mm}$$

Con la línea de acción desplazada, se tendrá:



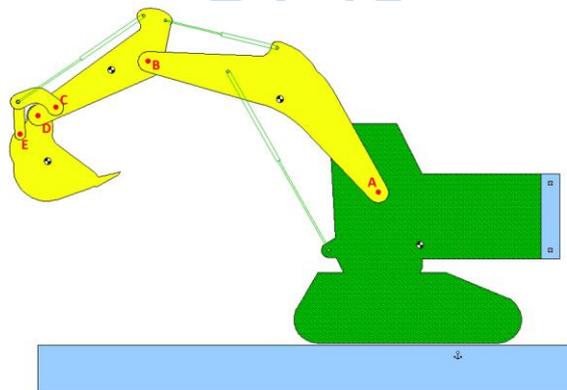
**Figura 39.** Cabina, Fuerza Resultante.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, al estar aún la fuerza ejercida por el peso, en el margen de la base; la máquina excavadora no se volcará por acción del trabajo desarrollado.

### 4.3.3 Análisis cinético

Para el estudio de la máquina excavadora, se analizará la maquina en diversos puntos significativos.



**Figura 40.** Lista de pines a analizar de la excavadora.

Fuente: Elaboración propia.

Punto A: En la unión de Pluma con Cabina.

Punto B: En la unión de Pluma con Brazo.

Punto C: En la unión de Brazo con Unión.

Punto D: En la unión de Brazo con Cuchara.

Punto E: En la unión de Cuchara con Unión Recta.

#### 4.4 Cálculo de la velocidad de los cilindros hidráulicos.

Existen 2 parámetros útiles para trabajar con los cilindros hidráulicos, el primero es con la fuerza de empuje producida por la presión de la bomba y la segunda es con la velocidad ocasionada por el caudal. La bomba de la excavadora junto con los inyectores son los principales componentes que permiten el ingreso del aceite a los cilindros hidráulicos.

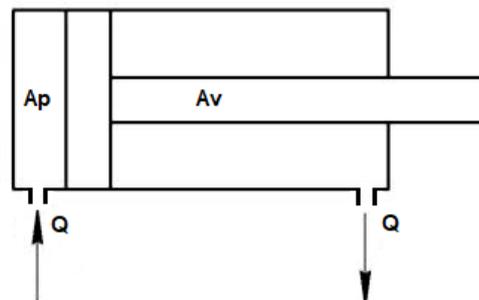
En el presente trabajo, para una facilidad de cálculo y manejo de la excavadora en el software Working Model, se opta por trabajar con la velocidad constante de los cilindros. Esta consideración se justifica en que para trabajar con las fuerzas se tiene una dependencia directa la presión ejercida en un instante, las pérdidas generadas por la bomba y la temperatura, sin embargo, tomando como parámetro de trabajo la velocidad, únicamente se considera el caudal máximo o mínimo permitido que ingresa al cilindro.

Tomando como esquema de un cilindro hidráulico la Figura 41, se tienen las siguientes fórmulas que permitirán encontrar la velocidad de avance y retroceso del cilindro.

$$V_{avance} = \frac{Q}{A_p} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$V_{retroceso} = \frac{Q}{A_d} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$A_d = A_p - A_v$$



**Figura 41.** Esquema del cilindro hidráulico de doble efecto.

Fuente: Elaboración propia.

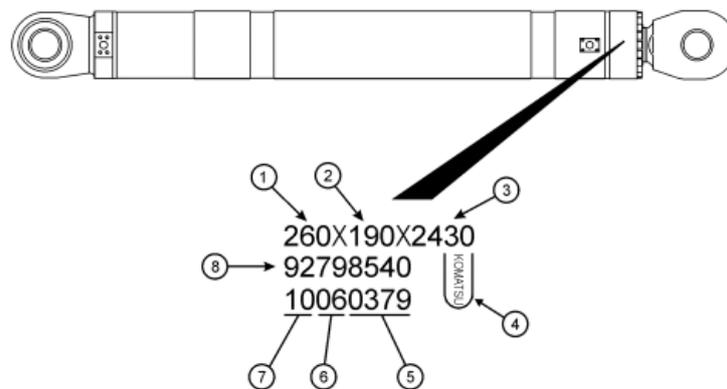
Donde:

$Q$  = Flujo del aceite en los cilindros [ $l/min$ ].

$A_p$  = Área del pistón [ $mm^2$ ].

$A_v$  = Área del vástago [ $mm^2$ ].

Las dimensiones del cilindro hidráulico y el flujo de aceite son obtenidas del manual de operación de la Komatsu PC4000-6.



**Figura 42.** Cilindro hidráulico de la Komatsu PC4000-6.

Fuente: Manual de operación y mantenimiento de la excavadora hidráulica Komatsu PC4000-6.

Donde:

- (1) Diámetro del pistón [ $mm$ ].
- (2) Diámetro del vástago [ $mm$ ].
- (3) Carrera del pistón [ $mm$ ].

El flujo mínimo ( $Q_{min}$ ) se da a una presión de 0 bar y flujo máximo ( $Q_{max}$ ) se dá a una presión de 45 bar. Para las simulaciones realizadas en el Working Model, se trabajará con la velocidad cuando se tiene el flujo mínimo de aceite en el cilindro hidráulico, es decir para  $Q_{min} = 190 l/min$

Conociendo los diámetros y el flujo de aceite, se calculan las velocidades de avance y retroceso del cilindro.

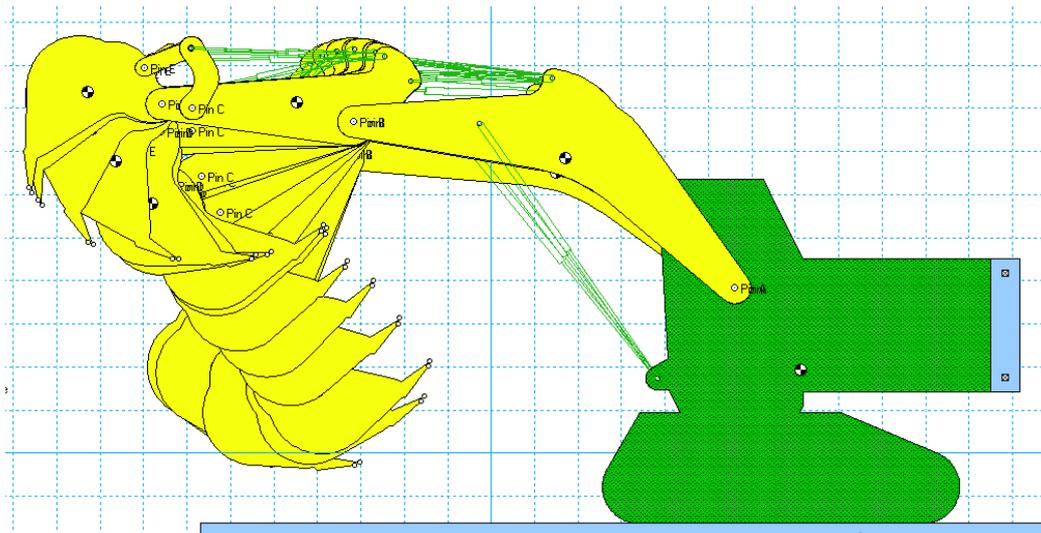
$$V_{avance} = 0.0597 \text{ m/s} = 59.7 \text{ mm/s}$$

$$V_{retroceso} = 0.128 \text{ m/s} = 128 \text{ mm/s}$$

#### 4.5 Gráficas de los puntos críticos del movimiento de la excavadora

A partir de las posiciones seleccionadas para el análisis, se realizó la simulación en Working Model del proceso con la finalidad de conocer la dinámica de las fuerzas en los pines y en los pistones. Para un mejor análisis y comparativa de los resultados obtenidos, se realizaron dos simulaciones del movimiento: la primera considera a la excavadora sin carga en la cuchara; y la segunda, considera la carga máxima determinada a partir de la capacidad de la cuchara y la densidad del material a extraer.

Cabe recalcar que los valores de fuerza están expresados en Newtons.



**Figura 43.** Secuencia de movimiento de la excavadora

Fuente: Elaboración propia.

