

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Prototipo de silla motorizada basada en el mecanismo Theo Jansen  
diseñada para personas con movilidad reducida”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

James Paúl Flores Párraga

Adrián Rafael Narváez Machuca

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2021

## DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mi familia y amigos, que me ayudaron a realizar muchas metas para llegar a este punto. En especial a mi esposa Génesis Fuentes, mi padre Joffre Flores, mi mejor amigo Augusto Ramírez (Minu), mi primo Michael Espinoza y mi tía Magaly Párraga.

*James Paúl Flores Párraga*

Este proyecto está dedicado a mi familia que me apoyado a lo largo de toda mi carrera en especial a mi madre Lourdes Machuca que siempre me apoyado incondicionalmente.

*Adrián Rafael Narváez Machuca*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a nuestros padres que han tenido la paciencia de guiarnos a lo largo de nuestra vida, a nuestros amigos que a pesar de todo lo que hemos enfrentado nos han acompañado a lo largo del viaje, a nuestras familias que nos han apoyado incondicionalmente en todo lo que era posible y a nuestros docentes de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por haber compartido sus conocimientos durante estos años de estudio, de manera especial, al doctor Francis Loayza tutor de nuestro proyecto, quien nos ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *(nombre de los participantes)* y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

James Paúl Flores Párraga

Adrián Rafael Narváez Machuca

# EVALUADORES



FRANCIS RODERICH  
LOAYZA PAREDES

---

**Ph.D. Francis Loayza**  
PROFESOR DE LA MATERIA



FRANCIS RODERICH  
LOAYZA PAREDES

---

**Ph.D. Francis Loayza**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de un prototipo a escala de una silla motorizada que utiliza el mecanismo de Theo Jansen como una alternativa a la silla de ruedas convencionales pudiendo atravesar terrenos irregulares de forma más eficiente y estable. Se exploraron alternativas para su diseño, obteniendo un dispositivo con 8 extremidades, impulsadas por dos motores a través de poleas que permitan al prototipo girar.

Se analizó la estructura del mecanismo para dimensionar los eslabones de forma que se respeten las relaciones establecidas por Jansen. Requiriendo un análisis dinámico de las partes móviles, para determinar los instantes donde cada elemento estaba expuesto a mayor carga y los puntos más débiles del prototipo. Obteniendo que el punto más débil se encontraba en la parte central del cigüeñal.

Una vez se comprobaron los resultados, se imprimieron las partes del prototipo utilizando filamento ABS. Las piezas presentaron un acabado menor al esperado, lo que causó que presentara mayor fricción. Por ello se concluyó que este tipo de impresión no es el adecuado para un prototipo funcional, pero sirve como base para la generación de moldes que permita obtener mejores acabados mediante otro tipo de impresión (inyección) u otros materiales.

**Palabras Clave:** Mecanismo de Theo Jansen, Prototipo, Análisis dinámico, Análisis estático de tensión.

## **ABSTRACT**

*This work presents the design of a scale prototype of a motorized chair that uses the Theo Jansen mechanism as an alternative to the conventional wheelchair, being able to traverse uneven terrain in a more efficient and stable way. Alternatives for its design were explored, obtaining a device with 8 extremities, driven by two motors through pulleys that allow the prototype to rotate.*

*The structure of the mechanism was analyzed to size the links in such a way that the relationships established by Jansen are respected. Requiring a dynamic analysis of the moving parts, to determine the instants where each element was exposed to the greatest load and the weakest points of the prototype. Obtaining that the weakest point was in the central part of the crankshaft.*

*Once the results were verified, the prototype parts were printed using ABS filament. The pieces presented a lower finish than expected, which caused them to present more friction. For this reason, it was concluded that this type of printing is not adequate for a functional prototype, but it serves as a basis for the generation of molds that allows obtaining better finishes by means of another type of printing (injection) or other materials.*

**Keywords:** *Theo Jansen Mechanism, Prototype, Dynamic Analysis, Static Stress Analysis, Autodesk Inventor.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Descripción del problema .....	1
1.2. Justificación del problema .....	2
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos .....	4
1.4. Marco teórico.....	4
1.4.1. Productos de apoyo.....	7
1.4.2. Controladores .....	8
1.4.3. Mecanismo Theo Jansen.....	9
CAPÍTULO 2.....	16
2. METODOLOGÍA .....	16
2.1. Alternativas de diseño. ....	16
2.1.1. Identificación de las alternativas de diseño.....	16
2.1.2. Factores de diseño .....	18
2.1.3. Selección de alternativas .....	19
2.2. Diseño detallado.....	22
2.2.1. Dimensionamiento de las características del motor.....	22
2.2.2. Diseño de la silla.....	24
2.2.3. Diseño del mecanismo de Theo Jansen.....	26
2.2.4. Análisis del mecanismo .....	32
2.2.5. Parámetros de simulación dinámica .....	33
2.2.6. Diseño del sistema motriz.....	33
2.2.7. Diseño del sistema de control.....	35
2.3. Fabricación de componentes.....	36
2.4. Estimación de costos.....	38
CAPÍTULO 3.....	39



3. RESULTADOS.....	39
3.1. Alternativa ganadora.....	39
3.2. Diseño detallado.....	40
3.2.1. Silla y base del asiento .....	41
3.2.2. Análisis dinámico del Mecanismo Theo Jansen.....	41
3.2.3. Velocidad lineal del mecanismo.....	43
3.2.4. Resultados de análisis dinámicos: Bancada.....	45
3.2.5. Resultados de análisis dinámicos: Cigüeñal.....	47
3.2.6. Resultados de análisis dinámico: Eslabón cadera pie exterior .....	49
3.2.7. Análisis dinámico: Eslabón cadera pie interior.....	50
3.2.8. Análisis dinámico: Eslabón bancada cadera superior.....	51
3.2.9. Análisis dinámico: Eslabón bancada pie inferior .....	52
3.2.10. Análisis dinámico: Cadera .....	53
3.3. Parámetros para la simulación estática .....	54
3.3.1. Análisis Estático: Bancada.....	54
3.3.2. Análisis Estático: Cigüeñal.....	55
3.3.3. Análisis Estático: Eslabón cadera pie exterior .....	56
3.3.4. Análisis Estático: Eslabón cadera pie interior .....	57
3.3.5. Análisis Estático: Eslabón bancada cadera superior .....	58
3.3.6. Análisis Estático: Eslabón bancada pie inferior.....	59
3.3.7. Análisis Estático: Cadera .....	60
3.4. Sistemas de control .....	61
3.5. Fabricación .....	64
3.6. Costos .....	66
CAPÍTULO 4.....	68
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
4.1. Conclusiones .....	68
4.2. Recomendaciones.....	68

## BIBLIOGRAFÍA

## APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LOD	Ley Orgánica de Discapacidades
CONADIS	Consejo Nacional para la igualdad de Discapacidades
IESS	Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social
GDL	Grados De Libertad
RPM	Revoluciones Por Minuto

## SIMBOLOGÍA

$X$	Desplazamiento	m
$\dot{X}$	Velocidad	$\frac{m}{s}$
$\ddot{X}$	Aceleración	$\frac{m}{s^2}$
$P$	Potencia	W
$\tau$	Torque	Nm
$\omega$	Velocidad angular	$\frac{rad}{s}$
$\sigma$	Esfuerzo	MPa

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura: 1.1: Dispositivo para caminar de Klann. ....	6
Figura: 1.2: Theo Jansen “Strandbeest”. (Jansen, 2007) .....	7
Figura: 1.3: Silla de ruedas plegable, Everest y Jennings. (Alberoni, 2012) .....	8
Figura: 1.4: Esquema del sistema de control para una silla ruedas Centeno-Romero (2008) .....	9
Figura: 1.5: Eslabones y uniones de un pie del mecanismo Theo Jansen. ....	10
Figura: 1.6: Fases del movimiento de la punta del pie en cada ciclo. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015) .....	11
Figura: 1.7: Puntos importantes para el análisis cinemático de un pie del mecanismo de Theo Jansen. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015) .....	11
Figura: 1.8: Primera cadena cinemática a analizar. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015) ...	12
Figura: 1.9: Segunda cadena cinemática a analizar. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015) .	13
Figura: 1.10: Tercera cadena cinemática a analizar. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015) .	14
Figura: 2.1: Primer concepto como alternativa de diseño .....	17
Figura: 2.2: Alternativa 1 .....	19
Figura: 2.3: Alternativa 2 .....	20
Figura: 2.4: Alternativa 3 .....	21
Figura: 2.5: Motor Nema 17 .....	24
Figura: 2.6: Asiento del prototipo .....	25
Figura: 2.7: Base el asiento .....	26
Figura: 2.8: Trece números mágicos del mecanismo de Theo Jansen obtenidos por computadora. (Onieva y cols., 2019) .....	27
Figura: 2.9: Bancada del mecanismo: .....	28
Figura: 2.10: Cadera del mecanismo .....	29
Figura: 2.11: Pie del mecanismo .....	29
Figura: 2.12: Eslabón que conecta la cadera con la bancada a través del cigüeñal ....	30
Figura: 2.13: Eslabón que conecta el pie con la bancada a través del cigüeñal .....	30
Figura: 2.14: Eslabón que conecta el pie con la cadera en la parte exterior del mecanismo .....	30
Figura: 2.15: Eslabón que conecta el pie con la cadera en la parte interior del mecanismo .....	31
Figura: 2.16: Mecanismo armado .....	31
Figura: 2.17: Pasadores de unión entre eslabones .....	32
Figura: 2.18: Motores del mecanismo .....	34
Figura: 2.19: Cigüeñal del mecanismo .....	34
Figura: 2.20: Sistema motriz del mecanismo .....	35
Figura: 2.21: Modelo 3D del Arduino UNO .....	36
Figura: 2.22: Prototipo impreso con ABS. (Referencial) .....	37
Figura: 3.1: Alternativa ganadora .....	40
Figura: 3.2: Silla sobre la base con carga de diseño .....	41
Figura: 3.3: Extremidad del mecanismo implementado .....	42
Figura: 3.4: Objeto de estudio dinámico .....	43
Figura: 3.5: Desplazamiento en el eje x con respecto al tiempo .....	44

Figura: 3.6: Recorrido del mecanismo en el eje de desplazamiento con respecto al tiempo.....	44
Figura: 3.7: Cargas en la bancada en función del tiempo .....	45
Figura: 3.8: Momentos en la bancada en función del tiempo .....	46
Figura: 3.9: Posición de la bancada en $T_c=0.085$ .....	46
Figura: 3.10: Cargas en el cigüeñal en función del tiempo .....	47
Figura: 3.11: Momentos en el cigüeñal en función del tiempo.....	48
Figura: 3.12: Posición del cigüeñal en $T_c=0.085$ .....	48
Figura: 3.13: Cargas en el eslabón cadera pie exterior en función del tiempo .....	49
Figura: 3.14: Posición el eslabón cadera pie exterior en $T_c=0.2525$ .....	50
Figura: 3.15: Cargas en el eslabón cadera pie exterior en función del tiempo .....	50
Figura: 3.16: Posición del eslabón bancada pie inferior en $T_c=0.1540$ .....	51
Figura: 3.17: Reacciones en el eslabón bancada cadera superior en función del tiempo.....	51
Figura: 3.18: Posición del eslabón bancada cadera superior en $T_c=0.2525$ .....	52
Figura: 3.19: Reacciones en el eslabón bancada pie inferior en función del tiempo .....	52
Figura: 3.20: Posición del eslabón bancada pie interior en $T_c=0.1540$ .....	53
Figura: 3.21: Reacciones en la cadera en función del tiempo .....	53
Figura: 3.22: Posición de la cadera en $T_c=0.2525$ .....	54
Figura: 3.23: Resultados estáticos para la bancada .....	55
Figura: 3.24: Resultados estáticos del cigüeñal .....	56
Figura: 3.25: Resultados estáticos el eslabón cadera pie exterior.....	57
Figura: 3.26: Resultados estáticos para el eslabón cadera pie interior .....	58
Figura: 3.27: Resultados estáticos para el eslabón bancada cadera superior.....	59
Figura: 3.28: Resultados estáticos para el eslabón bancada pie inferior.....	60
Figura: 3.29: Resultados estáticos para la cadera.....	61
Figura: 3.30: Diagrama de conexiones.....	62
Figura: 3.31: Código de recorrido .....	63
Figura: 3.32: Proceso de armado de prototipo .....	64
Figura: 3.33: Prototipo impreso con ABS .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Registro de discapacidades en Ecuador. El porcentaje es respecto al total de discapacitados registrados en la CONADIS. (CONADIS, 2021).....	3
Tabla 1.2: Tipos de juntas en función de sus grados de libertad. (Norton, 1995).....	5
Tabla 2.1: Tabla de comparación para factores de diseño. ....	18
Tabla 2.2: Tabla de selección para calificación (1-5).....	21
Tabla 2.3: Tabla de selección para resultados. ....	22
Tabla 2.4: Escalas del mecanismo .....	27
Tabla 3.1: Resumen completo de costos.....	67

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Descripción del problema

Actualmente, las sillas de ruedas tradicionales cumplen con su objetivo de facilitar el movimiento de personas con movilidad reducida, especialmente en superficies planas o de características urbanas. El desarrollo de otros mecanismos de movimiento como el de Theo Jansen (Jansen, 2007), podría ser una alternativa interesante y de referencia para otros proyectos tanto académicos como para ser implementados en prototipos reales. Con el desarrollo de este proyecto, se ofrece una alternativa diferente a la silla de ruedas convencional para personas con movilidad reducida, se busca garantizar la seguridad y bienestar de sus usuarios puesto que se plantea como un artefacto a ser utilizado en la vida diaria.

Garantizar la seguridad permite que sea un producto confiable, mientras que buscar asegurar el bienestar de los usuarios permitirá mantener el interés en la utilización del mismo. Analizar el dispositivo desde el punto de vista económico permitirá determinar un aproximado del costo de producción del dispositivo, siendo de gran importancia para determinar la viabilidad del mismo, lo cual permitirá analizar si su producción a gran escala comparada con las sillas tradicionales involucra una ganancia significativa.

Tomando en cuenta aspectos técnicos para delimitar tanto los parámetros de diseño como los involucrados en la producción, se puede obtener un producto con características similares, lo cual es de gran importancia en el caso de la producción a gran escala. Es de vital importancia tomar en cuenta el impacto ambiental que involucra el uso de ciertos materiales, por lo que hay que considerar la procedencia de estos, lo que involucra trabajar con ellos y lo que sucederá después de cumplir su periodo de utilidad, con el fin de minimizar la huella de carbono que podría involucrar.

En cuanto a la incidencia en la salud pública, debido a que esto solo es una alternativa a las sillas convencionales y estas no representan una ventaja

funcional en cuanto a la movilidad se refiere, el impacto en la salud pública es nula, de modo que ni la mejora ni la perjudica de forma directa por otro lado los aspectos culturales de una sociedad se reflejan en gran medida en la integración de tecnología en su día a día, por lo que los impactos culturales podrían ser significativos al cambiar la percepción de estos dispositivos dando un paso estético y tecnológico hacia la modernidad, esto va de la mano con la sociedad pudiendo tener un impacto significativo en la percepción hacia las personas que hacen uso de una silla de ruedas, este concepto de modernidad reflejado en el vehículo que utiliza para moverse podría dar apertura a una mejor integración social, cambiando de manera superficial la perspectiva de las personas en contacto con los usuarios del dispositivo en cuestión.

## **1.2. Justificación del problema**

Las sillas de ruedas permiten la movilización de por personas con movilidad reducida por distintas superficies, permitiendo mejorar en cierta medida su calidad de vida al permitir que sus usuarios tengan un mayor grado de independencia, es por ello que califica como un equipo de apoyo. Con la ayuda de este proyecto se busca una alternativa diferente a la convencional que pueda ser utilizada al igual que una silla de ruedas, utilizando el mecanismo de "Theo Jansen" en reemplazo de las ruedas tubulares, causando que el movimiento esté ligado a las características del mecanismo, llegando a una aplicación del mismo.

Se busca analizar el mecanismo de forma que podamos describir el movimiento y establecer ciertos parámetros que influyen en el funcionamiento del equipo. Tratando de analizar cada parte del mecanismo con la carga correspondiente para establecer la robustez de las piezas de forma que permita validar el funcionamiento de este. Considerando la fatiga que puede existir en los eslabones del mecanismo se puede establecer la vida útil de las piezas y establecer el tiempo adecuado para realizar mantenimiento con el fin de prevenir inconvenientes durante su funcionamiento.

Acorde al artículo 6 de la Ley Orgánica de Discapacidades (LOD), "se considera persona con discapacidad a toda aquella que, como consecuencia de una o más



deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales, ve restringida permanentemente su capacidad biológica, psicológica y asociativa para ejercer una o más actividades esenciales de la vida diaria”. (“Ley orgánica de discapacidades”, 2012) Por lo que todo aquel que cumpla con dicho artículo de forma comprobable, formaría parte de dicho grupo.