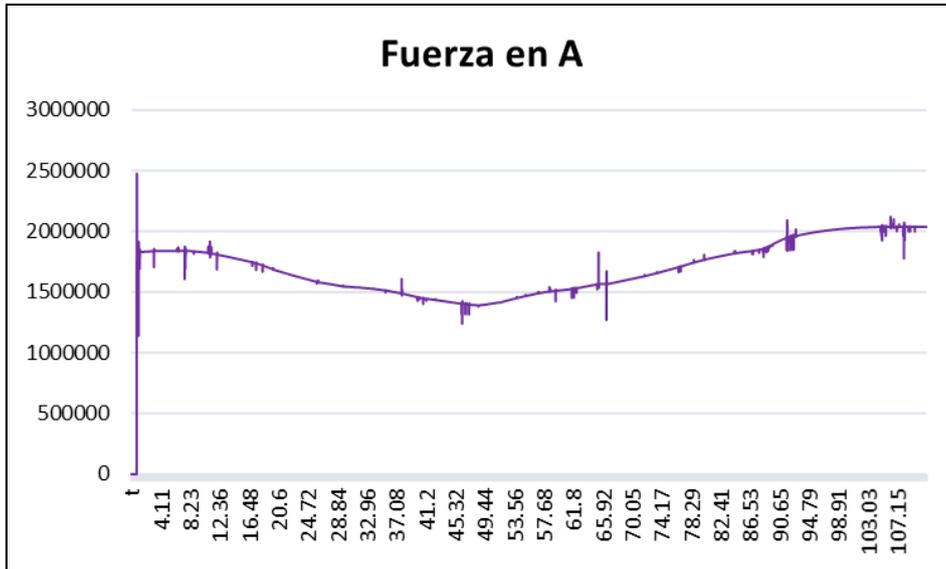
En la Figura 43 se muestra la secuencia del movimiento contempla las posiciones críticas a las cuales está sometida una excavadora en operaciones. Se han considerado 4 posiciones para conocer las fuerzas y tener noción de los esfuerzos que se generan por la carga en la cuchara y el peso de los elementos de la máquina.

## 4.6 Análisis de resultados

### 4.6.1 Análisis de la excavadora sin carga

En los Pines A y B, las reacciones generadas son menores respecto a los pines que conectan a la cuchara con el brazo. Además, a lo largo del movimiento no fluctúan, tal como se muestra en las figuras siguientes.

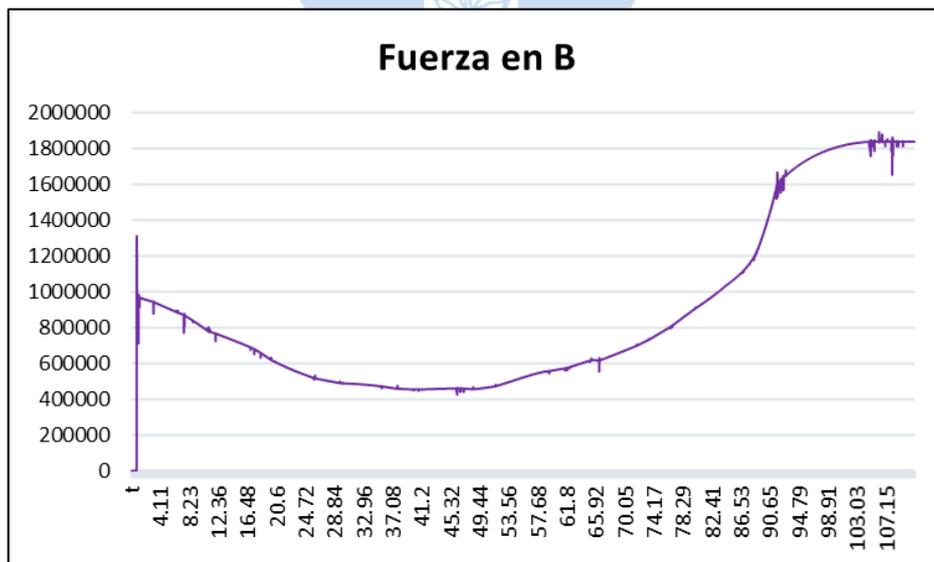
#### ■ Pin A



**Figura 44.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin A.

Fuente: Elaboración propia.

#### ■ Pin B

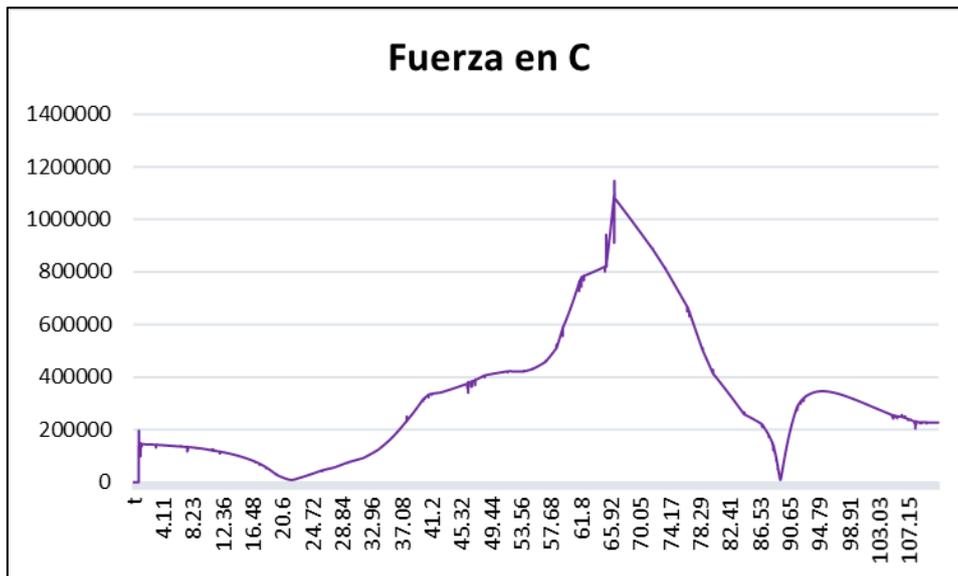


**Figura 45.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin B.

Fuente: Elaboración propia.

- **Pin C**

El Pin C conecta al eslabón con el brazo. Las reacciones se incrementan en la **posición 3** del análisis.



**Figura 46.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin C.

Fuente: Elaboración propia.

- **Pin D**

El Pin D permite articular el brazo con la cuchara. Al igual que el Pin C, las reacciones máximas se producen en el instante en el que la cuchara se encuentra en la **posición 3**.

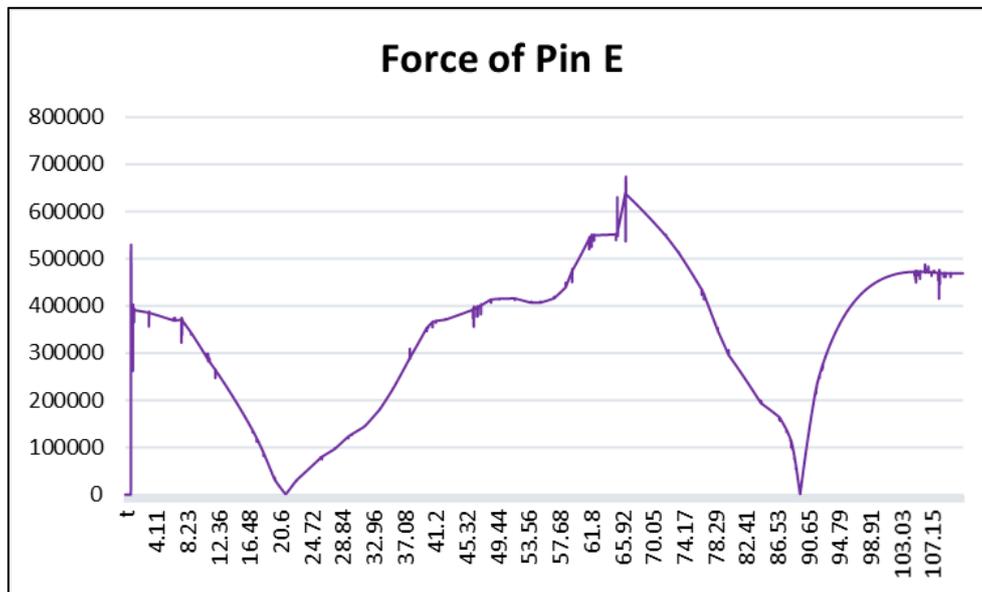


**Figura 47.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin D.

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparación con los demás pines para la **posición 3**, el pin D presenta las mayores reacciones, llegando incluso hasta los 800 kN

▪ **Pin E**



**Figura 48.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin E.

Fuente: Elaboración propia.

El Pin E permite conectar por medio de un eslabón, el pistón con la cuchara, por tanto, es el pin que sufrirá mayores variaciones en las reacciones, tal como se muestra en la **Figura 48**.