Dentro de la república del Ecuador hay 472.213 personas con discapacidad registradas en el registro nacional de discapacidad de la República del Ecuador acorde a lo que se muestra en la Tabla 1.1, según las estadísticas del Ministerio de Salud Pública a través del Consejo Nacional para la igualdad de discapacidades (CONADIS), hasta el 6 de abril del 2021. (CONADIS, 2021)

**Tabla 1.1: Registro de discapacidades en Ecuador. El porcentaje es respecto al total de discapacitados registrados en la CONADIS. (CONADIS, 2021)**

Discapacidad	Porcentaje	Cantidad
Física	45.84%	216,479
Intelectual	23.00%	105,588
Auditiva	14.13%	66,722
Visual	11.58%	54,662
Psicosocial	5.46%	25,762

De las 216.479 personas con discapacidad física, 106.473 personas pertenecientes al 49.18% presentan un grado de discapacidad de 30% al 50%. El 12.46% de las personas con discapacidad física son menores de 25 años. Acorde a los datos presentados por el Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) en marzo del 2021, referenciado por la CONADIS solo 68.840 son laboralmente activas, de las cuales 37.524 pertenecientes al 54.51% tienen discapacidad física. (CONADIS, 2021)

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Desarrollar un prototipo de silla de ruedas basado en el mecanismo de Theo Jansen para brindar una alternativa diferente de a las sillas de rueda convencionales.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Elaborar el diseño del mecanismo de Theo Jansen con 8 extremidades.
- Simular dinámica y estáticamente el mecanismo de Theo Jansen a través de un sistema CAD.
- Comprobar si la fabricación de componentes para el mecanismo a través de impresión 3D con filamento es una opción viable con una escala del 22%.
- Establecer las bases para el desarrollo del sistema electrónico y de control.

## **1.4. Marco teórico**

El desarrollo de este proyecto requiere conocer con mayor detalle el concepto de un mecanismo, para poder estudiar de mejor forma el mecanismo de Theo Jansen. Antes de partir con la definición de un mecanismo hay que entender que se denomina cadena cinemática a un conjunto de eslabones conectados por juntas que permiten obtener un movimiento en la salida como consecuencia de un movimiento de entrada. Un eslabón se define como un cuerpo rígido que tiene al menos dos puntos donde se pueda conectar a otros eslabones, denominados nodos. (Norton,1995)

Una junta es una conexión entre eslabones que permite o limita el movimiento entre ellos. Un mecanismo no es nada más que una cadena cinemática que tiene al menos uno de sus eslabones anclados o sujetos a lo que se denomina bancada, que puede o no estar en movimiento.

Los grados de libertad (GDL) que tiene un cuerpo o un mecanismo, se define como “el número de parámetros independientes (medidas) que se necesitan para definir

unívocamente su posición en el espacio”. (Norton,1995) Según el tipo de juntas que tienen un conjunto de eslabones clasificadas en la Tabla 1.2 se pueden tener movimientos distintos debido a que permiten obtener diversos GDL.

**Tabla 1.2: Tipos de juntas en función de sus grados de libertad. (Norton, 1995)**

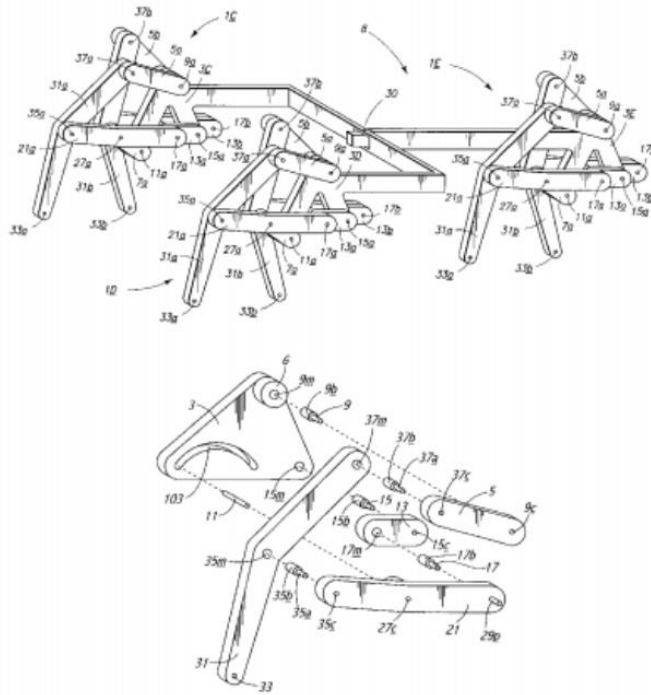
Juntas	GDL
Junta completa	1
Semijunta	2
Junta de rótula	3
Junta de pasador de primer orden	1
Junta de pasador de segundo orden	2
Junta de rodamiento	1 o 2

Dependiendo de las dimensiones de los eslabones se puede pasar de un movimiento rotacional a un movimiento lineal, esta es la idea que utilizaría para obtener el tipo de movimiento deseado. Con ayuda de eslabones intermedios, se limita el movimiento de los eslabones finales, de forma que describan las características deseadas. En este caso exploraremos específicamente dos tipos de mecanismos que tienen un movimiento de salida similar, pero se desempeñan de forma diferente.

Comparando robots con ruedas y robots articulados, estos últimos tienen el potencial de atravesar ciertos terrenos de forma más eficiente y estable. El uso de mecanismos en lugar de articulaciones se propuso debido a que se requerían mecanismos de control más complejos que podían ser simplificados, por lo que se planteó como un reemplazo a las ruedas en robots y ciertos vehículos. (Onieva y cols., 2019)

El primero de ellos es el mecanismo de Klann, el cual simula el caminar de un animal, tiene varios puntos enlazados a la bancada con eslabones que permiten el movimiento deseado, pudiendo reemplazar algunos de los eslabones por uno solo con ranuras que permitan el mismo movimiento como se muestra en la Figura: 1.1 (Klann, 2002), manteniendo cierta estabilidad característica de este

tipo de mecanismos a pesar de estar sobre superficies accidentadas.  
(Kulandaidasan Sheba, Elara, Martínez-García, y Tan-Phuc, 2016)



**Figura: 1.1: Dispositivo para caminar de Klann.**

**Patente: US6478314B1 (Klann, 2002)**

El siguiente mecanismo es el de Theo Jansen, al igual que el mecanismo de Klann simula el caminar de un animal. Al desarrollar el mecanismo se llamó “Strandbeest” (animal de playa), debido a que en un comienzo era una estructura capaz de desplazarse sobre la arena con ayuda del viento, usando una vela como se muestra en la Figura: 1.2. (Jansen, 2007)



**Figura: 1.2: Theo Jansen “Strandbeest”. (Jansen, 2007)**

Para entender lo que se busca obtener durante el desarrollo de este proyecto, se deben explicar los siguientes conceptos e ideas:

#### **1.4.1. Productos de apoyo**

Se define como producto de apoyo al equipo o dispositivo que tiene la finalidad de ayudar a personas con discapacidad permanente o temporal a tener cierto grado de independencia, mejorando su calidad de vida. (Alberoni, 2012)

La fecha de invención de la silla de ruedas no es algo claro de definir, sin embargo, en 1595 fue construida para el Rey de España Felipe II aunque se desconoce el nombre del inventor. No fue hasta 1932 que el ingeniero Henry Jennings que se construyó la silla de ruedas plegable de ruedas tubulares que conocemos actualmente, Figura: 1.3.

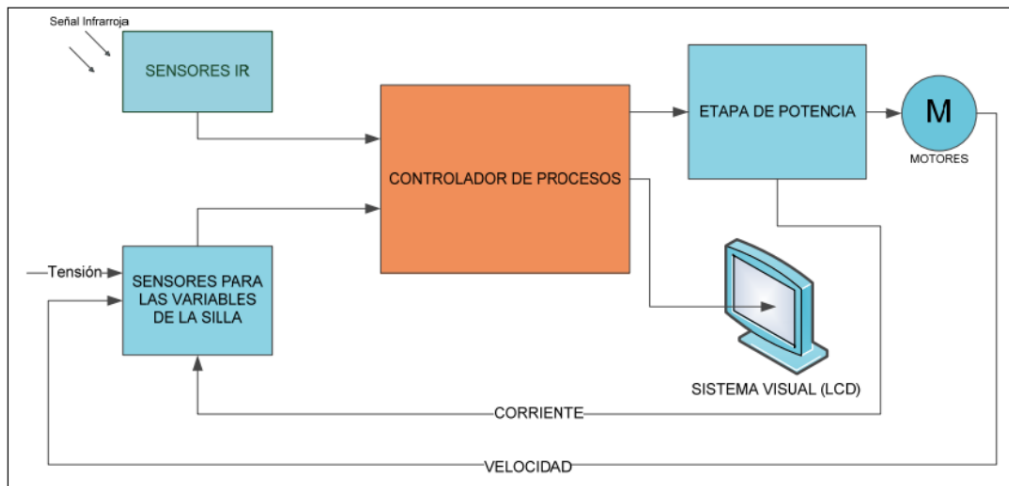
Dicho tipo de silla de ruedas son autopropulsadas, por lo que si el usuario no puede hacerlo por sí mismo es necesario la ayuda de otra persona para lograrlo. Es por ello por lo que se buscó hacer sillas de ruedas que usen un motor eléctrico para hacer girar las ruedas, ayudando a las personas que tienen este tipo de limitación.



**Figura: 1.3: Silla de ruedas plegable, Everest y Jennings. (Alberoni, 2012)**

#### **1.4.2. Controladores**

Los controladores son dispositivos necesarios cuando se tiene que modificar los parámetros de un equipo de forma frecuente y específica, en esta situación al requerir mover dos servomotores de manera independiente y a voluntad, la necesidad de generar estos parámetros de forma accesible para el usuario implica el uso de un controlador digital. Para este caso en particular el diagrama de control que simplifica las etapas de este proceso se ve reflejada en la siguiente Figura: 1.4.



**Figura: 1.4: Esquema del sistema de control para una silla ruedas Centeno-Romero (2008)**

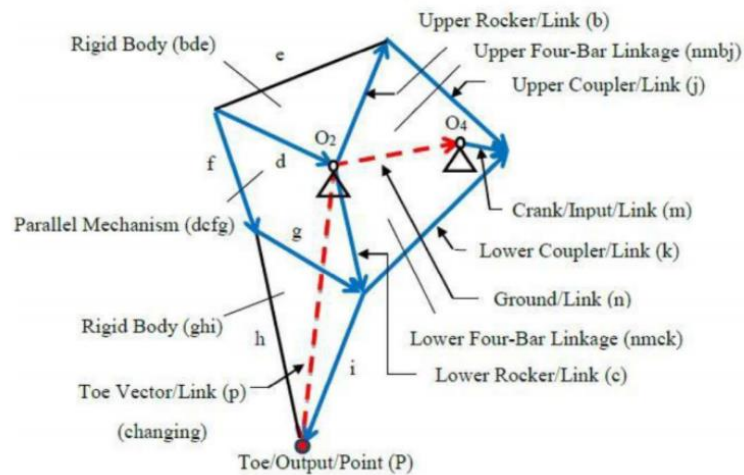
En la Figura: 1.4 se puede observar dos entradas al controlador, la primera corresponde a las señales de entrada que el usuario selecciona mediante el uso ya sea de un control universal o un joystick. A esto se agrega una segunda entrada que corresponde a la retroalimentación del controlador, correspondiendo así a un sistema de control cerrado (Nise, 2020). Estos sistemas de control tienen la ventaja de tener una mayor precisión debido a la retroalimentación proveída, en este caso por los sensores que miden la velocidad que el motor está entregando, calibrando así de mejor manera la velocidad final del equipo.

Dicho esto, es evidente las ventajas de un sistema de control cerrado, pero su principal desventaja es el costo de su diseño y programación, al igual que el hardware necesario para que este tipo de control sea implementado, por lo que no es descartable un sistema de lazo abierto para abaratar costos de producción y hacerlo más accesible.

### 1.4.3. Mecanismo Theo Jansen

El mecanismo de Theo Jansen consta de varias partes como se muestra en la Figura: 1.5 dos cuerpos rígidos que son eslabones con tres nodos de los cuales uno tiene la función de pierna, una cadena cinemática de cuatro barras articuladas superior e inferior tipo manivela balancín, una cadena abierta de 4 barras similar a un paralelogramo llamada cadena paralela, y la bancada

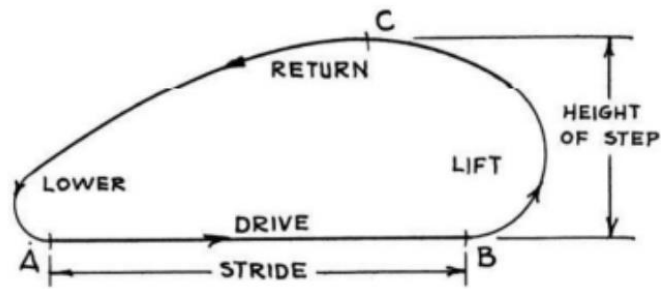
conectada a dos eslabones del mecanismo, teniendo un solo grado de libertad, lo que permite definir la posición de cada parte a partir de la entrada. (Mehrdad Mohsenizadeh, 2015)



**Figura: 1.5: Eslabones y uniones de un pie del mecanismo Theo Jansen.**

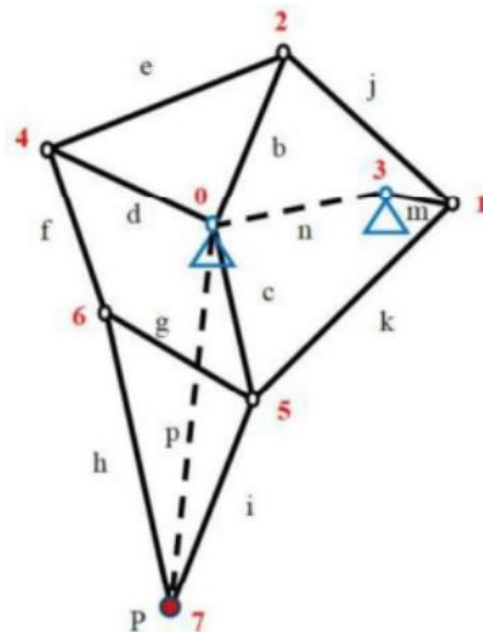
Cada conjunto del mecanismo está formado por dos pies, los cuales tienen dos eslabones unidos a la bancada, que se encuentran desfasados medio ciclo. La longitud de cada eslabón es lo que limita el movimiento del pie a ser recto casi por media revolución, teniendo cuatro tipos de movimientos, uno de levantamiento donde busca alcanzar la altura máxima del paso, retorno donde acaba de alcanzar dicha altura máxima, descenso preparándose para la siguiente fase y el que produce la traslación caracterizada por producir un movimiento constante lineal como se muestra en la Figura: 1.6.





**Figura: 1.6: Fases del movimiento de la punta del pie en cada ciclo. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015)**

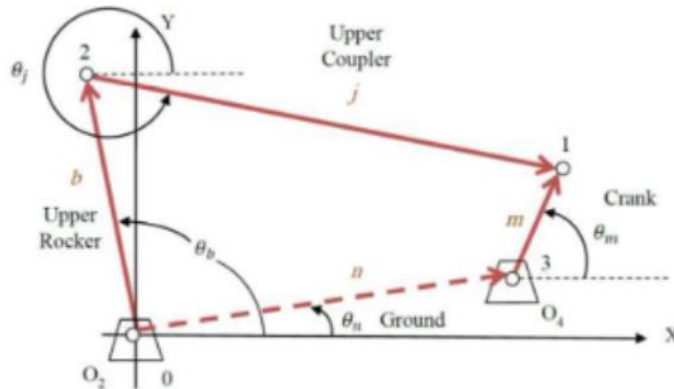
Para poder definir posiciones y velocidades, debemos terminar de realizar el análisis cinemático del mecanismo, para ello se necesita tener en cuenta los puntos que se deben analizar, puntos que no forman parte de la bancada, junto a los eslabones que conectan dichos nodos como se ilustra en la Figura: 1.7.



**Figura: 1.7: Puntos importantes para el análisis cinemático de un pie del mecanismo de Theo Jansen. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015)**

Para simplificar el análisis del mecanismo se dividió el mecanismo en varias partes, permitiendo analizar cadenas más simples y a partir de ellas, poder definir las cadenas intermedias logrando describir el movimiento del pie, obteniendo la

longitud y altura de cada paso. Para ello se empieza analizando la posición de la cadena inicial formada por los eslabones (b, j, n, m) según se muestra en la Figura: 1.8.



**Figura: 1.8: Primera cadena cinemática a analizar. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015)**

El eslabón motriz sería la barra m, por lo que su ángulo con respecto a la horizontal, junto al ángulo de la bancada que conecta el punto 0 y 3, definen las posiciones de dicha cadena cinemática.

$$\vec{m} + \vec{n} - \vec{j} - \vec{b} = 0$$

(1.1)

$$me^{i\theta_m} + ne^{i\theta_n} - je^{i\theta_j} - be^{i\theta_b}$$

(1.2)

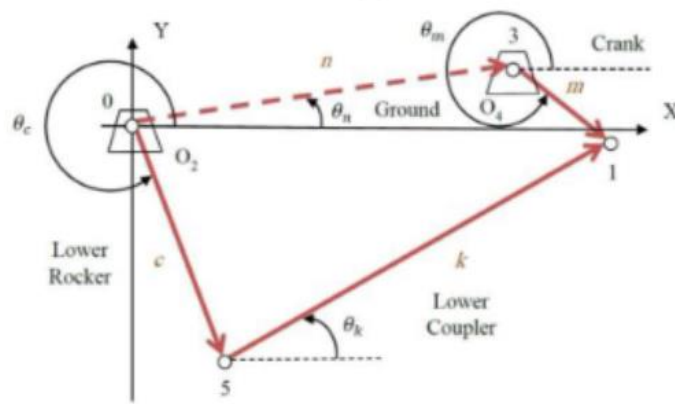
Donde los vectores de la ecuación (1.1) se pueden escribir como la ecuación (1.2) teniendo en cuenta que (m, n, j, b) son las magnitudes de los vectores de la ecuación (1.1) y ( $\theta_m, \theta_n, \theta_j, \theta_b$ ) muestran su dirección, de forma que se haría con las demás cadenas.