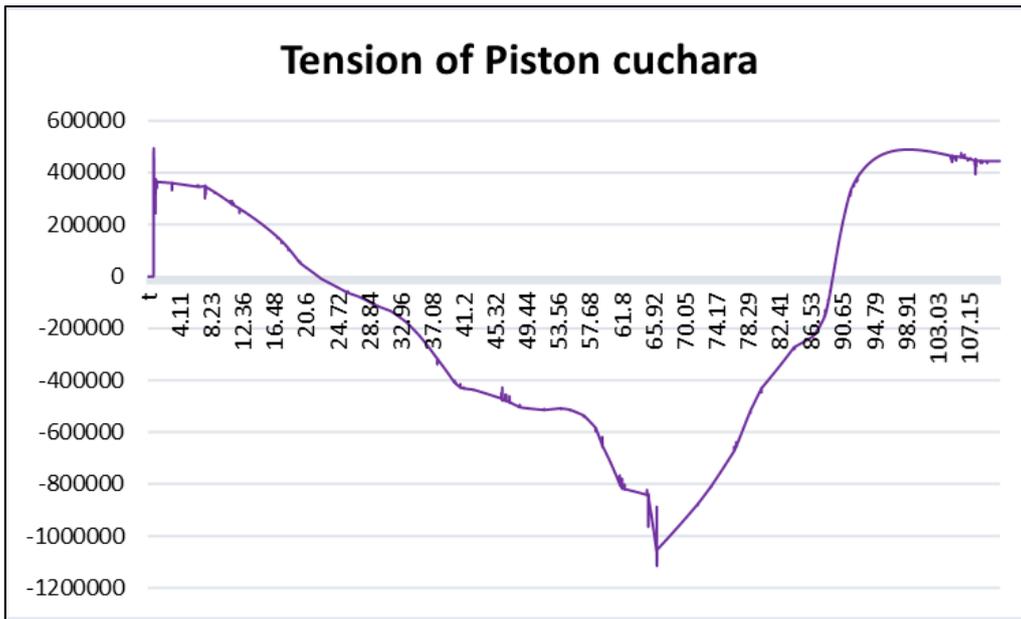
▪ **Tensión en el pistón del brazo**



**Figura 49.** Comportamiento de la tensión en el pistón del brazo.

Fuente: Elaboración propia.

- Tensión en el pistón de la cuchara

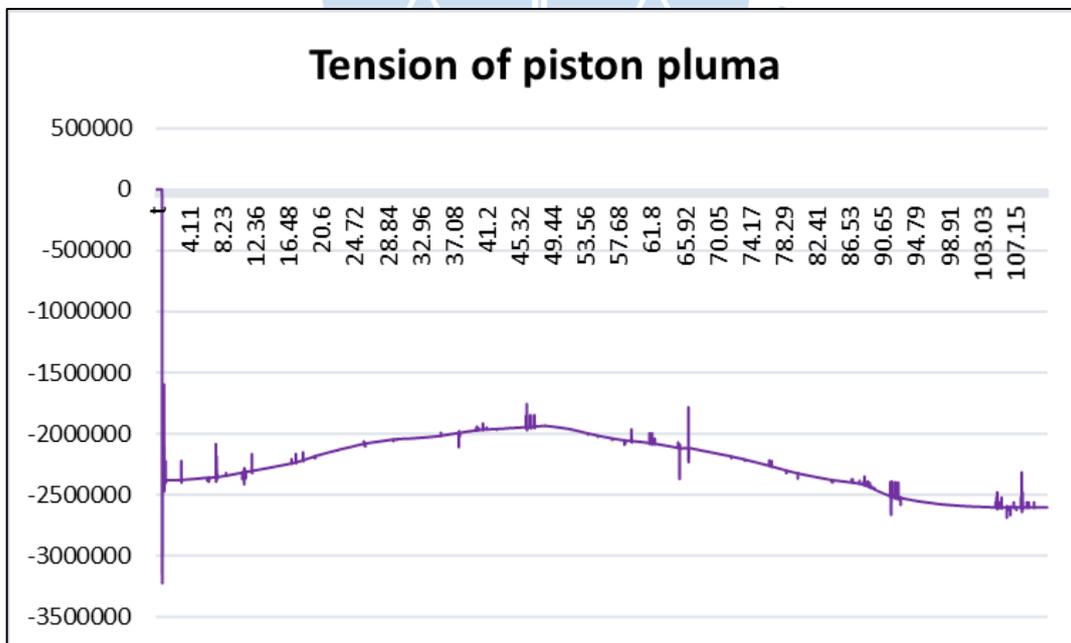


**Figura 50.** Comportamiento de la tensión en la cuchara

Fuente: Elaboración propia.

El pistón que controla el movimiento durante el ciclo de movimiento se encuentra sometido a fuerzas fluctuantes de tensión y compresión.

- Tensión en el pistón de la pluma



**Figura 51.** Comportamiento de la tensión en la pluma.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 13.** Resumen de las fuerzas en los cilindros de los pistones

|                             | Posición 1                   | Posición 2                   | Posición 3                                 | Posición 4                                 |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Pistón de la pluma</b>   | -2 300 000 N<br>(Compresión) | -1 800 000 N<br>(Compresión) | -2 300 000 N<br>(Compresión)               | <b>-2 500 000 N</b><br><b>(Compresión)</b> |
| <b>Pistón del brazo</b>     | 500 000 N<br>(Tracción)      | 100 000 N<br>(Tracción)      | 600 000 N<br>(Tracción)                    | <b>1 500 000 N</b><br><b>(Tracción)</b>    |
| <b>Pistón de la cuchara</b> | 100 000 N<br>(Tracción)      | -500 000 N<br>(Compresión)   | <b>-1 000 000 N</b><br><b>(Compresión)</b> | 100 000 N<br>(Tracción)                    |

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.6.2 Análisis de la excavadora con carga

En este análisis se ha considerado la capacidad máxima de carga en la cuchara 26.4 tn.

##### ▪ Pin A

**Figura 52.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin A.

Fuente: Elaboración propia.

Las reacciones en el Pin A, en comparación al análisis anterior, se incrementan, pero el comportamiento durante el ciclo de movimiento se mantiene. El máximo pico que se registra es en la **posición 3**, llegando incluso hasta los 2 500 000 N. El mismo comportamiento se muestra en el Pin B.

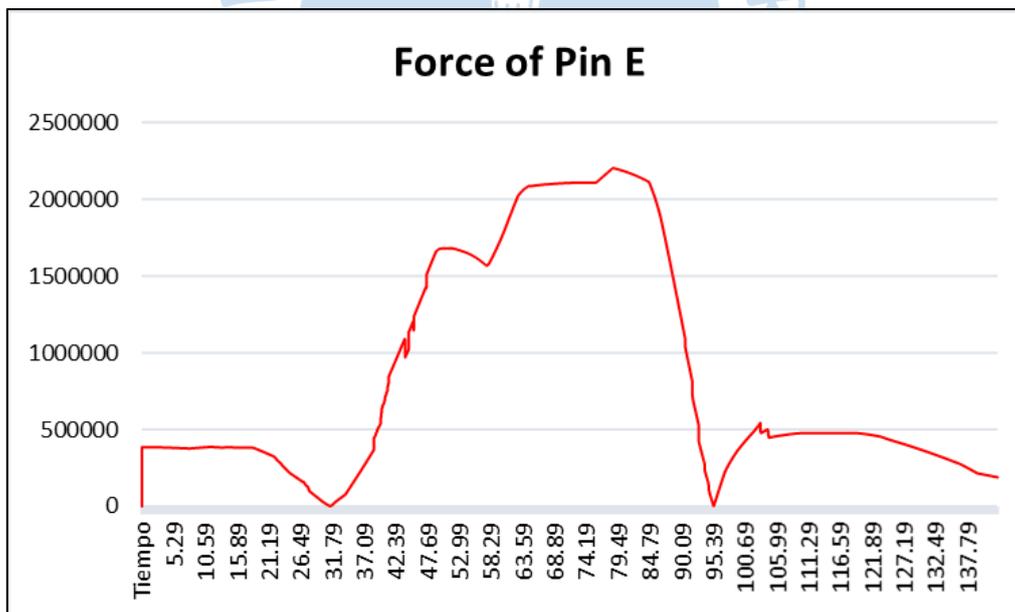
▪ **Pin B**



**Figura 53.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin B.

Fuente: Elaboración propia.

▪ **Pin C**

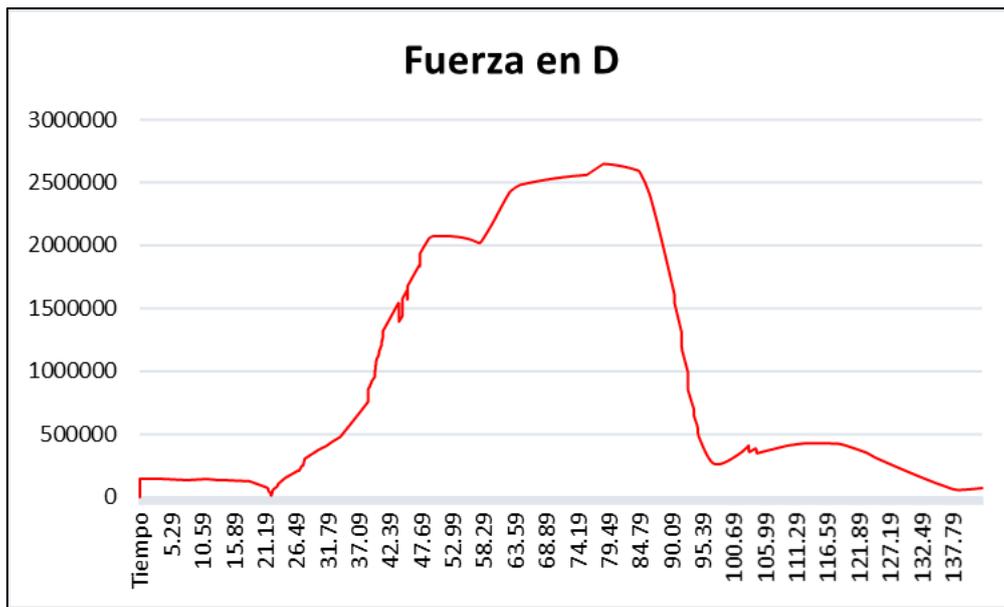


**Figura 54.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin C.

Fuente: Elaboración propia.

En el Pin C se presentan las mayores reacciones en el proceso de 2 a 3, ya que es el momento en el cual la carga de la cuchara tiene mayor influencia. Las reacciones máximas alcanzan el valor de 4300000 N, la mayor reacción en comparación de los demás pines.

▪ **Pin D**

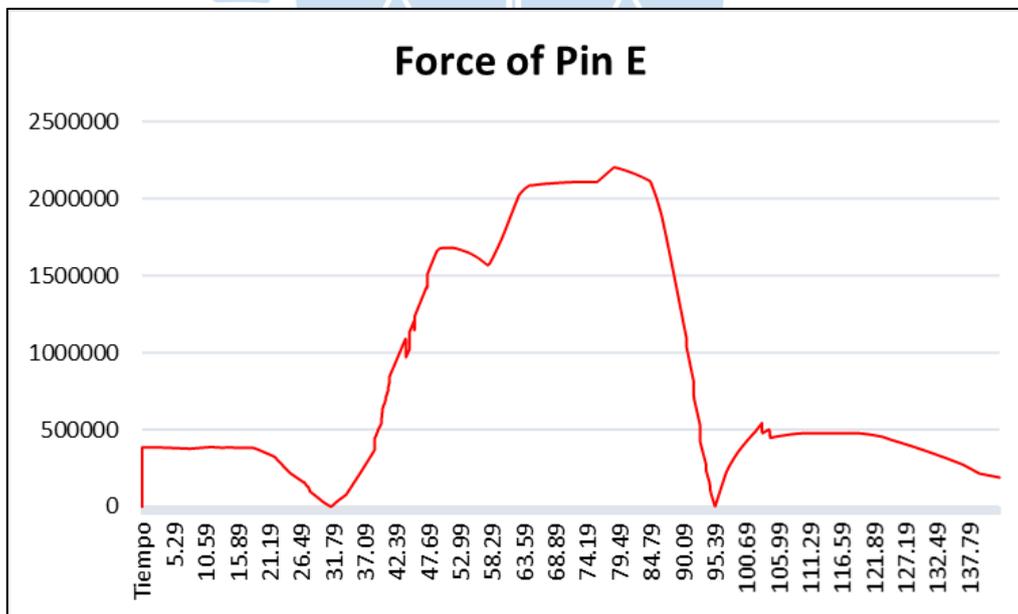


**Figura 55.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin D.

Fuente: Elaboración propia.

Las reacciones en el Pin D se incrementan desde el momento en que la cuchara recoge el material, llegando a ser máxima en la **posición 3** del ciclo de movimiento.

▪ **Pin E**



**Figura 56.** Comportamiento de la resultante de la Fuerza en el Pin E.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestran las reacciones generadas en cada uno de los cilindros hidráulicos.

- **Tensión en el pistón del brazo**

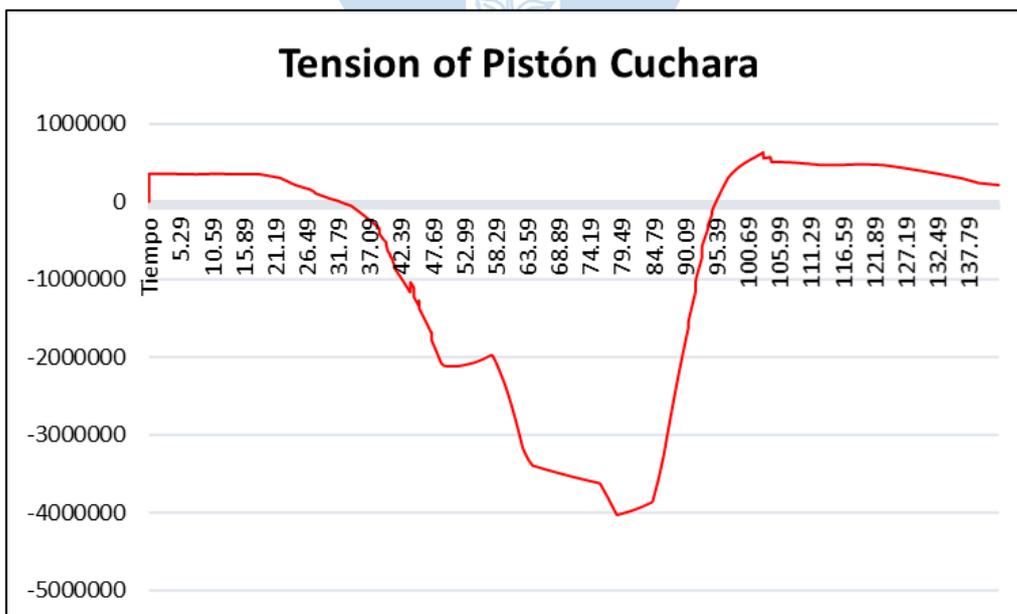


**Figura 57.** Comportamiento de la tensión del pistón en el brazo.

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis anterior de sin carga, la reacción máxima registrada en el pistón de la cuchara fue de 1 000 000 N en compresión, la cual se registró en la **posición 3**. Ahora, considerando la carga en la cuchara, esta reacción se ha incrementado hasta los 4 000 000 N en compresión.

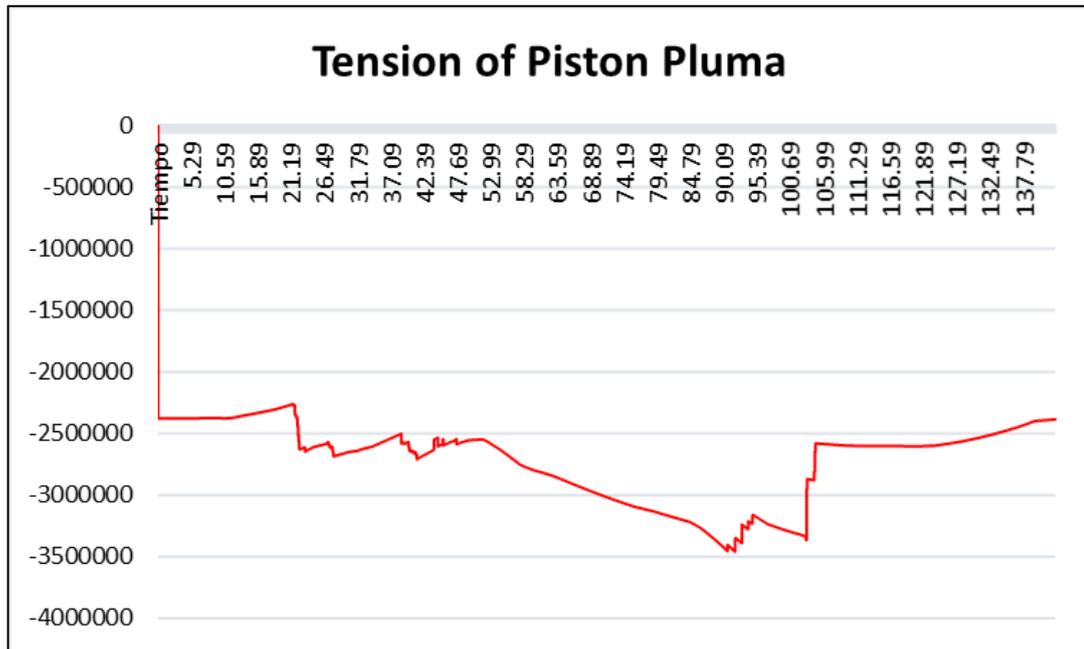
- **Tensión en el pistón de la cuchara**



**Figura 58.** Comportamiento de la tensión del pistón de la cuchara.

Fuente: Elaboración propia.