En la ecuación (1.1) se puede separar la parte imaginaria (1.4) de la parte real (1.3), de las que  $\theta_m$  y  $\theta_n$  son conocidas junto a las longitudes por lo que las incógnitas serían  $\theta_j$  y  $\theta_b$ .

$$m \cos(\theta_m) + n \cos(\theta_n) - j \cos(\theta_j) - b \cos(\theta_b) = 0 \quad (1.3)$$

$$m \sin(\theta_m) + n \sin(\theta_n) - j \sin(\theta_j) - b \sin(\theta_b) = 0 \quad (1.4)$$

En la cadena que se muestra como ejemplo se busca conocer la posición del punto 2 definida por  $\theta_j$  y  $\theta_b$ .



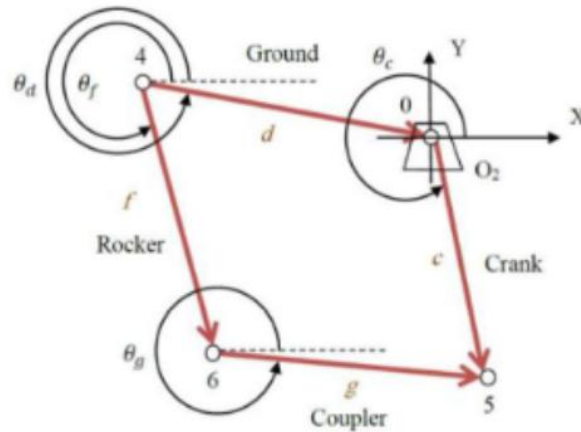
**Figura: 1.9: Segunda cadena cinemática a analizar. (Mehrddad Mohsenizadeh, 2015)**

De igual manera se realiza con la cadena cinemática formada por los eslabones (n, m, c, k) en la Figura: 1.9 para definir el punto 5 a través de  $\theta_c$  y  $\theta_k$  obteniendo las ecuaciones (1.5) y (1.6).

$$m \cos(\theta_m) + n \cos(\theta_n) - c \cos(\theta_c) - k \cos(\theta_k) = 0 \quad (1.5)$$

$$m \sin(\theta_m) + n \sin(\theta_n) - c \sin(\theta_c) - k \sin(\theta_k) = 0 \quad (1.6)$$

El punto 4 puede ser definido por el punto 2 debido a que pertenecen al mismo eslabón haciendo pivot en el punto 0, por lo que lo dejaría con una cadena cinemática restante por analizar mostrada en la Figura: 1.10 Partiendo de la ecuación (1.7) se transforma a la ecuación (1.8).



**Figura: 1.10: Tercera cadena cinemática a analizar. (Mehrdad Mohsenizadeh, 2015)**

$$\vec{f} + \vec{g} - \vec{c} - \vec{d} = 0$$

(1.7)

$$f e^{i\theta_f} + g e^{i\theta_g} - c e^{i\theta_c} - d e^{i\theta_d}$$

(1.8)

De estas ecuaciones se separa la parte imaginaria y la parte real.

$$f \cos(\theta_f) + g \cos(\theta_g) - c \cos(\theta_c) - d \cos(\theta_d) = 0$$

(1.9)

$$f \sin(\theta_f) + g \sin(\theta_g) - c \sin(\theta_c) - d \sin(\theta_d) = 0$$

(1.10)

De la ecuación (1.9) y (1.10) conocemos  $\theta_c$  y  $\theta_d$  debido a que conocemos la posición del punto 4, por lo que podemos definir la posición del punto 6 junto a  $\theta_f$  y  $\theta_g$ . Al conocer estos datos, se puede definir la posición del punto 7 en cada instante de tiempo, lo que da origen a la imagen Figura: 1.6

Estos conceptos e ideas ayudan a entender el propósito de este proyecto y parte de su funcionamiento general. Con el desarrollo de un prototipo se espera poder determinar la factibilidad de un equipo funcional para una persona con limitaciones de movilidad, esperando permitirles ser un poco más independientes en su

movilización con una alternativa similar, pero con características notoriamente diferentes a una silla de ruedas convencional.

Para poder determinar su factibilidad se analizó las ecuaciones mostradas anteriormente, tomando en cuenta los aspectos en la que se puede controlar y los parámetros que determinan el funcionamiento de este. El mecanismo de Theo Jansen tiene la característica de mantener una velocidad constante si el troque aplicado en el eslabón motriz es constante, además de mostrar poca variación en la altura de la bancada (Shunsuke, Mohan Rajesh, y Masami, 2013). Es por ello por lo que se busca entender correctamente su funcionamiento, mientras que en la etapa de diseño se buscará determinar la magnitud de los parámetros fijos adecuados para su aplicación.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En un comienzo se identificaron los requerimientos para establecer los límites del diseño, como características del usuario, factores de seguridad y aspectos básicos de una silla de ruedas, que permitieron determinar los factores más influyentes en el proceso de diseño.

Una vez establecidos los factores de diseño y la importancia de cada uno de ellos, se exploraron las alternativas, de forma que se determinó cuál de ellas cumple de mejor forma los parámetros establecidos. Obteniendo la mejor alternativa se utilizaron los requerimientos para definir ciertas características del diseño seleccionado, permitiendo determinar las dimensiones y la geometría que cumplen con dichos requerimientos.

Para ello se realizó un análisis dinámico del mecanismo a través de Autodesk Inventor, con el fin de determinar los instantes en que cada elemento tenía mayor carga. Esto permitió conocer el elemento más débil del mecanismo, así como comprobar la movilidad de este.

### 2.1. Alternativas de diseño.

Se analizaron las alternativas para el prototipo, identificando materiales de fabricación, así como la configuración de las extremidades y algunos de sus procesos de fabricación.

#### 2.1.1. Identificación de las alternativas de diseño.

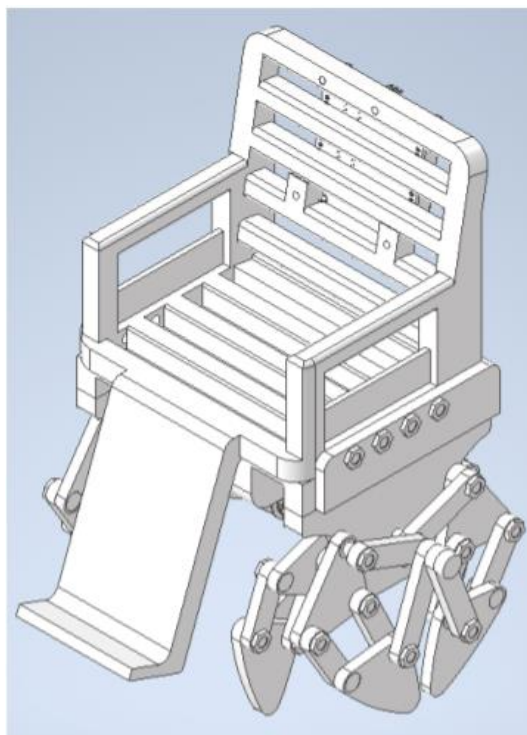
Debido a que este diseño en particular es de por sí una alternativa a las sillas de ruedas convencionales, las alternativas de diseño que resultantes presentan variaciones sobre las extremidades y su sistema motriz.

La primera opción para la construcción del prototipo del mecanismo es el acero, debido a sus propiedades físicas y mecánicas para la transmisión de esfuerzos (McCORMAC, 2012), aunque debido a que el objetivo es construir un prototipo a escala y que los bajos esfuerzos que se generan, otros materiales fueron

contemplados. La madera, por otro lado, mostró un precio más accesible, siendo fácil de trabajar (Gorrini, Poblete, Hernández, y Dunn, 2004), se consideró como una opción para la construcción del prototipo en cuestión. La última alternativa explorada fue la impresión del mecanismo en tres dimensiones, por lo que la opción del uso de polímeros no fue descartada al igual que una construcción mixta entre la madera y polímero.

Con respecto a la ubicación del mecanismo respecto a la silla de para personas de movilidad reducida, se han planteado dos conceptos que refieren específicamente a la ubicación del mecanismo, de estos dos conceptos, la estabilidad, altura, robustez, comodidad y factor estético son los que definieron el diseño final del mecanismo, a continuación, se muestran ambos conceptos.

En cuanto a los componentes claves que determinaron las dimensiones del prototipo, se ha escogido una proporción del 22% del tamaño de una silla de ruedas común, el cual da espacio suficiente para los motores y la tarjeta controladora.



**Figura: 2.1: Primer concepto como alternativa de diseño**

### 2.1.2. Factores de diseño

Para la selección de la mejor alternativa para la fabricación del prototipo se consideró aspectos que involucraron tanto el proceso de su fabricación como su desempeño durante su utilización, la selección de dichos factores se definió en parte por criterio del equipo encargado del diseño.

Se comparó las características más importantes según el equipo de diseño y la opinión de personas externas al mismo, mostrando la importancia del objetivo del diseño. Es por ello por lo que se realizó una encuesta para poder comparar dichas opiniones con las establecidas previamente y obtener una relación entre los factores que definieron sus ponderaciones.

**Tabla 2.1: Tabla de comparación para factores de diseño.**

	Técnico	Encuestas		Ponderación
	60 %	40 %	100 %	
Costo	5	4	4.6	28 %
Facilidad de fabricación	4	3.67	3.383	23 %
Movilidad	5	4.33	4.732	29 %
Resistencia	3	3.67	3.268	20 %

Existen otras formas de determinar dichos porcentajes, como la casa de la calidad, sin embargo, ese tipo de matrices suelen ser utilizadas para comparar productos de distintos proveedores, es por ello por lo que se utilizó una matriz de comparación, obteniendo las siguientes ponderaciones.

- Costo. (28 %)
- Facilidad de fabricación. (23 %)
- Movilidad. (29 %)
- Resistencia. (20 %)

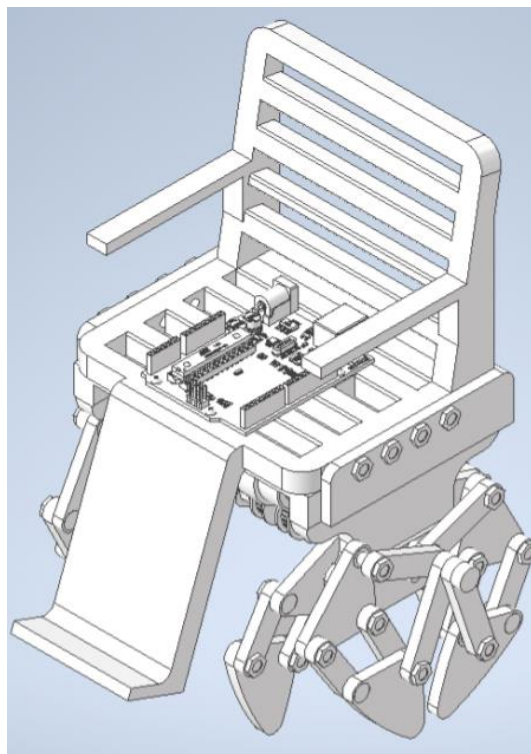
Dichos valores mostraron que lo más importante es evidenciar la movilidad del mecanismo mientras se mantiene un costo y una dificultad para su fabricación relativamente baja. La resistencia fue tomada en cuenta en el proceso de diseño de la alternativa ganadora con la debida importancia por lo que se incluyó factores de seguridad con el fin de asegurar la calidad del prototipo.



### 2.1.3. Selección de alternativas

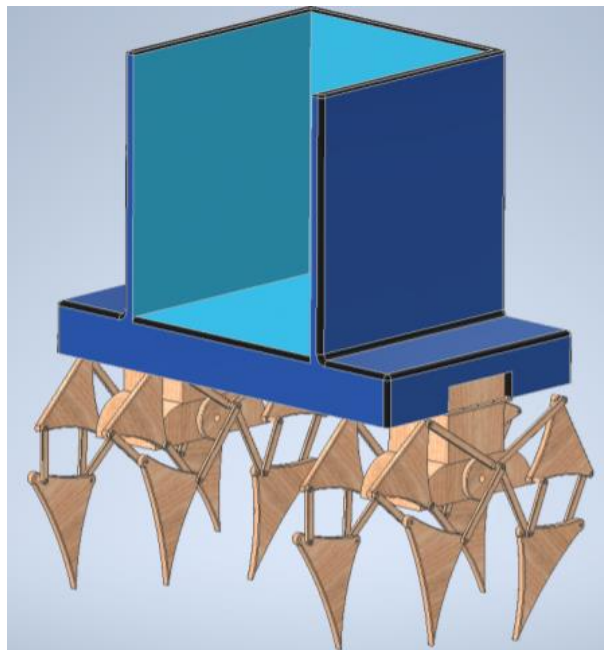
Se tomaron en cuenta ciertos materiales y configuraciones para los mecanismos, obtuvieron las siguientes alternativas:

- Alternativa 1: Prototipo de silla con mecanismo de Theo Jansen de 8 extremidades ubicadas debajo del asiento. Dos motores debajo del asiento conectados por bandas a las poleas de cada cigüeñal mueven cada conjunto, manteniendo al menos cuatro de sus extremidades tocando el suelo.
- La ventaja que cuenta esta alternativa es que permite realizar giros en ambas direcciones, su configuración es relativamente compacta en comparación con otras alternativas, mostrando el movimiento natural del mecanismo de Theo Jansen. Uno de los problemas que podría presentar es la altura que tiene el prototipo, al ubicar los conjuntos debajo de ella, necesita suficiente espacio para no obstruir el movimiento del mecanismo.



**Figura: 2.2: Alternativa 1**

- Alternativa 2: Prototipo de silla con mecanismo de Theo Jansen de 8 extremidades ubicadas a los lados. Un motor en el interior de cada bancada acoplado con engranes a un eje con extremos cilíndricos que hacen accionar al mecanismo, manteniendo al menos cuatro de sus extremidades tocando el suelo.
- La ventaja de esta alternativa es que oculta los motores dentro de la bancada, permitiendo ubicar cada conjunto debajo o a los lados del asiento. Puede realizar giros en ambas direcciones, sin embargo, necesita que la bancada tenga la geometría para colocar un motor dentro, haciendo que el prototipo sea demasiado robusto.



**Figura: 2.3: Alternativa 2**

- Alternativa 3: Prototipo de silla con mecanismo de Klann ubicado a los lados. Solo se necesitaría un motor y un conjunto de bandas con poleas que se conecten a los ejes que impulsan cada extremidad.
- Este mecanismo funciona diferente al de Theo Jansen, la forma que describe la punta de cada pie tiene menor región donde es recta. La ventaja de este mecanismo es que solo se necesitaría un motor para su funcionamiento. Sin embargo, el motor a utilizar necesita tener más

potencia en comparación a las demás alternativas, lo que también significa que no puede realizar giros.



**Figura: 2.4: Alternativa 3**

Conociendo las alternativas disponibles y los factores que influyen en la selección se calificaron dichas opciones, como se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2: Tabla de selección para calificación (1-5).**

Factor de diseño	Costo	Facilidad de fabricación	Movilidad	Resistencia
Ponderación	28 %	23 %	29 %	20 %
Alternativa 1	3	4	5	4
Alternativa 2	5	3	4	3
Alternativa 3	3	4	3	2

Se utilizó la ponderación establecida en factores de diseño para obtener una calificación final a cada alternativa. En la Tabla 2.3, se muestran los resultados y se resalta la alternativa ganadora.

**Tabla 2.3: Tabla de selección para resultados.**

Alternativa	Clasificación
<b>Alternativa 1</b>	<b>3.86</b>
Alternativa 2	3.73
Alternativa 3	2.92

Se definió la alternativa ganadora como se muestra en la Tabla 2.3, el prototipo de silla con mecanismo de Theo Jansen de 8 extremidades ubicadas debajo de la silla. Se trabajó a detalle en el diseño de sus partes y la selección de sus componentes, permitiendo hacer un estimado de sus costos con mayor exactitud.

## **2.2. Diseño detallado**

En la siguiente sección se realizó el diseño detallado de las partes del prototipo para la obtención de datos para la estimación de costos final y planos. Además de mostrar cómo se realizaron las simulaciones dinámicas y estáticas a manera de cálculos para la obtención de resultados.

### **2.2.1. Dimensionamiento de las características del motor**

Las características principales que definen un motor son la velocidad angular y la potencia que este es capaz de entregar, debido al tamaño del prototipo se requirió RPM relativamente bajas, siendo necesario calcular la relación de reducción de la transmisión de potencia. Para el cálculo de dicha reducción, es necesario determinar la velocidad nominal del diseño a escala natural, y por reglas de semejanza encontrar la velocidad objetivo del prototipo.