▪ Tensión en el pistón de la pluma



**Figura 59.** Comportamiento de la tensión del pistón en la pluma.

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 14.** Resumen de las fuerzas en los cilindros de los pistones con carga.

|                               | Posición 1                   | Posición 2                                 | Posición 3                                 | Posición 4                   |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Cilindro de la pluma</b>   | -2 500 000 N<br>(Compresión) | <b>-2 600 000 N</b><br><b>(Compresión)</b> | -3 400 000 N<br>(Compresión)               | -2 500 000 N<br>(Compresión) |
| <b>Cilindro del brazo</b>     | 500 000 N<br>(Tracción)      | -500 000 N<br>(Compresión)                 | <b>2 500 000 N</b><br><b>(Tracción)</b>    | 2 000 000 N<br>(Tracción)    |
| <b>Cilindro de la cuchara</b> | -300 000 N<br>(Compresión)   | -2 000 000 N<br>(Compresión)               | <b>-4 000 000 N</b><br><b>(Compresión)</b> | -100 000 N<br>(Compresión)   |

Fuente: Elaboración propia.

## Conclusiones

El modelado, a escala real, de la máquina excavadora en el software Working Model permitió observar completamente como es el movimiento de la pala mecánica en un trabajo de extracción y vaciado del material, definir los movimientos, además de permitir realizar los cálculos dinámicos, da una idea al operario de cómo se realizarían el manejo de los cilindros hidráulicos para para cada posición del brazo de la excavadora.

Se corroboró que el uso de software Working Model, permite hallar las velocidades, aceleraciones y fuerzas, de manera intuitiva, ya que no requiere el planteamiento directo de las ecuaciones que rigen el movimiento, sino que, mediante la definición de la posición, condiciones iniciales y demás características de los elementos (peso, fricción, material, etc.), se puede realizar un análisis robusto en un menor tiempo de trabajo.

Tener conocimiento de las fuerzas que se originan debido al movimiento y el propio peso de operación, en las uniones de cada punto, lo cuales representan los pines, representan un avance muy importante en la evaluación de la máquina para dar el siguiente paso, el cual es el análisis de esfuerzos, que resultará de mucha importancia para la definición de los espesores, áreas y materiales con las cuales deberá constituirse cada elemento de la pala mecánica.

Durante el desarrollo del trabajo de investigación, se reconoció la importancia de realizar una evaluación del movimiento de las máquinas excavadoras, así como de su funcionamiento en el sector minero, para ello se tuvo que recurrir al manual de operación y mantenimiento.

Finalmente, el trabajo de investigación se concluyó satisfactoriamente, logrando cumplir los objetivos generales y específicos propuestos y cumpliendo con el cronograma de entregas de avances establecidas entre el asesor y los asesorados.

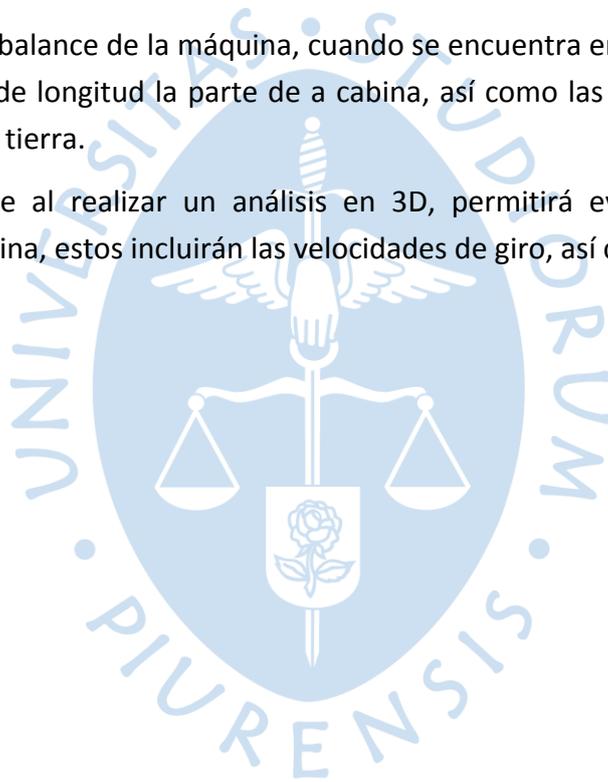


### **Recomendaciones**

Se recomienda que para el modelado 2D, en el software utilizado, se tenga en consideración más propiedades de cada elemento, así como una correcta distribución de las masas.

En caso de desbalance de la máquina, cuando se encuentra en una posición crítica, es recomendable variar de longitud la parte de a cabina, así como las orugas que permiten el desplazamiento sobre tierra.

Se plantea que al realizar un análisis en 3D, permitirá evaluar los movimientos completos de la máquina, estos incluirán las velocidades de giro, así como de traslación.





### Referencias bibliográficas

- Castillo Ramírez, A. (2005). Cinética de las máquinas. Obtenido de <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Cin>
- Erdman, A. G., Sandor, G. N., Cera, J. de la, & Escalona, R. (1998). Diseño de mecanismos: Análisis y síntesis. Pearson Educación.
- EXCAVADORA HIDRÁULICA ▷ ¿Qué es y como funciona? Modelos. (2019, mayo 8). Crane and Machinery. <https://www.gruasyaparejos.com/maquinaria/excavadora-hidraulica/>
- Hurel, J., Vizueta, S. E., & Michelle Trujillo Torres. (2018). Análisis cinemático de un brazo robótico de cinco grados de libertad e implementación de un control en Matlab. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23743.61604>
- Ipiña, U. L. (2016). Proyecto de diseño y cálculo de excavadora de pala frontal. Bilbao: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Bilbao.
- KOMATSU Muning Germany GMBH Buscherhofstrasse (s.f.) Catálogo PC 4000-6 KOMATSU.
- Kusmierczyk, J., & Szlagowski, J. (2008, junio 26). Automated Excavation Process Analysis for Given Trajectory and Soil Parameters. 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Vilnius, Lithuania. <https://doi.org/10.22260/ISARC2008/0016>
- Norton, R. L. (2009). Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos. McGraw-Hill.
- Norton, R. (2000). Diseño de maquinaria. México: The McGraw-Hill Companies.
- MiningPress (s.f.), Las 10 excavadoras más grandes del mundo. <http://miningpress.com/club/284063/las-excavadoras-mas-grandes-del-mundo>
- OSALAN (s.f.). Procedimientos seguros con maquinaria, Escuela de operación y mantenimiento de maquinaria de obra pública, minería, elevación y transporte.
- Pacheco S., M. V., & Vizuete T., J. O. (2006). Diseño y construcción de un simulador de los movimientos de una retroexcavadora controlado por un sistema de mando automatizado. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/4193>

Pámanes, A., Rojas, P., & Moreno, H. (2013). Análisis del desempeño cinemático de un cargador frontal bajo un enfoque global. MEMORIAS DEL XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, 9.

Shigley, J. E., & Uicker, J. J. (1980). Theory of machines and mechanisms. McGraw-Hill.

Yoshida, T., Koizumi, T., Tsujiuchi, N., Jiang, Z., & Nakamoto, Y. (2013). Dynamic Analysis of an Excavator During Digging Operation. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 6(2), 419–428. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2410>

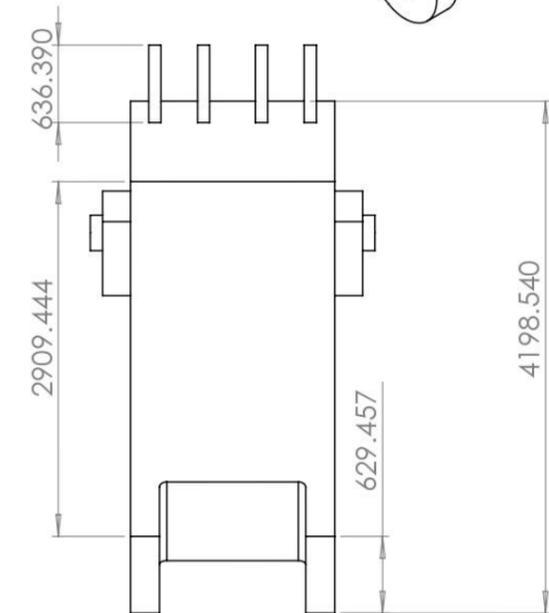
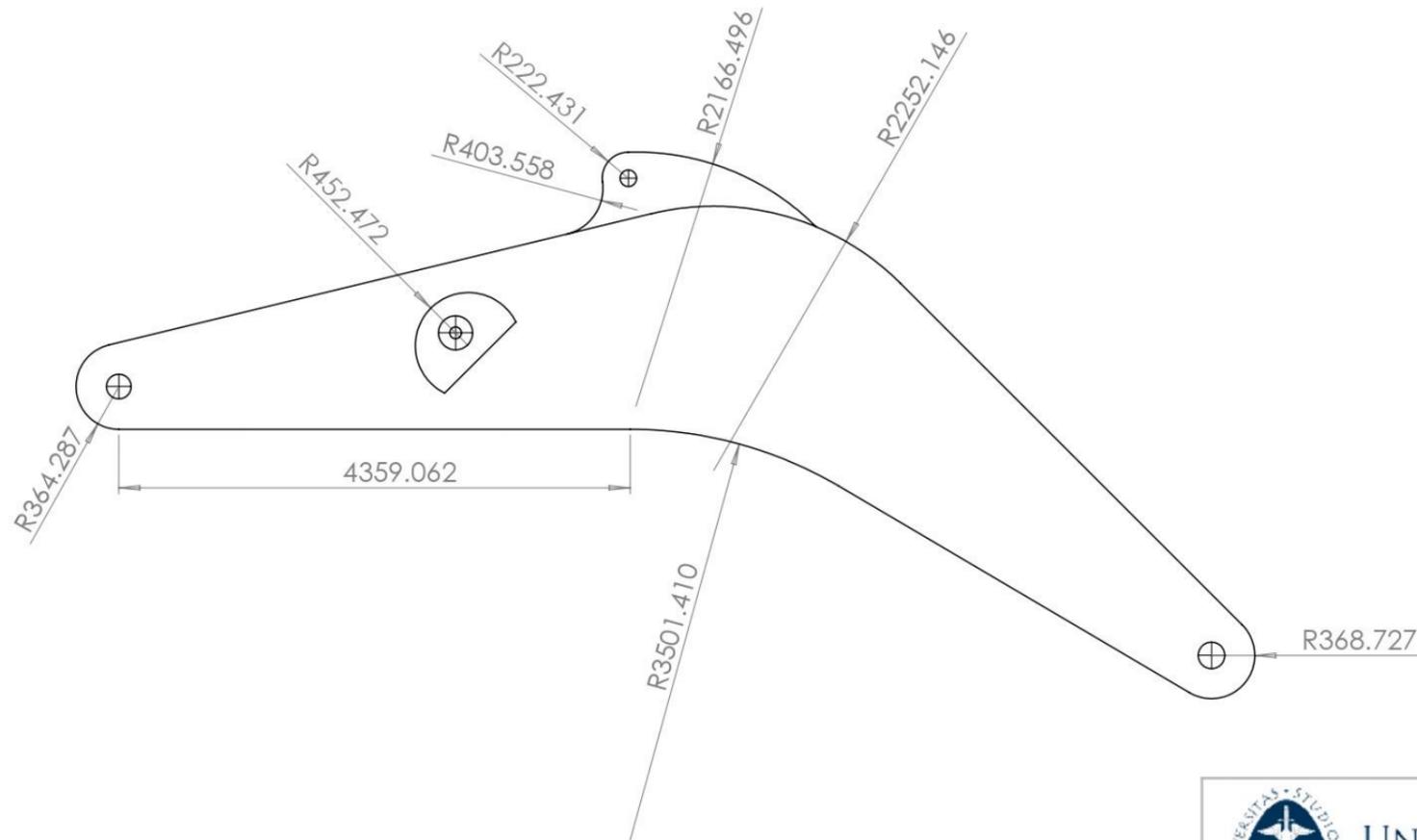
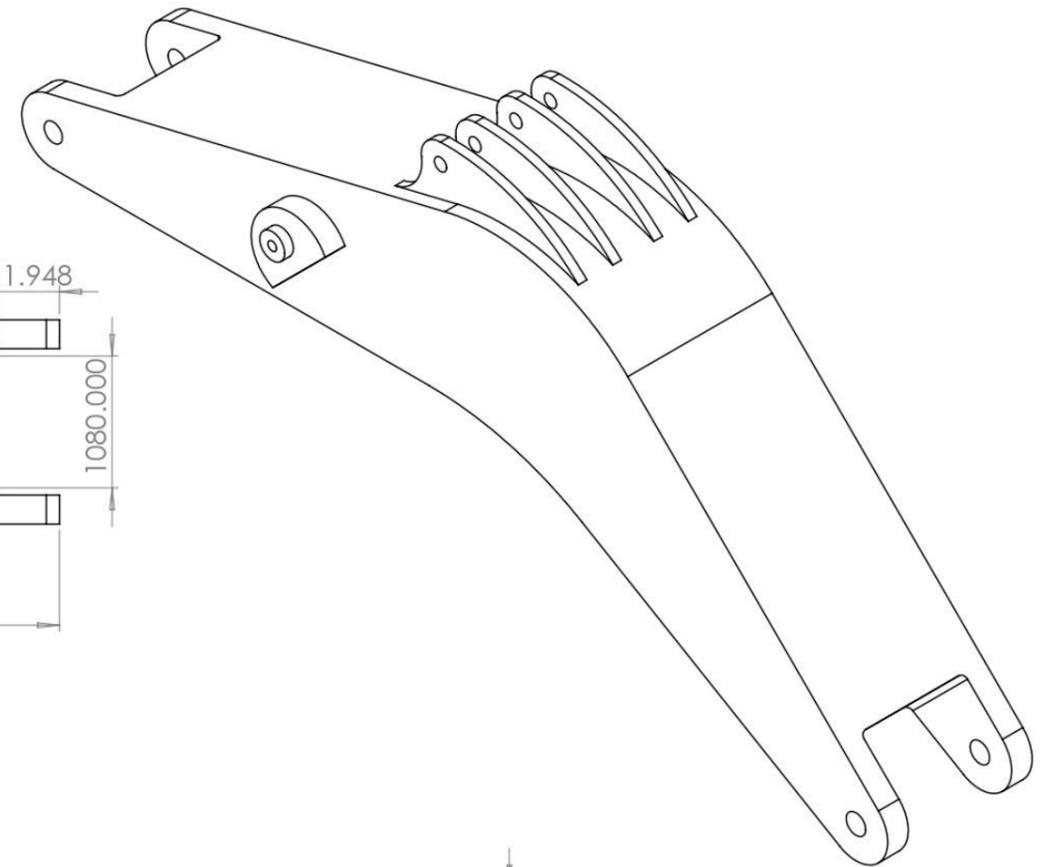
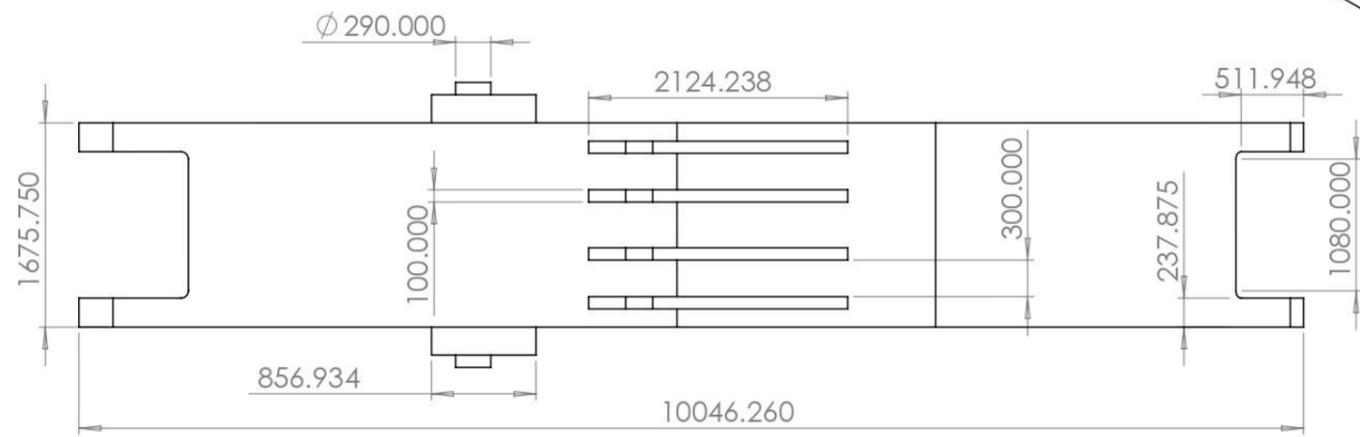
Yu, H. Y., Yuan, M. H., Deng, K., & Dong, R. (2016). Kinematic and Dynamic Simulation Analysis of Hydraulic Excavator's Working Equipment based on ADAMS. MATEC Web of Conferences, 63, 02020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166302020>