La velocidad objetivo de una silla de ruedas a escala real es de aproximadamente  $5 \frac{km}{h}$  (Cheein, De la Cruz, Carelli, y Bastos Filho, 2011), haciendo la conversión usando la ecuación (2.1) para el prototipo se obtiene una velocidad de  $1.1 \frac{km}{h}$  lo que equivale a  $3.6 \frac{cm}{s}$ .

$$\dot{X}_p = X_r \times A \tag{2.1}$$

$$\dot{X}_p = 5 \frac{km}{h} \times 22\% = 1.1 \frac{km}{h} \quad (2.2)$$

$$\dot{X}_p = 1.1 \frac{km}{h} \times \frac{1h}{3600s} \times \frac{100000 cm}{1 km} \quad (2.3)$$

$$\dot{X}_p = 3.6 \frac{cm}{s} \quad (2.4)$$

Siendo  $X_p$  la velocidad el prototipo,  $X_r$  la velocidad real y  $A$  la escala del prototipo. Se determinó la velocidad angular que el motor debe entregar usando la ecuación (2.2) a partir de cuanto se desplaza el mecanismo por cada vuelta, 110 mm por vuelta, por lo que la velocidad angular requerida para satisfacer los objetivos de diseño fue de  $166.91 \frac{rev}{min}$ .

$$\omega_p = \frac{\dot{X}_p}{X_a} \quad (2.5)$$

$$\omega_p = \frac{36.6 \frac{cm}{s}}{11 \frac{cm}{rev}} = 2.78 \frac{rev}{s} \quad (2.6)$$

$$\omega_p = 2.78 \frac{rev}{s} \times \frac{60s}{1 min} \quad (2.7)$$

$$\omega_p = 166.91 \frac{rev}{min} \quad (2.8)$$

Siendo  $\dot{X}_p$  la velocidad del prototipo y  $X_a$  el desplazamiento por revolución del prototipo.

Finalmente, para la determinación de la potencia del motor, debido a que se trata de la construcción del modelo de un prototipo, la potencia del motor será

sobredimensionada puesto que no tiene mayor relevancia si el motor tiene un torque más alto del necesario, lo que si es importante, para el análisis del prototipo, es su velocidad angular que deberá ser de  $166.91 \frac{rev}{min}$ , en cualquier caso la ecuación para determinar la potencia necesaria es la siguiente.

$$P = \tau\omega$$

(2.9)



**Figura: 2.5: Motor Nema 17**

Siendo  $P$  la potencia necesaria,  $\tau$  el torque necesario y  $\omega$  la velocidad angular.

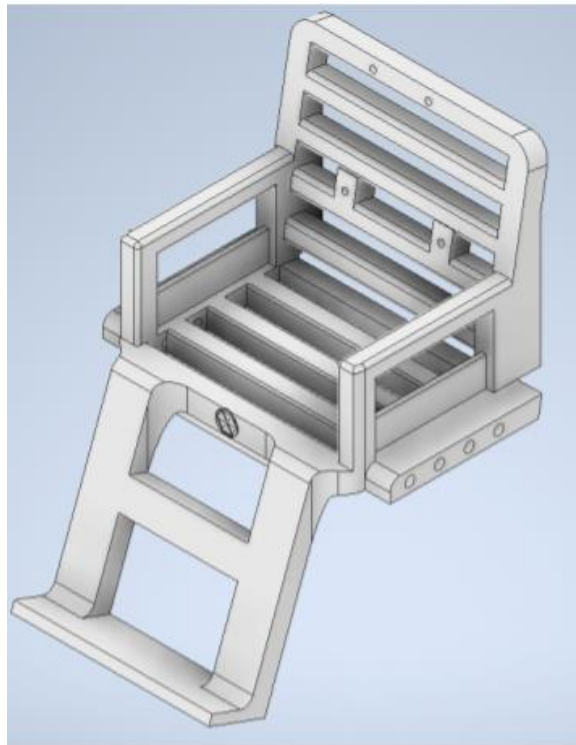
### **2.2.2. Diseño de la silla**

Una de las primeras cosas que se definió fueron las dimensiones del asiento, debido a que fueron un limitante de espacio para la ubicación de los motores y el controlador en el prototipo.

A pesar de ello se debió escalar las dimensiones del asiento de una silla de ruedas tradicional, las cuales se encontraron en normas como un rango de dimensiones estándar, además de la inclinación del espaldar con el fin de proporcionar apoyo suficiente y evitar que la persona se incline hacia delante.

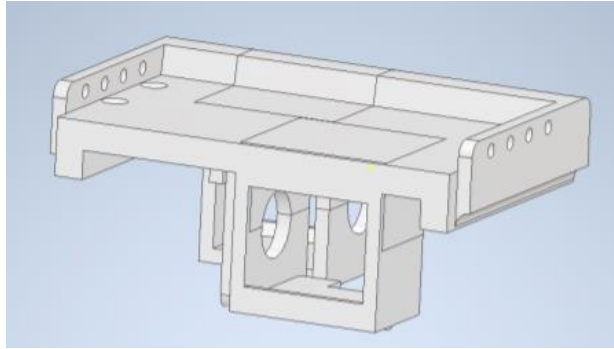
El tamaño esperado del prototipo fue alrededor de veinte centímetros por lo que se trabaja con dimensiones del 22 % de su tamaño real, aproximadamente.

La base del asiento tiene alrededor de 120 milímetros de ancho y 98.5 milímetros de profundidad, mientras que el espaldar se encontró a 80° de la horizontal con una altura de 98 milímetros. Se consideró los soportes para brazos, refuerzos en el espaldar y soportes inclinados con nervios para las piernas de forma que no exista interferencia con el movimiento del mecanismo. En la imagen Figura: 2.6 se incluyen los puntos que permiten tanto la unión de la silla con la base del asiento como con el Arduino.



**Figura: 2.6: Asiento del prototipo**

Lo siguiente que se definió fue la base sobre la que se apoya el asiento, la cual sirve como conexión entre el asiento y las extremidades encargadas del movimiento. Además de servir como apoyo de la polea de los mecanismos y albergar los motores que los impulsan.



**Figura: 2.7: Base el asiento**

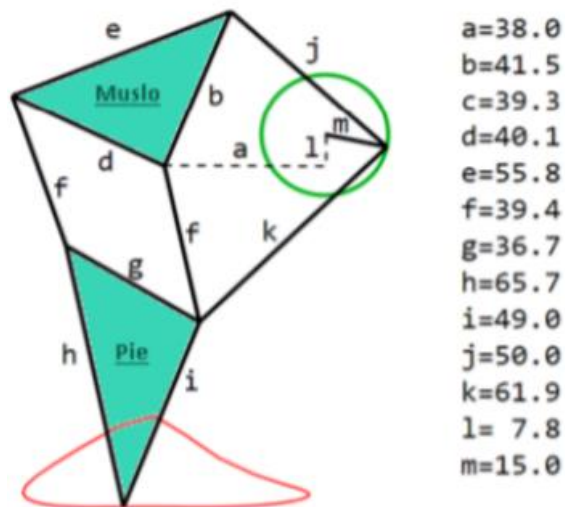
En la imagen Figura: 2.7 se muestra la base del asiento, cuenta con un tope que asegura la alineación para asegurar la silla, además de ver donde se colocan los motores y la ubicación de las poleas del mecanismo. En total tiene 130 milímetros de ancho y 100 milímetros de profundidad.

Los datos obtenidos de las simulaciones se muestran en resultados, con los cambios finales que sean requeridos para el correcto funcionamiento del prototipo, mientras que los planos son presentados en la sección de anexos.

### **2.2.3. Diseño del mecanismo de Theo Jansen**

El mecanismo de Theo Jansen tiene lo que Jansen denomina números mágicos, los cuales fueron obtenidos utilizando algoritmos en programas matemáticos con el fin de mantener la altura de la cadera del mecanismo constante, por lo que se concluyó que sus dimensiones necesitan mantener dichas relaciones. Es por esto que, al diseñar un prototipo a escala, se utilizaron dichos valores como base con el fin de mantener la naturaleza del movimiento como se muestra en la Figura: 2.8, se emplearon dichos números para establecer una relación entre sus magnitudes.





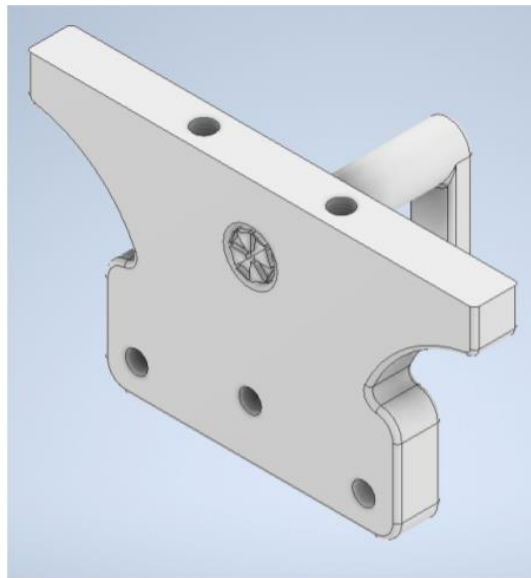
**Figura: 2.8: Trece números mágicos del mecanismo de Theo Jansen obtenidos por computadora. (Onieva y cols., 2019)**

**Tabla 2.4: Escalas del mecanismo**

Eslabón	Escala aproximada en función de a	Magnitud [mm]
a	1	25.33
b	1.09	27.67
c	1.03	26.20
d	1.06	26.73
e	1.47	37.20
f	1.04	26.27
g	0.97	24.47
h	1.73	43.80
i	1.26	32.67
j	1.32	33.33
k	1.63	41.47
l	0.21	5.2
m	0.39	10.00

Se utilizaron los valores de la Tabla 2.4 como las medidas del esqueleto del prototipo. Para poder obtener los eslabones o piezas del mecanismo, primero se dibujó el esqueleto de este, asegurando los puntos donde se conectan con los demás y generando el cuerpo de este alrededor de su esqueleto.

Para ello se empezó con la bancada, utilizando la distancia entre las caderas del mecanismo, por lo que se puede definir el tamaño de la bancada. Teniendo horizontalmente 25.33 milímetros y verticalmente 5.20 milímetros, entre el punto pivotante de cada cadera y el centro de la bancada.

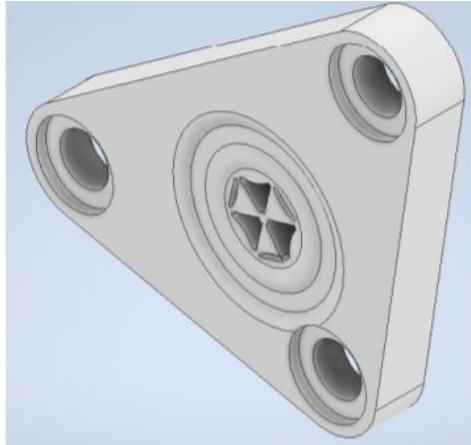


**Figura: 2.9: Bancada del mecanismo.**

La bancada mostrada en la Figura: 2.9 se dimensionó de tal forma que al colocarse debajo de la base del asiento no exista algún tipo de colisión entre la base y los eslabones en movimiento.

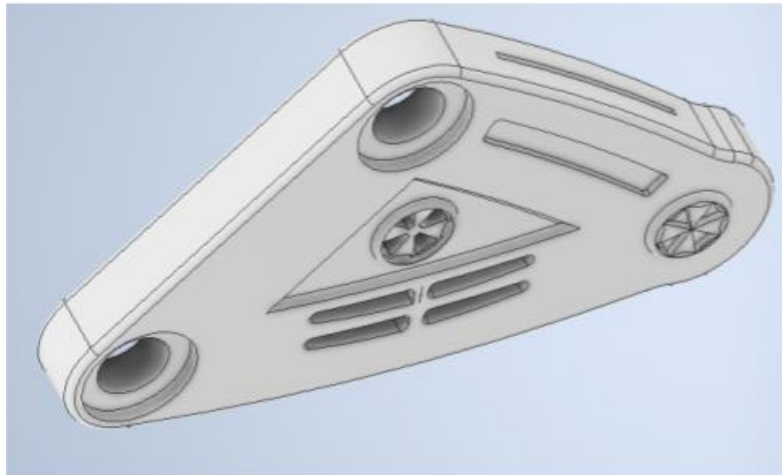
Pese a que se consideró reducir dimensiones en la bancada para disminuir la cantidad de material utilizado, se tomó en cuenta la conexión entre la bancada y la base del asiento, por lo que se mantuvieron las medidas establecidas inicialmente. El cigüeñal forma parte tanto del mecanismo como del sistema motriz teniendo la magnitud  $m$  de la Tabla 2.4, por lo que su análisis se realizó en la siguiente sección.

La cadera del mecanismo contiene las dimensiones  $b$ ,  $d$ ,  $e$  de la Tabla 2.4, mostrada en la Figura: 2.10 cuenta con topes que limitan la ubicación de los pasadores con anillos.



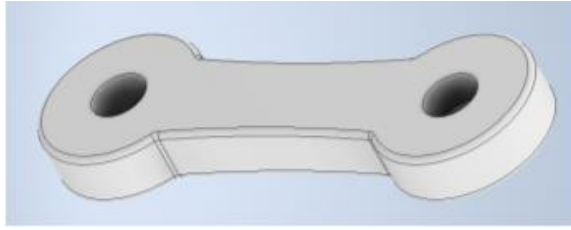
**Figura: 2.10: Cadera del mecanismo**

La Figura: 2.11 muestra el pie del mecanismo, el cual contiene las dimensiones g, h, i de la Tabla 2.4, respetando el punto donde se encuentran h e i que es el punto que entra en contacto con el suelo.



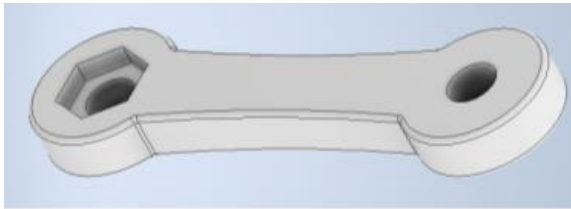
**Figura: 2.11: Pie del mecanismo**

La Figura: 2.12 muestra el eslabón que conecta el punto superior de la cadera y el cigüeñal del mecanismo, el cual contiene la dimensión j de la Tabla 2.4.



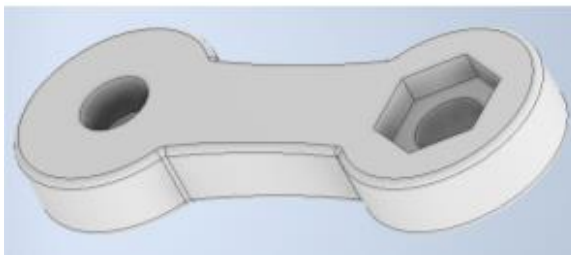
**Figura: 2.12: Eslabón que conecta la cadera con la bancada a través del cigüeñal**

La Figura: 2.13 muestra el eslabón que conecta el punto superior interno del pie y el cigüeñal del mecanismo, el cual contiene la dimensión  $k$  de la Tabla 2.4.



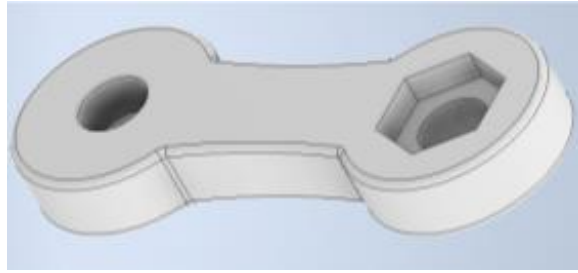
**Figura: 2.13: Eslabón que conecta el pie con la bancada a través del cigüeñal**

La Figura: 2.14 muestra el eslabón que conecta el punto exterior de la cadera y el punto exterior del pie, el cual contiene la dimensión  $f$  de la Tabla 2.4.



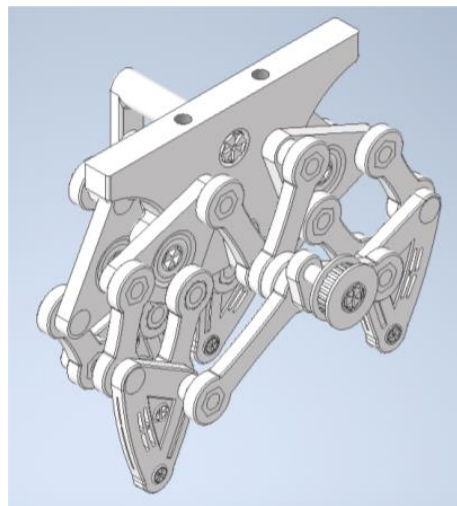
**Figura: 2.14: Eslabón que conecta el pie con la cadera en la parte exterior del mecanismo**

La Figura: 2.15 muestra el eslabón que conecta el punto inferior de la cadera y el punto interior del pie, el cual contiene la dimensión  $c$  de la Tabla 2.4.