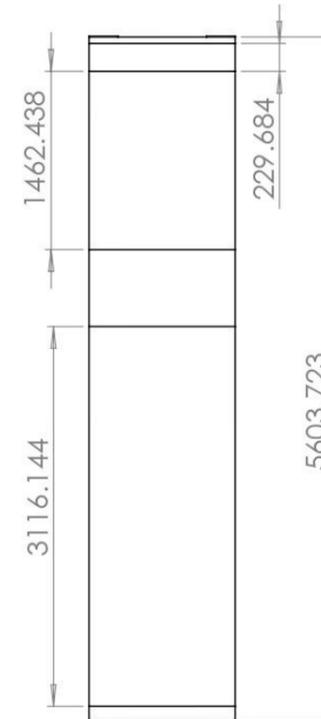
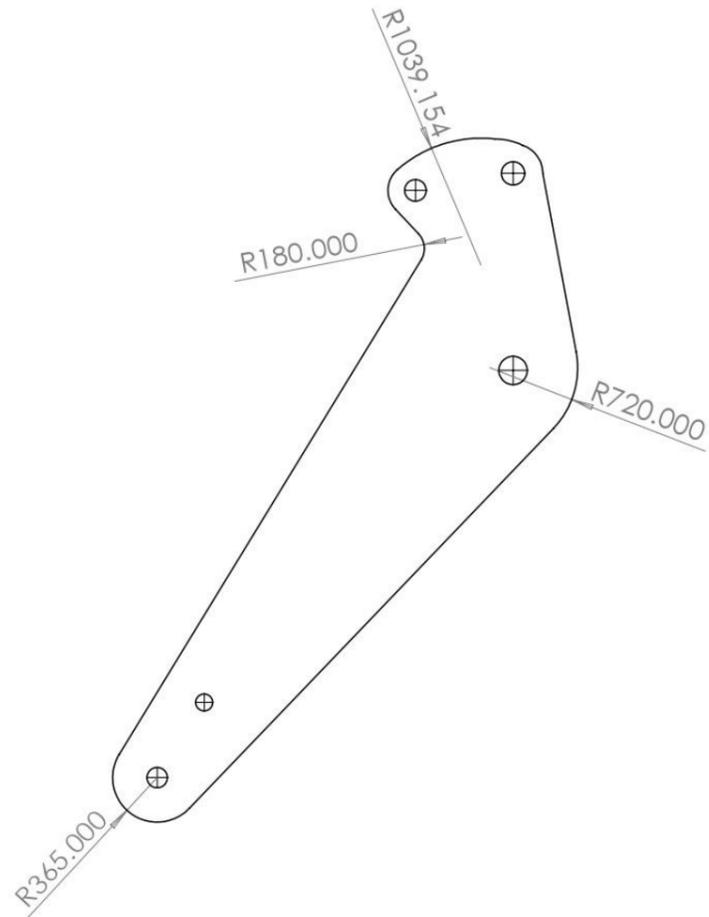
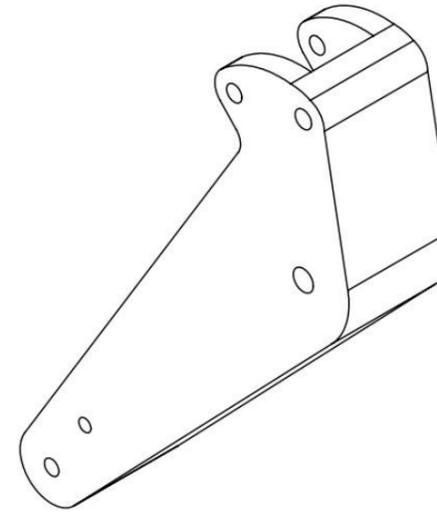
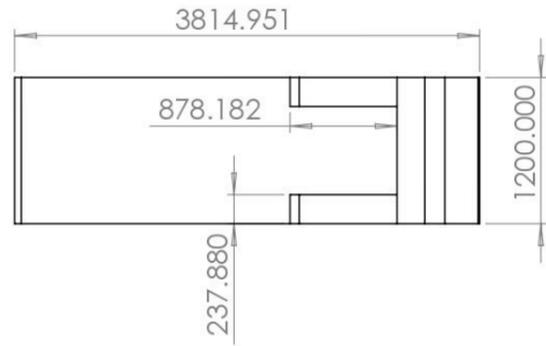
## Planos

Planos de la excavadora KOMATSU PC 4000-6

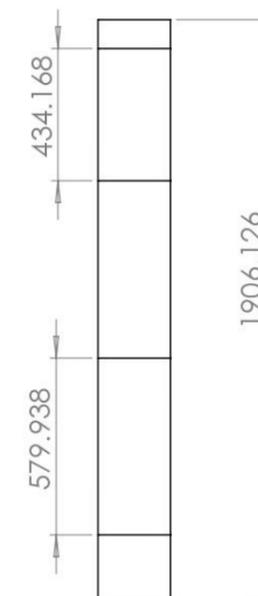
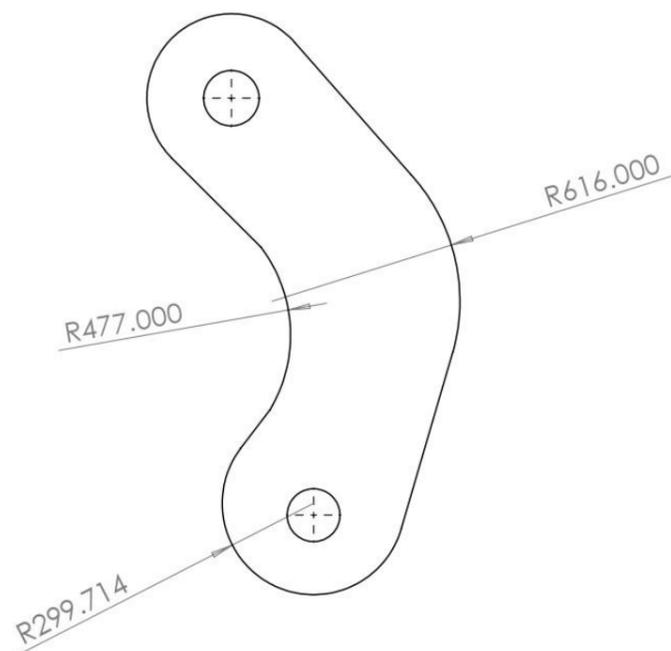
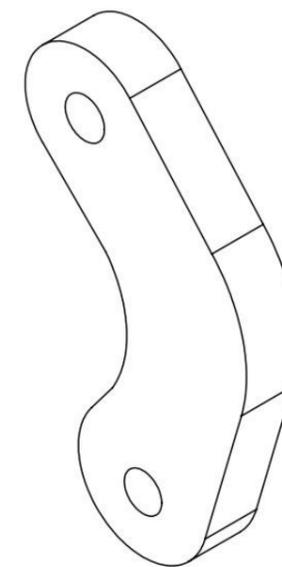
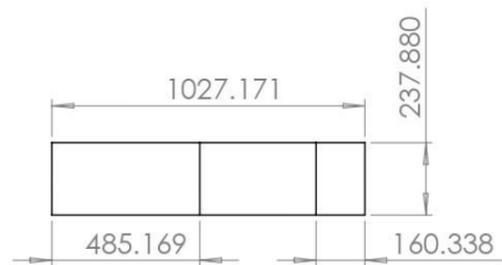




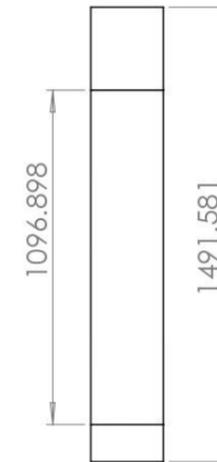
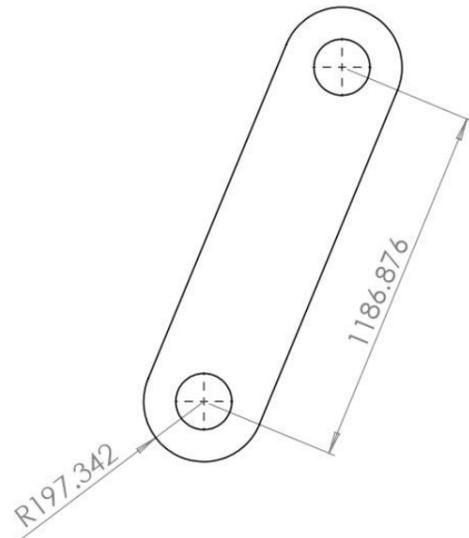
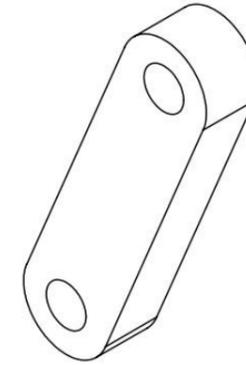
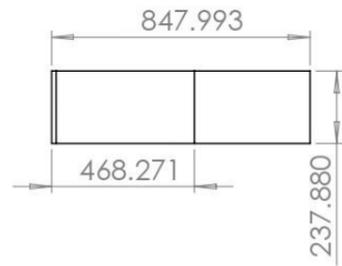
|           |                             |  |
|-----------|-----------------------------|--|
| TÍTULO:   | EXCAVADORA KOMATSU PC4000-6 |  |
| ELEMENTO: | PLUMA                       |  |
| ESCALA:   | 1:50                        |  |



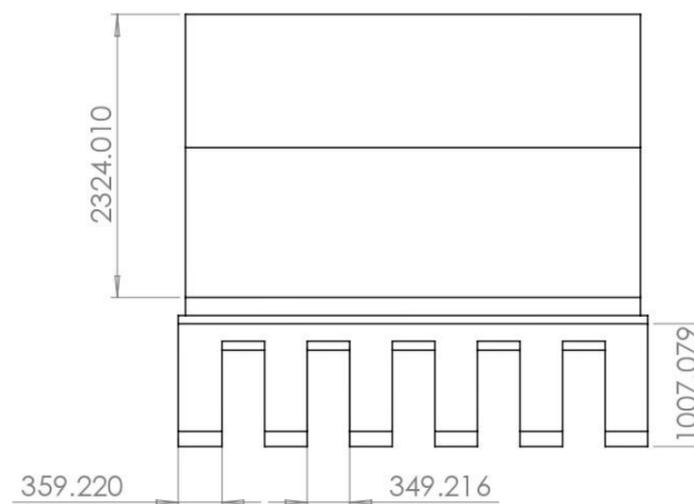
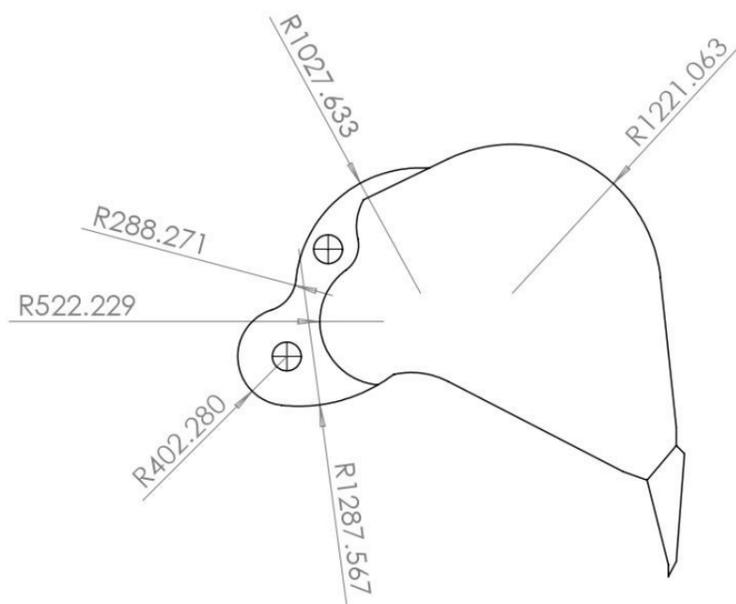
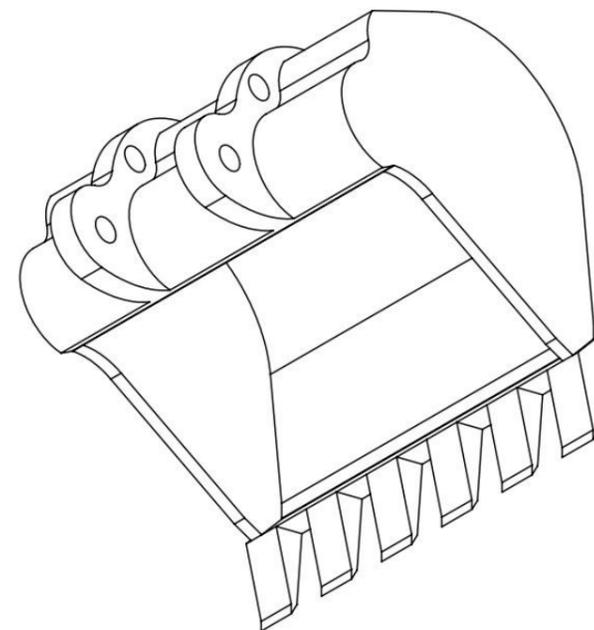
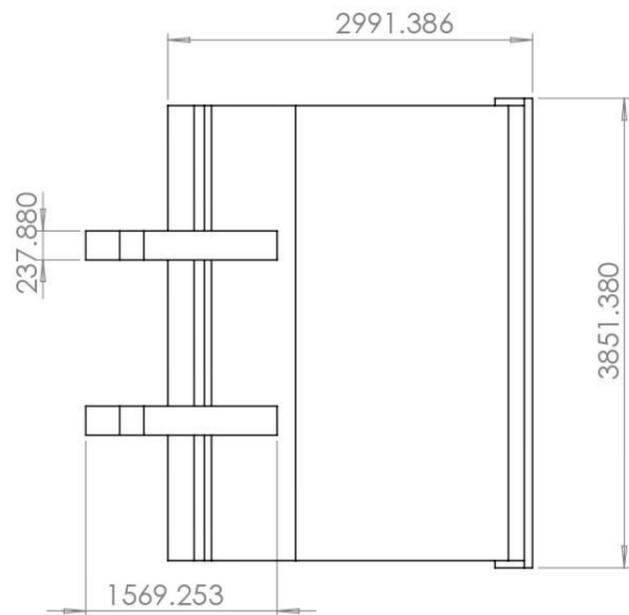
|           |                             |  |
|-----------|-----------------------------|--|
| TÍTULO:   | EXCAVADORA KOMATSU PC4000-6 |  |
| ELEMENTO: | BRAZO                       |  |
| ESCALA:   | 1:50                        |  |



|           |                             |  |
|-----------|-----------------------------|--|
| TÍTULO:   | EXCAVADORA KOMATSU PC4000-6 |  |
| ELEMENTO: | UNIÓN 1                     |  |
| ESCALA:   | 1:50                        |  |



|                                                                                                                   |           |                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD DE PIURA</b> | TÍTULO:   | EXCAVADORA KOMATSU PC4000-6 |
|                                                                                                                   | ELEMENTO: | UNIÓN RECTA                 |
|                                                                                                                   | ESCALA:   | 1:20                        |



|                                                                                                                   |           |                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD DE PIURA</b> | TÍTULO:   | EXCAVADORA KOMATSU PC4000-6 |
|                                                                                                                   | ELEMENTO: | CUCHARA                     |
|                                                                                                                   | ESCALA:   | 1:50                        |