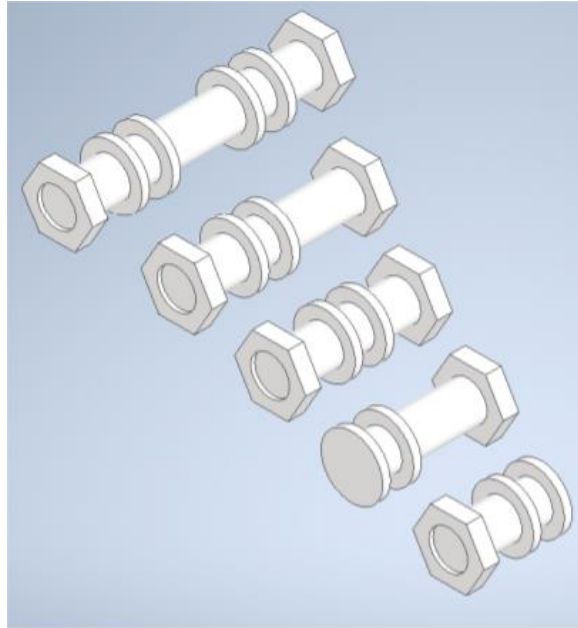
**Figura: 2.15: Eslabón que conecta el pie con la cadera en la parte interior del mecanismo**

En la Figura: 2.16 se muestra el mecanismo armado con las dimensiones del esqueleto pertenecientes a la Tabla 2.4 con nuestra escala. También se muestra cómo se conectaron los eslabones mencionados anteriormente.



**Figura: 2.16: Mecanismo armado**

Otra de las partes que se consideraron fueron los pasadores que unen los eslabones mostrados en la Figura: 2.17, En ella se muestran los distintos pasadores que se utilizaron para conectar los eslabones, junto a la ubicación de las argollas que limitan la ubicación de las caderas y piernas de mecanismo, que incluyen longitudes de 10, 15, 20 y 30 milímetros.



**Figura: 2.17: Pasadores de unión entre eslabones**

#### **2.2.4. Análisis del mecanismo**

Fue necesario realizar un análisis dinámico para poder determinar las posiciones en que cada pieza es sometida a su carga crítica, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del mecanismo, así como sus factores de seguridad y el torque necesario para accionar el mecanismo.

Para ello fue necesario la creación de una pieza que se desempeñe como suelo, el cual fue fijado de forma absoluta, luego se ubicó el mecanismo sobre dicha pieza definiendo las interacciones necesarias para la simulación. Estas interacciones son los parámetros de la simulación dinámica que aseguran la semejanza con la realidad.

Una vez se definieron dichos parámetros, se esperó el tiempo requerido por el programa para la obtención de resultados sobre los esfuerzos y deformaciones a los que son sometidos. Una vez obtenidos las posiciones más críticas para cada elemento, se exportaron sus cargas, se analizó estáticamente y se determinó la pieza más débil del mecanismo. Esto fue realizado a través del software Autodesk Inventor.

### 2.2.5. Parámetros de simulación dinámica

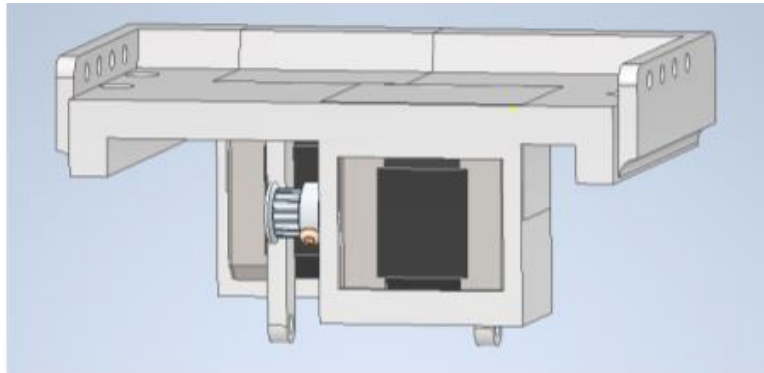
Los parámetros de simulación se refieren a las variables físicas necesarias para obtener un modelo muy aproximado a la realidad, de modo que la simulación dinámica sea útil. En esta ocasión se fijó la plataforma en el espacio, al igual que la gravedad, el único parámetro importante con respecto a la plataforma son sus dimensiones y la fricción entre el mecanismo y la plataforma.

La primera carga que se colocó fueron las que en conjunto representan el peso de la silla con su ocupante y componentes, sumando esas cargas se obtuvo una carga distribuida de  $10\text{ N}$  sobre la bancada, se añadió una rotación de  $166.91 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$  en el cigüeñal, y finalmente se agregó una unión de contacto 3D entre los pies del mecanismo y el piso establecido. Fue importante revisar que la única pieza fija sea el piso y que el mecanismo solo tenga un grado de libertad de rotación en el cigüeñal y caída libre en el eje que corresponde a la gravedad. Por último, se configuró la fricción entre el piso y los pies, el cual debe ser igual a 1, es decir, sin deslizamiento de ningún tipo.

El tiempo de simulación mínima corresponde al que le permita dar una sola vuelta al cigüeñal, el cual equivale a  $33\text{ s}$  pero debido a que se presentaron picos aberrantes al inicio de la simulación, se agregó un poco más de tiempo para obtener una vuelta que de información útil, por lo que se configuró la simulación para  $0.4\text{ s}$ , de esta manera se revisó las variables que arrojó la simulación para determinar los tiempos en donde las reacciones son críticas en cada uno de los eslabones, obteniendo gráficos e imágenes a ser interpretadas en resultados.

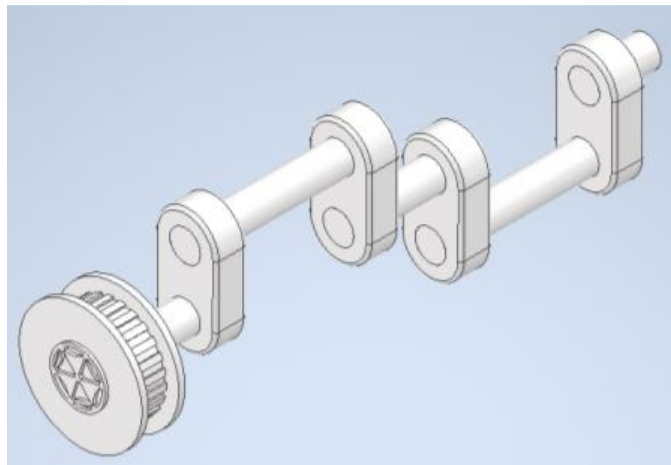
### 2.2.6. Diseño del sistema motriz

El sistema motriz del prototipo cuenta con dos partes principales, los cigüeñales que son impulsados a moverse por los motores a través de poleas y bandas, y los motores que inician el movimiento. Estos últimos fueron ubicados debajo de la base para el asiento como se muestra en la Figura: 2.18.



**Figura: 2.18: Motores del mecanismo**

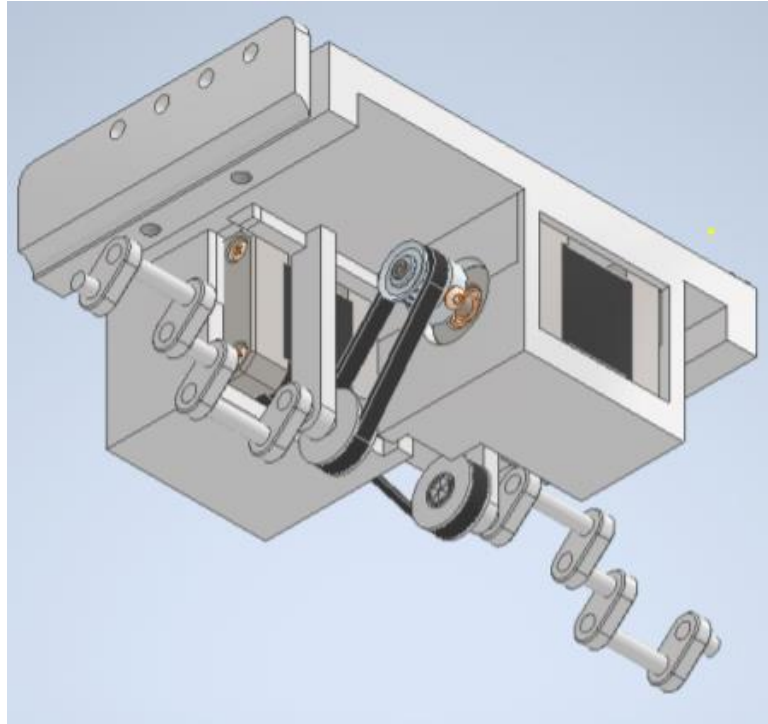
Dentro del sistema motriz del prototipo, se ubicaron los motores debajo del asiento y se conectaron con el cigüeñal mediante poleas.



**Figura: 2.19: Cigüeñal del mecanismo**

En la Figura: 2.19 se muestra el cigüeñal del mecanismo con la polea que va conectada al motor con ayuda de una banda. El cigüeñal contiene la dimensión  $m$  de la Tabla 2.4, se apoya principalmente sobre la bancada del mecanismo, pero tiene un soporte que la conecta a la base del asiento, como se muestra en la Figura: 2.20.



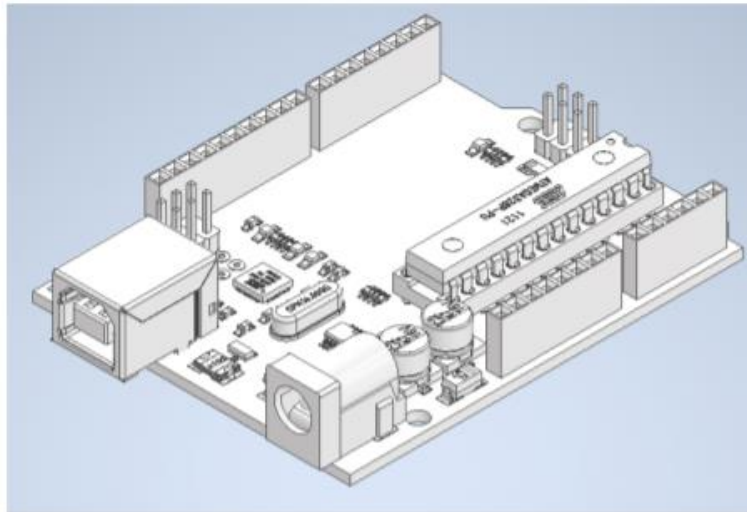


**Figura: 2.20: Sistema motriz del mecanismo**

La potencia necesaria para impulsar cada mecanismo se sigue definiendo con la ecuación (2.9).

### **2.2.7. Diseño del sistema de control**

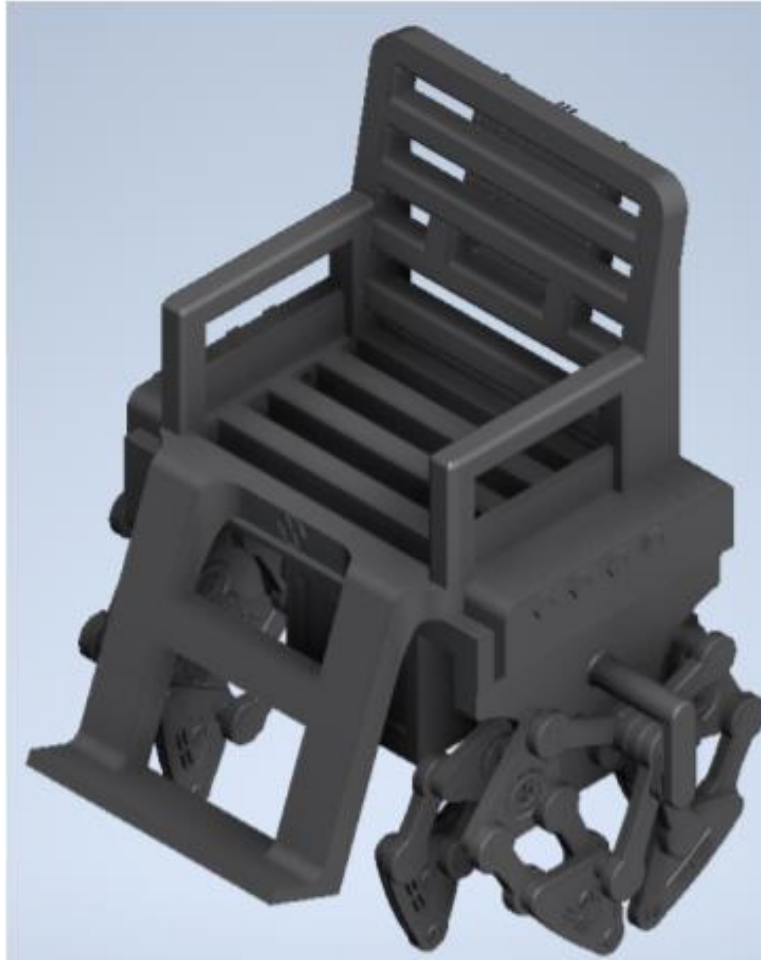
En el sistema de control se planteó la utilización de un microprocesador conocido como Arduino, el cual se conectó a los motores para controlar la dirección del giro con ayuda de un puente H (L293D). Esta placa se ubicó en el espaldar del asiento del prototipo, se planteó un código que permite realizar un recorrido de prueba previamente establecido que contiene tanto trayectorias rectas como giros en la plataforma Arduino IDE.



**Figura: 2.21: Modelo 3D del Arduino UNO**

### **2.3. Fabricación de componentes**

La impresión de los componentes en 3D utiliza filamento de plástico ABS se planteó con el fin de facilitar la construcción del prototipo al obtener las piezas con la geometría y las dimensiones establecidas durante el diseño. Este tipo de manufactura aditiva permite que se pueda obtener las piezas necesarias para la construcción del prototipo en un tiempo relativamente corto, el cual depende de la complejidad de estas, además de permitir que el prototipo tenga un acabado más estético como se muestra en la Figura: 2.22: **Prototipo impreso con ABS. (Referencial)**



**Figura: 2.22: Prototipo impreso con ABS. (Referencial)**

La impresión de las piezas se realizó por partes, teniendo que dividir la silla y la bancada, con el fin de disminuir el número de soportes, lo cual no se realizó con la base del asiento. Para los elementos del mecanismo se realizaron ensambles que permitan imprimir varios elementos al mismo tiempo, para ello se aseguró la separación entre las piezas y restringió la altura para que se ubiquen sobre una misma superficie.

Luego se separaron las piezas de los soportes generados, luego se utilizaron lijas para disminuir las irregularidades en las superficies que fueron posibles. Se armó primero el asiento y se constató la cantidad de piezas y se armó el mecanismo respetando la ubicación establecida en el modelo.

## **2.4. Estimación de costos**

El mayor costo de la impresión 3D radica en el tiempo que se dedica a ello, la materia prima y luego los demás recursos que involucra la impresión.

Tomando esto en cuenta se estableció el material a utilizar, el cual es alrededor de 1 kg de plástico ABS, se utilizó aproximadamente la misma cantidad para la generación de soportes, por lo que se utilizaron 2 kg en total como materia prima.

El tiempo que se utilizó para la impresión de dichas partes y de algunos repuestos fue aproximadamente 10 días, incluyendo fines de semana. Se incluyó el precio de los componentes utilizados para el prototipo, además de un aproximado de las licencias del software empleado y el tiempo de diseño requerido.

# CAPÍTULO 3

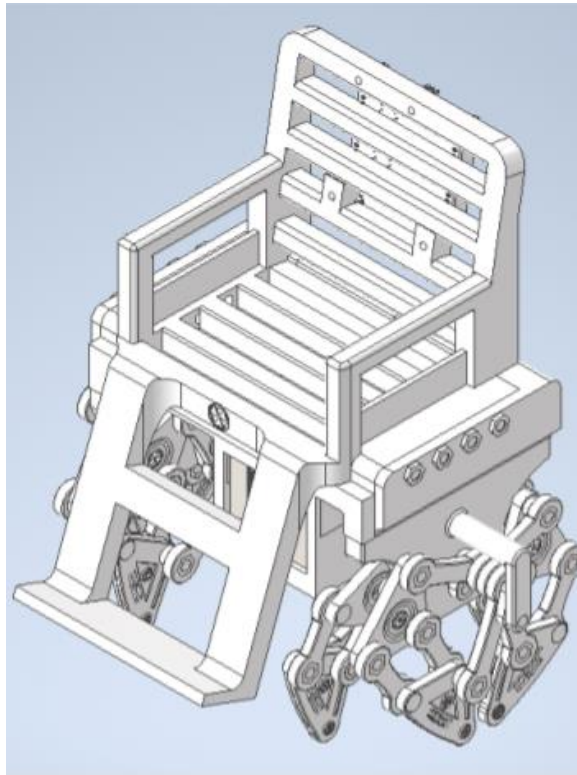
## 3. RESULTADOS

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos con el análisis dinámico del mecanismo implementado, ya que es de vital importancia entender los esfuerzos, deformaciones, factores de seguridad y reacciones que se dan en cada eslabón de este, al igual que la relación que exhiben las diferentes variables que definen el sistema, cabe recalcar que todos los estudios y simulaciones fueron hechos en el software Autodesk Inventor.

Este análisis constó de 2 etapas de simulación, una parte dinámica en donde se establecieron todos los parámetros físicos que definen el sistema para obtener cómo se comportan las diferentes reacciones de cada eslabón en el tiempo. En la segunda etapa, a partir de los gráficos obtenidos, se obtuvieron los tiempos en donde el sistema es crítico para cada uno de los eslabones, cabe recalcar que cada eslabón tiene su propio punto crítico en el tiempo en donde los esfuerzos en el mismo son máximos, con las reacciones críticas obtenidas realizó un análisis estático de cada eslabón para obtener su comportamiento mecánico.

### 3.1. Alternativa ganadora

La alternativa que resultó ganadora se muestra en la Figura: 3.1 la cual se trata de un prototipo con dos motores ubicados debajo del asiento conectados a los mecanismos por medio de poleas permitiendo avanzar, retroceder y girar según sea requerido, mientras es controlado por el dispositivo ubicado en el espaldar.



**Figura: 3.1: Alternativa ganadora**

### **3.2. Diseño detallado**

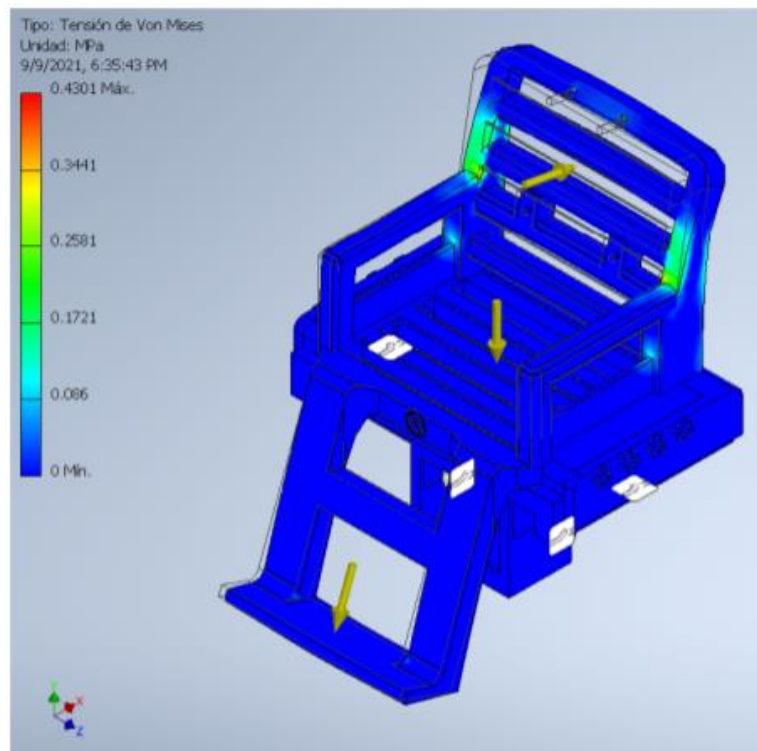
Se definió una carga de prueba, la cual se presenta como un equivalente a la carga real. Para ello se compara la resistencia a la tracción del acero inoxidable 304 (540-750 MPa) y la del plástico ABS (41-45 MPa), lo cual correspondería aproximadamente al 8 %.

Conociendo que el prototipo representa el 22 % de la silla a tamaño real se obtuvo un equivalente para la carga de prueba, tomando en cuenta que las sillas de ruedas tradicionales están diseñadas para una persona que tiene entre 50 y 75 Kg, por lo que se utilizó 60 Kg para obtener 1.056 Kg (10.35 N) como carga de prueba.

Con dicha carga de prueba que representa la carga de una persona, se puede realizar un análisis de elementos finitos debido a la geometría de las piezas. Tomando en cuenta el peso del prototipo, la carga que se utilizó fue de 2.025 Kg (19.85 N).

### 3.2.1. Silla y base del asiento

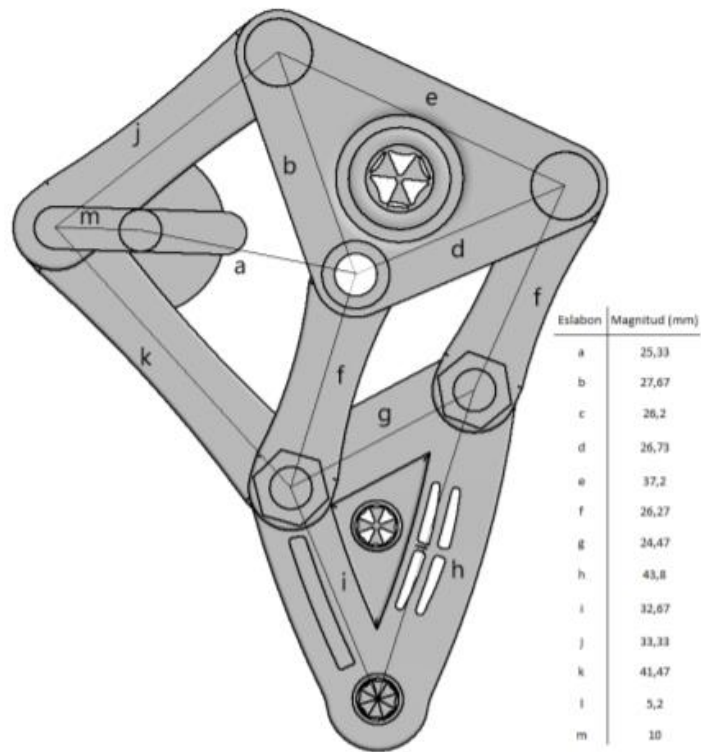
Se aplicó la carga de prueba sobre la silla, de forma que se pueda observar lo que sucedió con la zona del asiento, aplicando el 60 % en el asiento, el 30 % en el espaldar y el 10 % en el apoyo para piernas mientras se mantuvieron fijos los puntos de conexión con el mecanismo, obteniendo la Figura: 3.2: **Silla sobre la base con carga de diseño.**



**Figura: 3.2: Silla sobre la base con carga de diseño**

### 3.2.2. Análisis dinámico del Mecanismo Theo Jansen

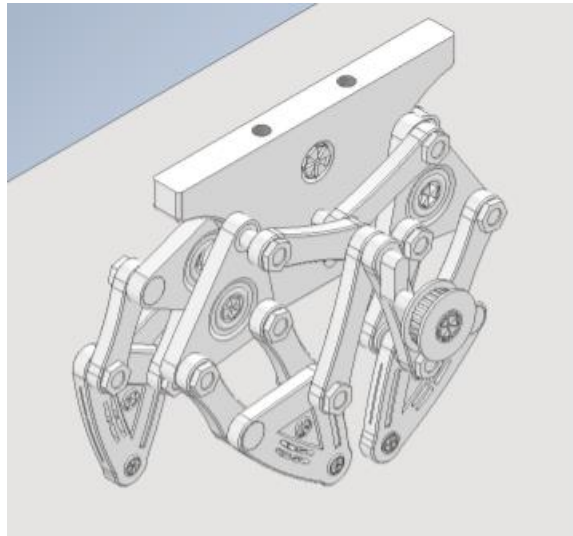
El resultado final de los eslabones que conforman cada una de las extremidades del proyecto, se muestra a continuación con sus respectivas dimensiones, las cuales fueron obtenidas a partir de las proporciones del mecanismo diseñado por Theo Jansen.



**Figura: 3.3: Extremidad del mecanismo implementado**

Para estudiar el mecanismo y dimensionar el sistema físico como tal, primero se definió las piezas claves que se necesitan analizar y las simetrías que permitieron simplificar el sistema, debido a que existen dos mecanismos idénticos con motores independientes, se seleccionó la bancada de una de las extremidades con sus respectivas piezas como se muestra a continuación.



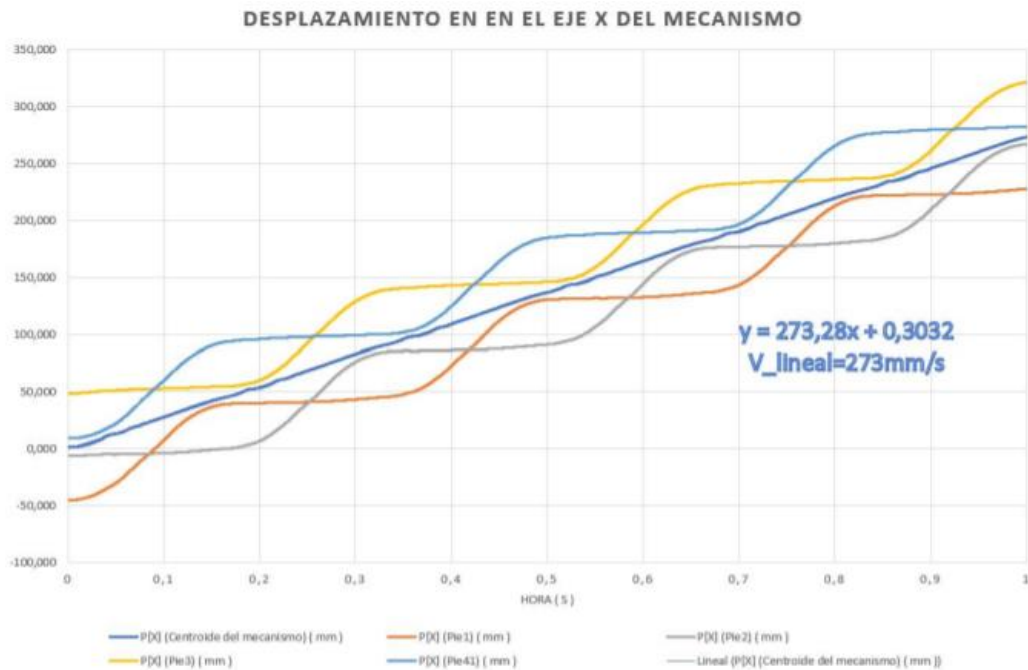


**Figura: 3.4: Objeto de estudio dinámico**

Como podemos observar en la Figura: 3.4, también se colocó una plancha que simula el piso en donde el mecanismo se desenvuelve. Esta selección resultó apropiada ya que es el mínimo conjunto necesario para obtener los esfuerzos en cada uno de los eslabones, los cuales son elementos críticos y los más propensos a fallar, también es importante notar que el resto de los elementos se pueden representar como cargas sobre la bancada, tomando en cuenta que existe un reflejo del mismo sosteniendo la misma carga, por lo que tendremos que dividir la carga para dos, por lo que se ubicó  $10N$  en la superficie superior de la bancada.

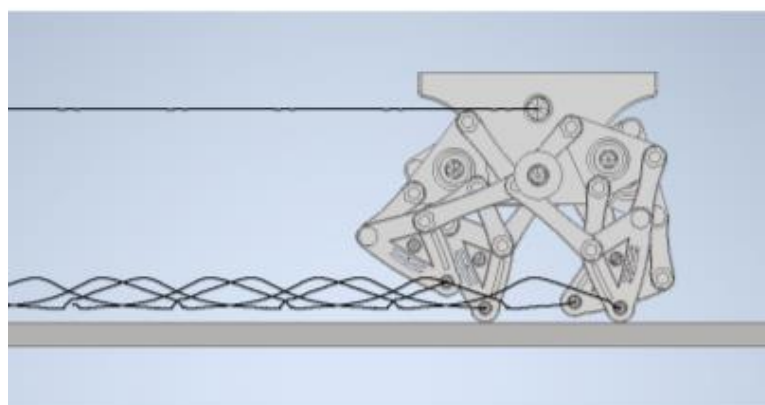
### **3.2.3. Velocidad lineal del mecanismo**

Dado que se simuló la forma en que el mecanismo se desplaza a lo largo de una superficie, se obtuvo la relación entre la posición del centroide y el tiempo, así como el desplazamiento de cada extremidad en función del tiempo, obteniendo el siguiente gráfico.



**Figura: 3.5: Desplazamiento en el eje x con respecto al tiempo**

Como podemos observar en la Figura: 3.5 ,la velocidad lineal del mecanismo corresponde a  $27 \frac{cm}{s}$  La siguiente figura representa el recorrido en el tiempo, el cual se simuló durante un segundo para obtener un mejor detalle de la naturaleza del desplazamiento del mecanismo.



**Figura: 3.6: Recorrido del mecanismo en el eje de desplazamiento con respecto al tiempo**

### 3.2.4. Resultados de análisis dinámicos: Bancada

A diferencia de los eslabones del mecanismo en sí mismo, donde los momentos no fueron significativos para determinar los tiempos críticos del sistema, la bancada y el cigüeñal necesitaron un análisis de reacciones y momentos. El primer elemento analizado fue la bancada, cuyos resultados de reacciones y momentos en el tiempo son los siguientes.

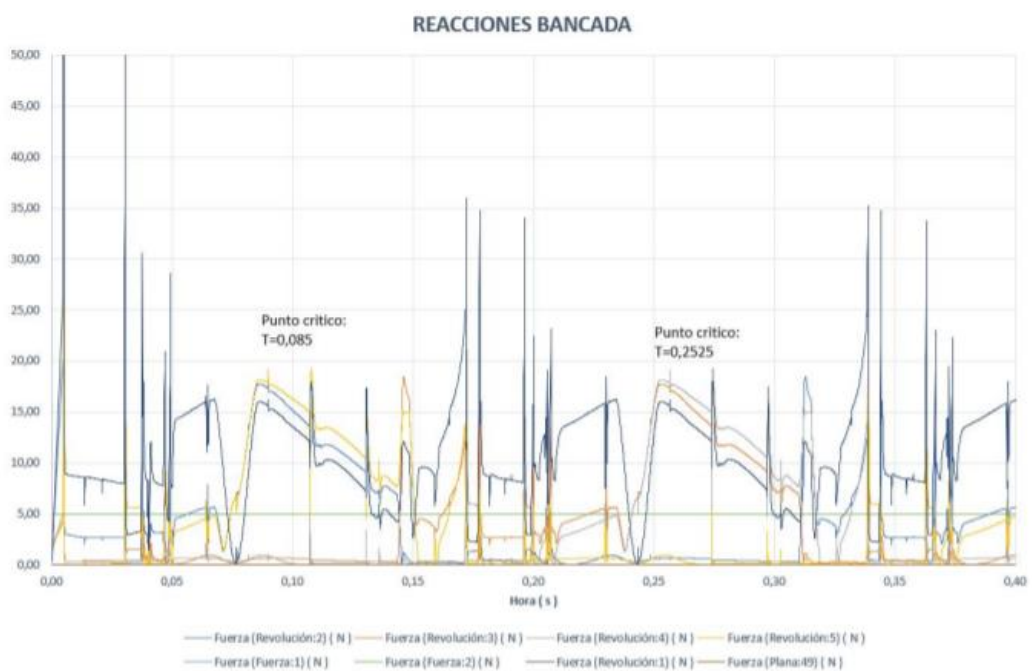
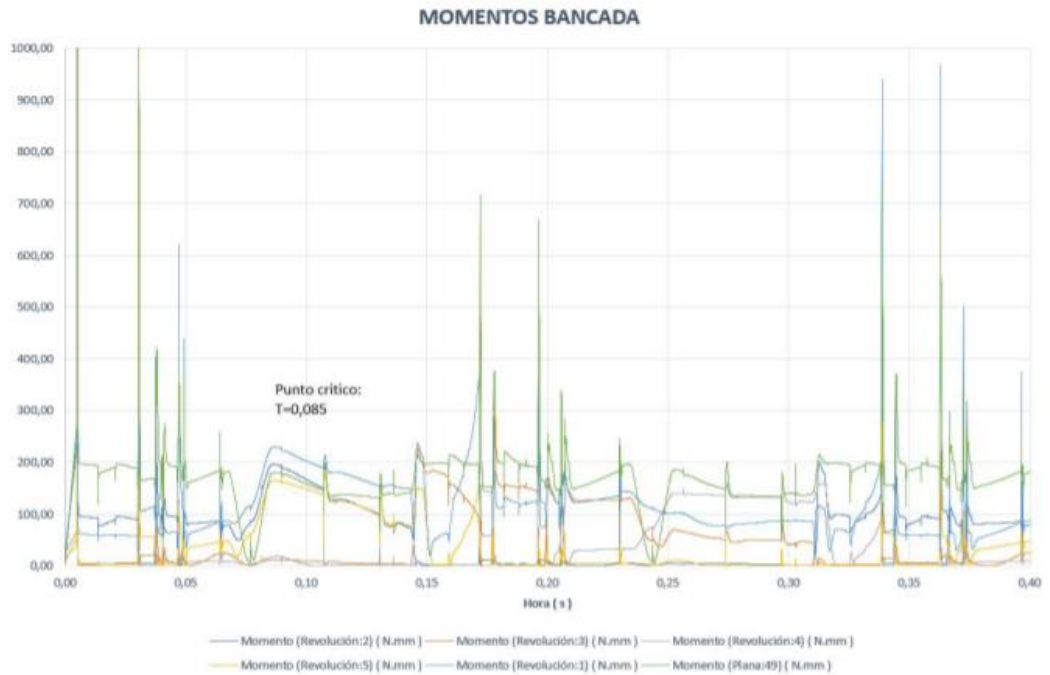
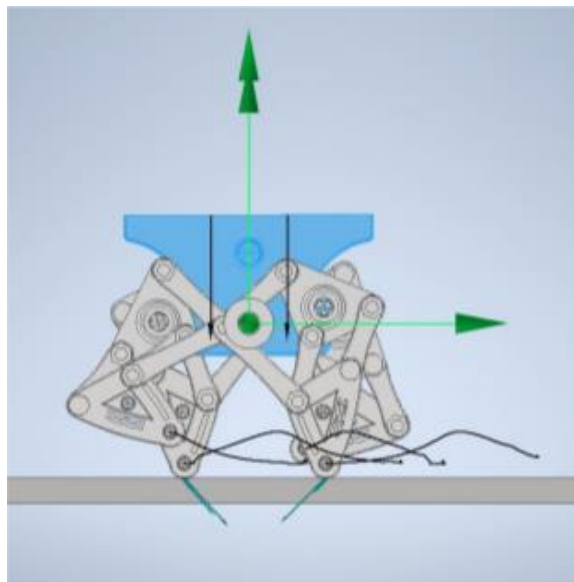


Figura: 3.7: Cargas en la bancada en función del tiempo



**Figura: 3.8: Momentos en la bancada en función del tiempo**

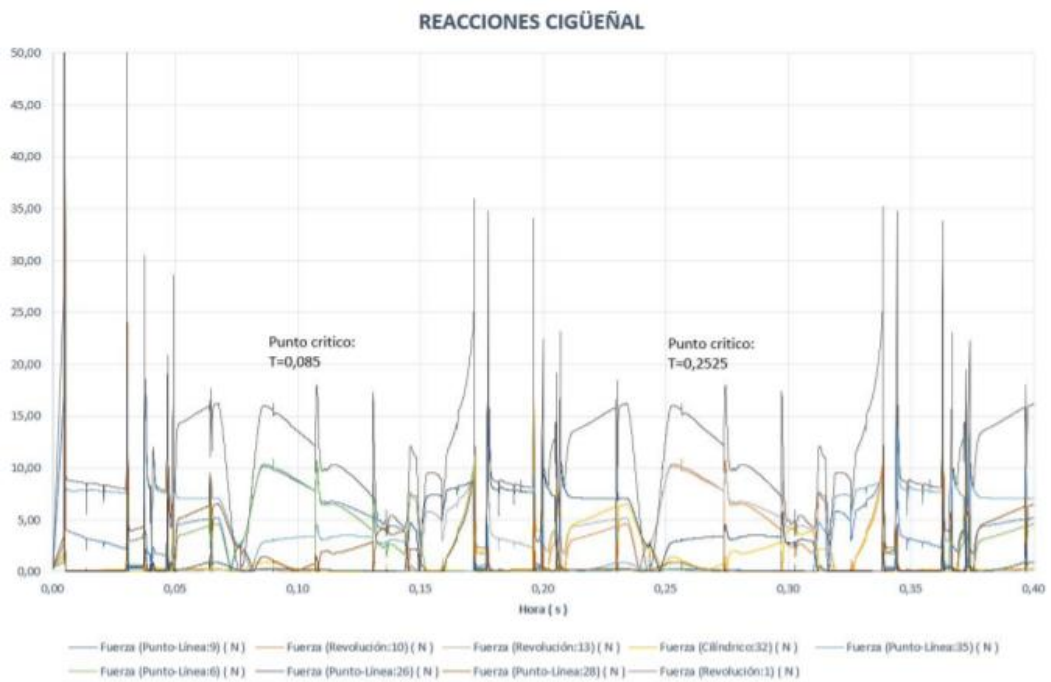
Como podemos observar en los Figura: 3.7 y Figura: 3.8 se obtuvo que el tiempo crítico corresponde a 0.085 s el cual corresponde a la siguiente posición.



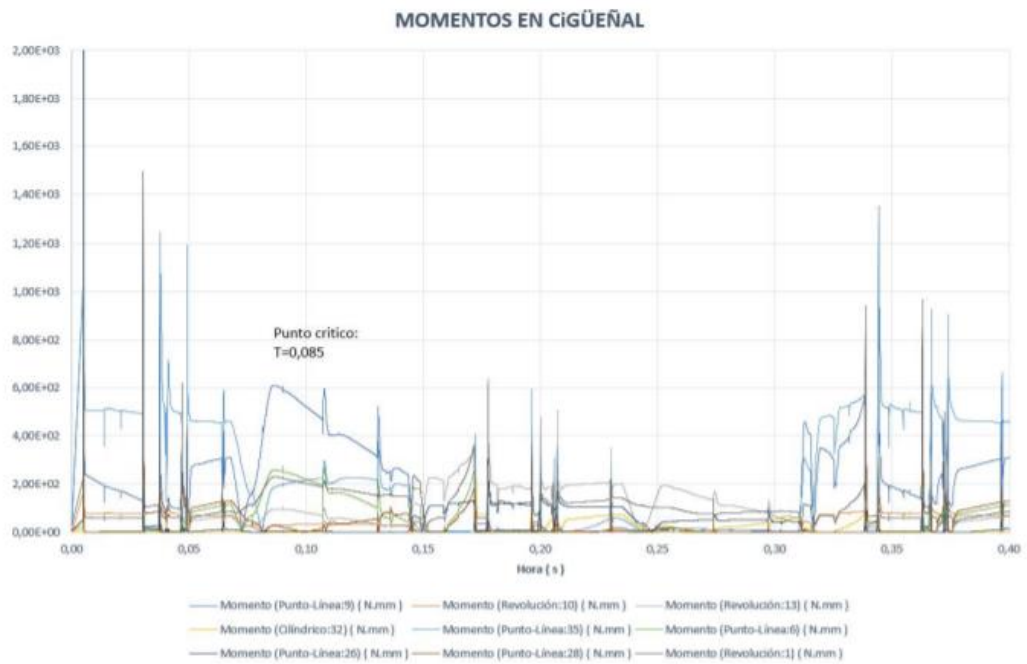
**Figura: 3.9: Posición de la bancada en Tc=0.085**

### 3.2.5. Resultados de análisis dinámicos: Cigüeñal

Al igual que la bancada el cigüeñal tiene importantes componentes tanto en sus momentos como en las reacciones, por lo que fue necesario analizar ambos para determinar el tiempo donde las reacciones resultaron máximas en el cigüeñal.

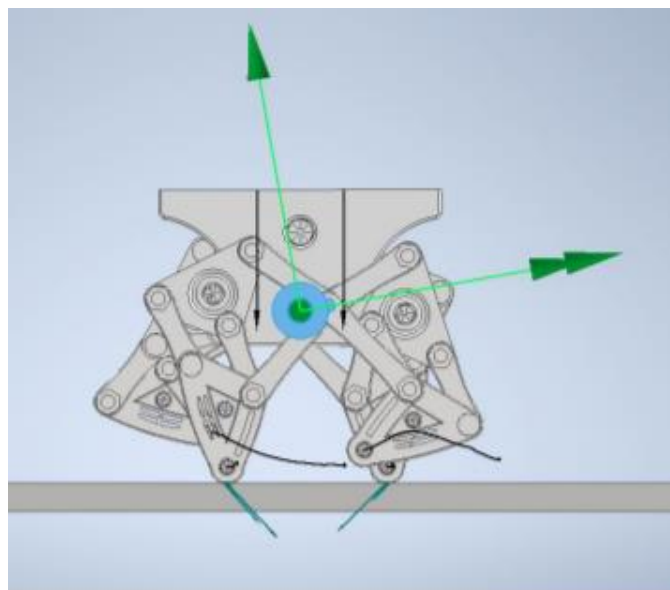


**Figura: 3.10: Cargas en el cigüeñal en función del tiempo**



**Figura: 3.11: Momentos en el cigüeñal en función del tiempo**

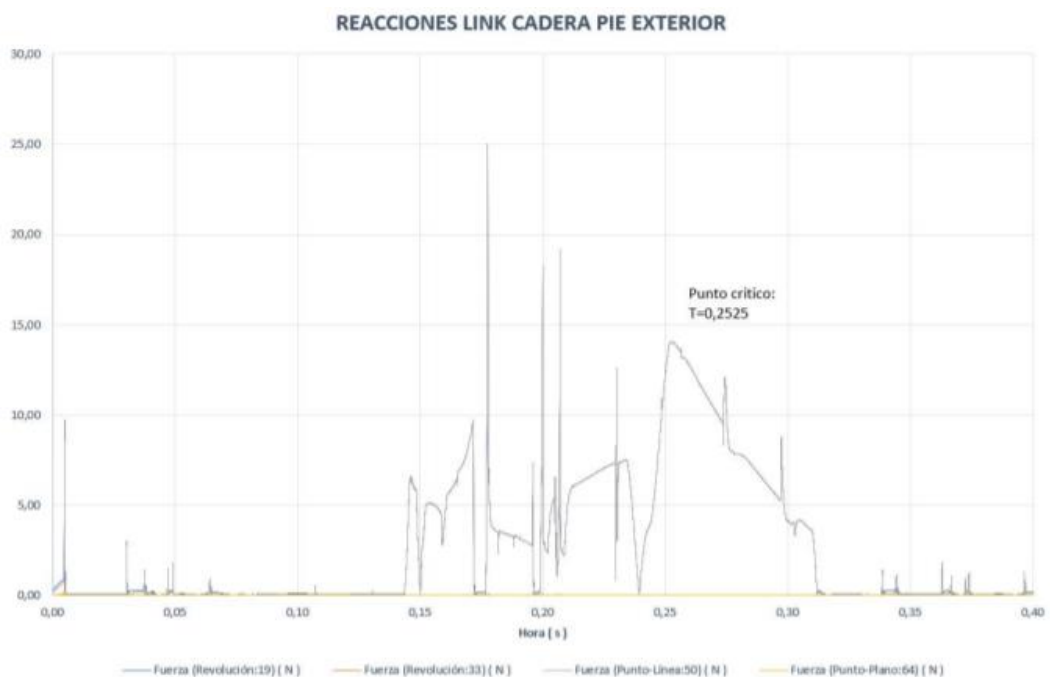
Como podemos observar en la Figura: 3.10 y Figura: 3.11 se obtuvo que el tiempo crítico corresponde a 0.085 s el cual corresponde a la siguiente posición.



**Figura: 3.12: Posición del cigüeñal en  $T_c=0.085$**

### 3.2.6. Resultados de análisis dinámico: Eslabón cadera pie exterior

Los gráficos mostrados a continuación corresponden a las cargas ya que los momentos resultaron despreciables a la hora de determinar la posición en donde las reacciones son máximas, no obstante, los momentos que correspondan a dicho tiempo si fueron incluidos en la simulación estática para determinar los esfuerzos correspondientes.



**Figura: 3.13: Cargas en el eslabón cadera pie exterior en función del tiempo**

Como podemos observar en la Figura: 3.13 el tiempo crítico es igual a 0.2525 s el cual corresponde a la siguiente posición.

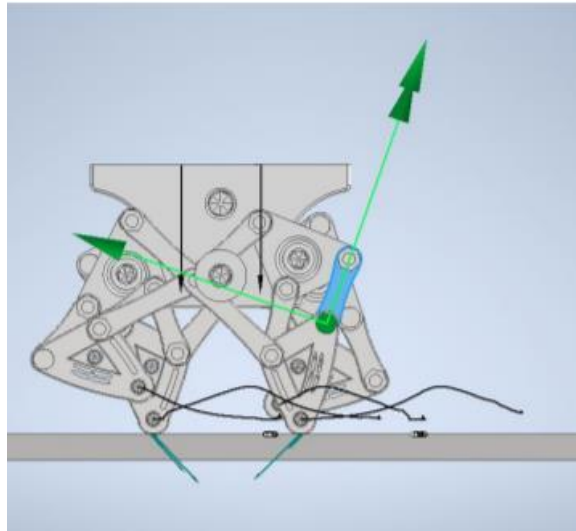


Figura: 3.14: Posición el eslabón cadera pie exterior en  $T_c=0.2525$

### 3.2.7. Análisis dinámico: Eslabón cadera pie interior

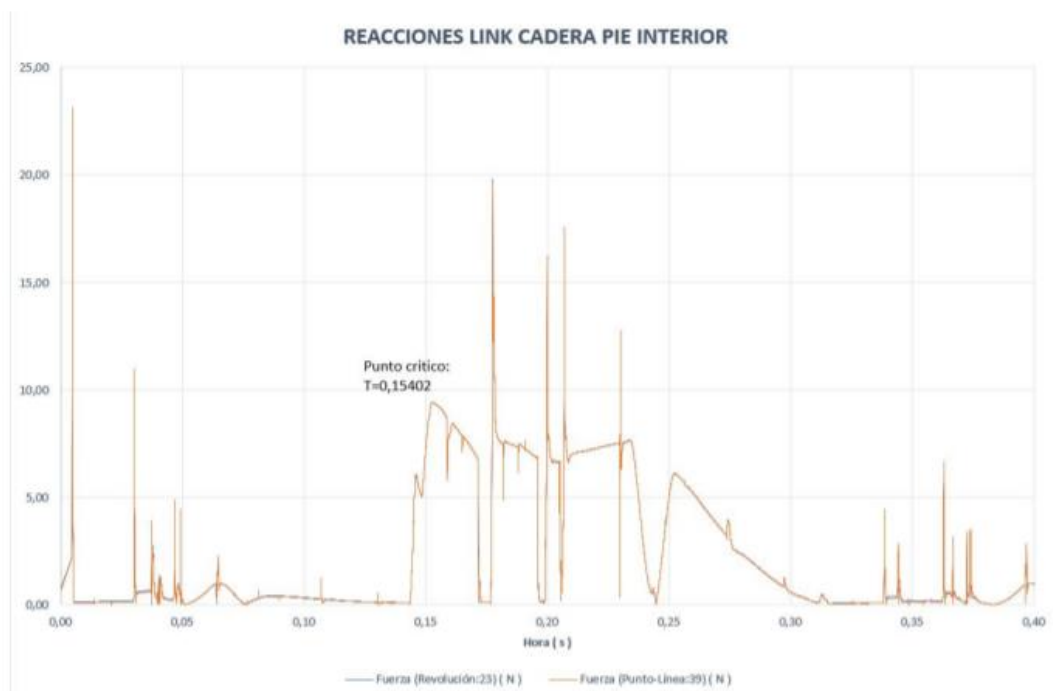


Figura: 3.15: Cargas en el eslabón cadera pie exterior en función del tiempo

Como podemos observar en la Figura: 3.15 el tiempo crítico es igual a 0.1540 s el cual corresponde a la siguiente posición.



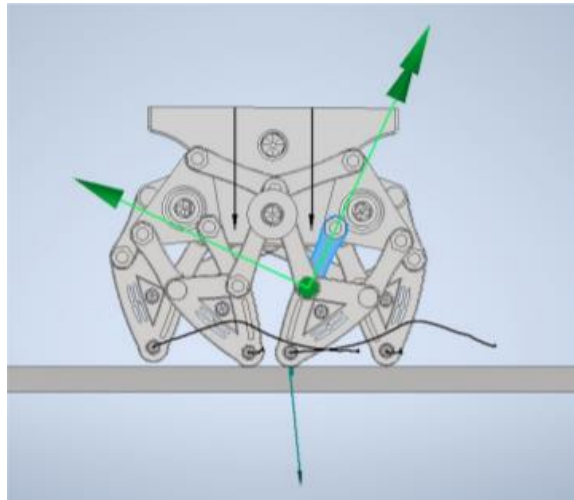


Figura: 3.16: Posición del eslabón bancada pie inferior en  $T_c=0.1540$

### 3.2.8. Análisis dinámico: Eslabón bancada cadera superior

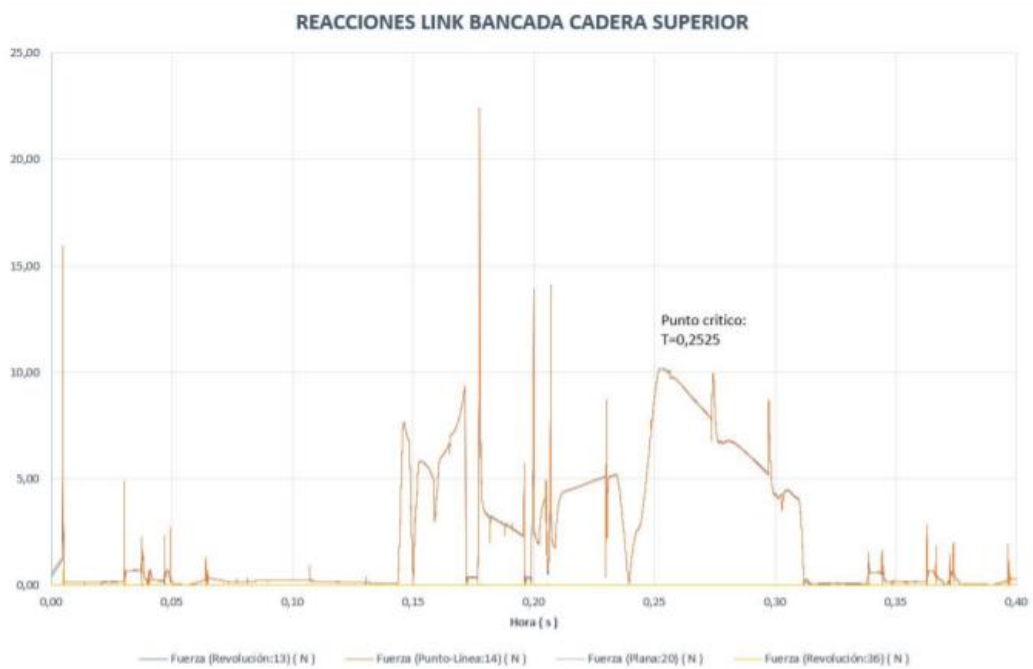


Figura: 3.17: Reacciones en el eslabón bancada cadera superior en función del tiempo

Como podemos observar en la Figura: 3.17 el tiempo crítico es igual a 0.2525 s el cual corresponde a la siguiente posición.

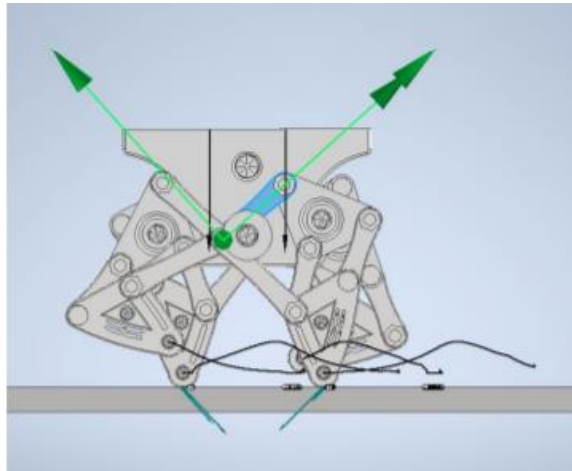


Figura: 3.18: Posición del eslabón bancada cadera superior en  $T_c=0.2525$

### 3.2.9. Análisis dinámico: Eslabón bancada pie inferior

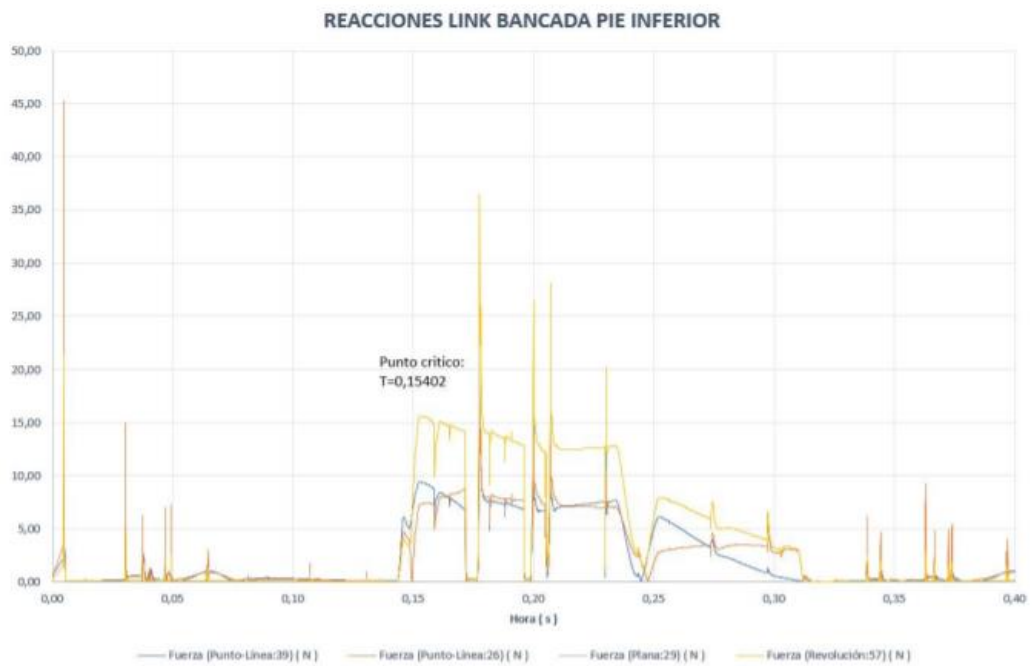


Figura: 3.19: Reacciones en el eslabón bancada pie inferior en función del tiempo

Como podemos observar en la Figura: 3.19 el tiempo crítico es igual a 0.1540 s el cual corresponde a la siguiente posición.

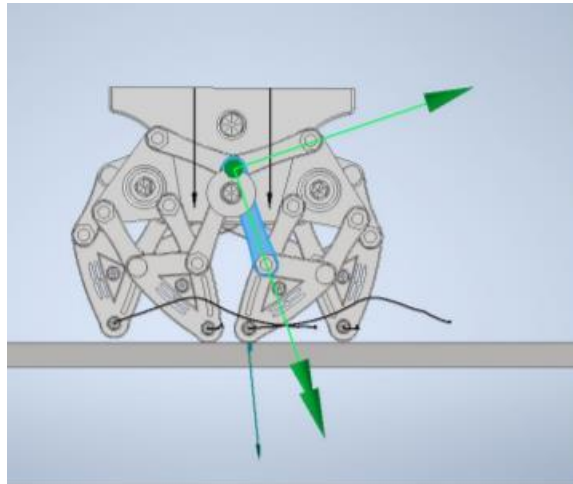


Figura: 3.20: Posición del eslabón bancada pie interior en  $T_c=0.1540$

### 3.2.10. Análisis dinámico: Cadera

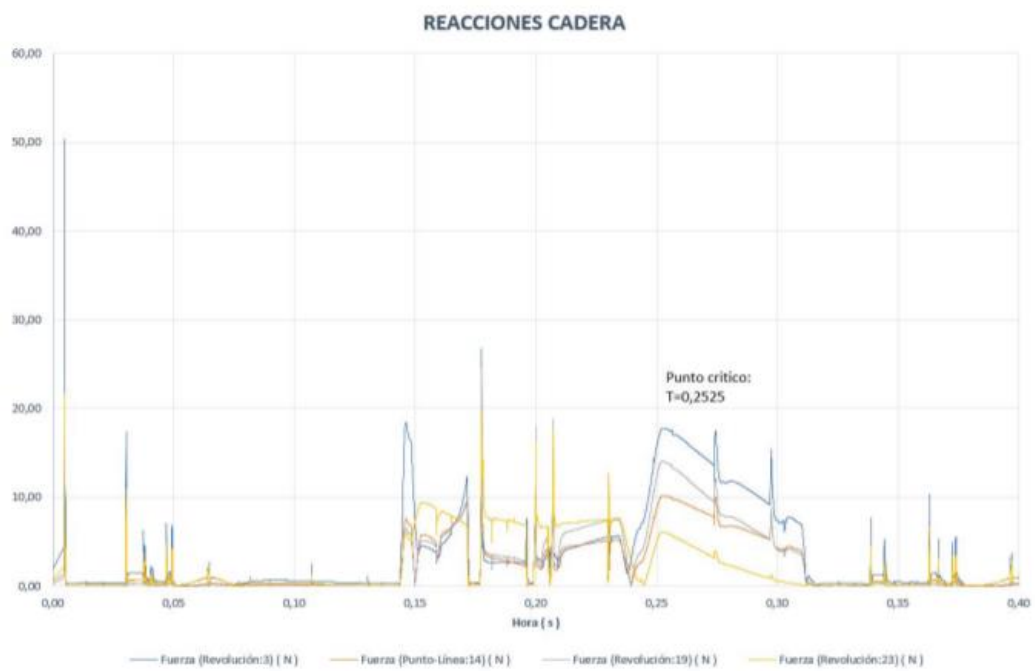


Figura: 3.21: Reacciones en la cadera en función del tiempo

Como podemos observar en la Figura: 3.21 el tiempo crítico es igual a 0.2525 s el cual corresponde a la siguiente posición.

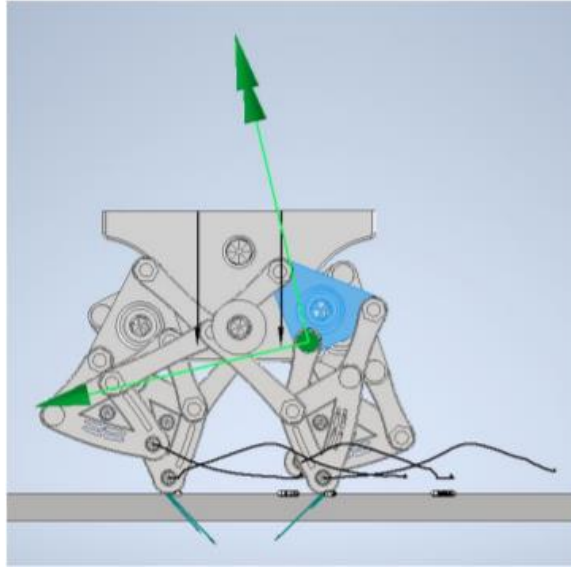


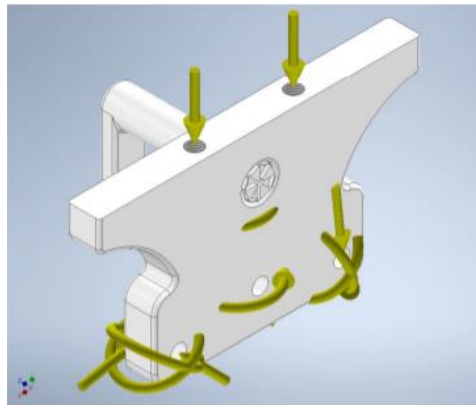
Figura: 3.22: Posición de la cadera en  $T_c=0.2525$

### 3.3. Parámetros para la simulación estática

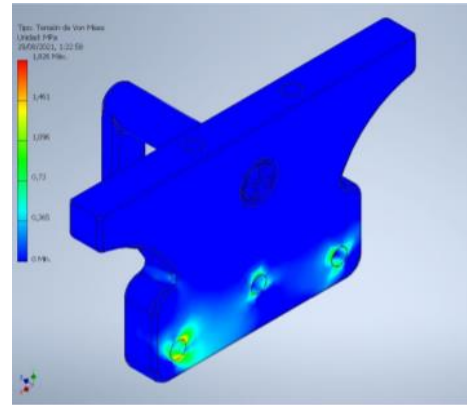
En los resultados obtenidos en el análisis estático de cada una de las piezas, es importante recalcar que las cargas aplicadas a cada uno de los elementos corresponden a las cargas encontradas en su posición crítica, se obtuvo el esfuerzo principal, el factor de seguridad y la deformación, además de gráficos esquemáticos de la acción de las cargas sobre cada elemento.

#### 3.3.1. Análisis Estático: Bancada

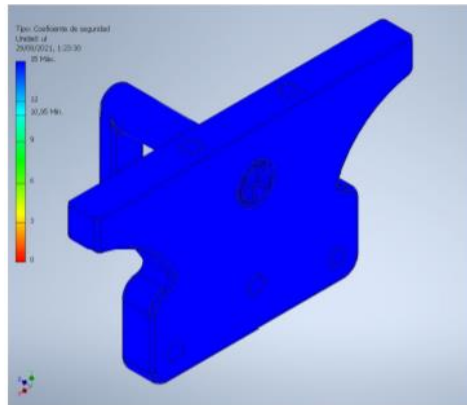
Como podemos observar en la Figura: 3.23 el máximo esfuerzo equivale a  $1.826 MPa$  lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 10.95 y una deformación equivalente máxima de  $7.5 \times 10^{-4}$  ul.



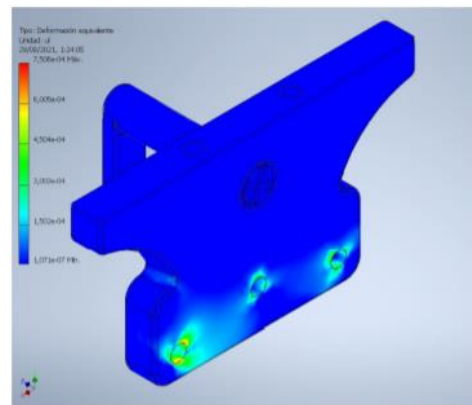
a) Cargas críticas aplicadas



b) Esfuerzos principales



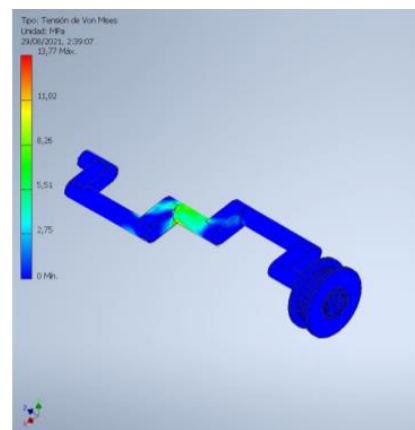
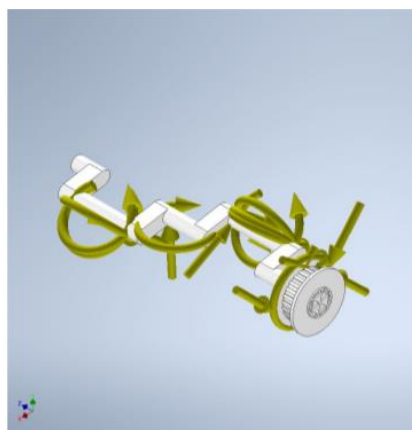
c) Coeficiente de seguridad



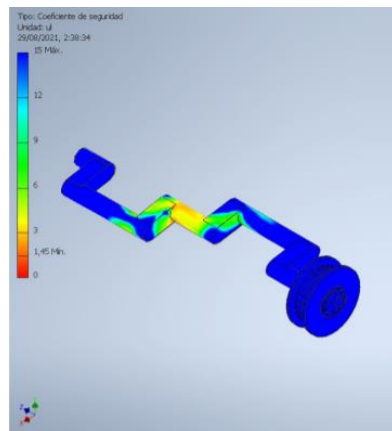
d) Deformación equivalente

**Figura: 3.23: Resultados estáticos para la bancada**

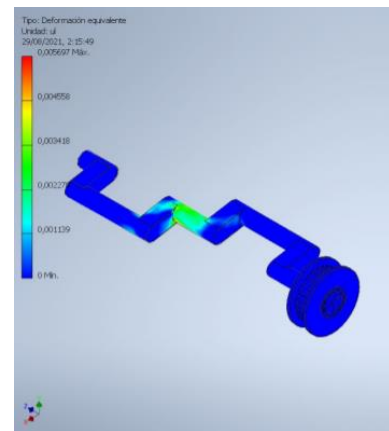
### 3.3.2. Análisis Estático: Cigüeñal



e) Cargas críticas aplicadas



f) Esfuerzos principales



g) Coeficiente de seguridad

h) Deformación equivalente

Como podemos observar en la Figura: 3.24 el máximo esfuerzo equivale a 13.77 MPa lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 1.45 y una deformación equivalente máxima de  $5.7 \times 10^{-3}$  ul.

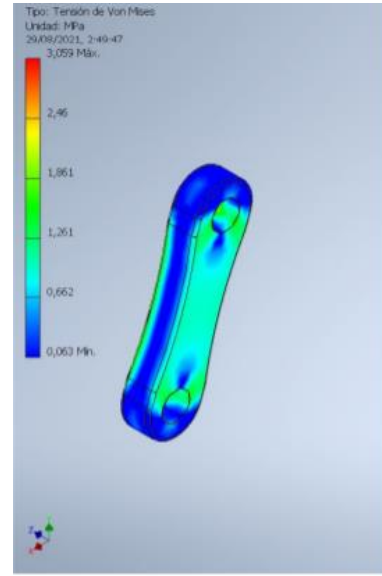
**Figura: 3.24: Resultados estáticos del cigüeñal**

### 3.3.3. Análisis Estático: Eslabón cadera pie exterior

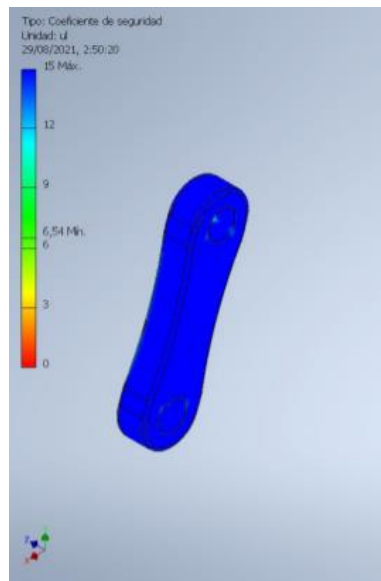
Como podemos observar en la Figura: 3.25 el máximo esfuerzo equivale a 3.059MPa lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 6.54 y una deformación equivalente máxima de  $1.26 \times 10^{-3}$  ul.



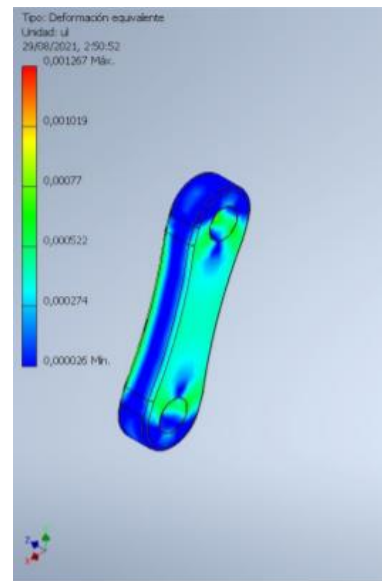
i) Cargas críticas aplicadas



j) Esfuerzos principales



k) Coeficiente de seguridad

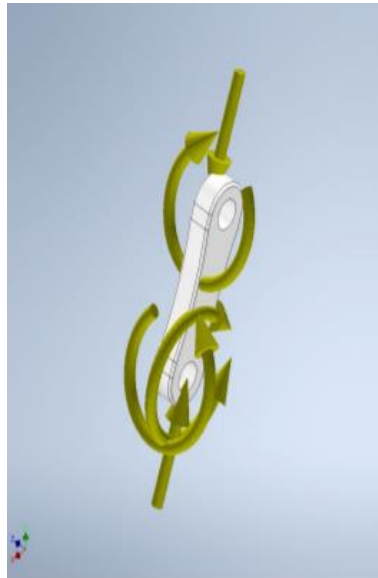


l) Deformación equivalente

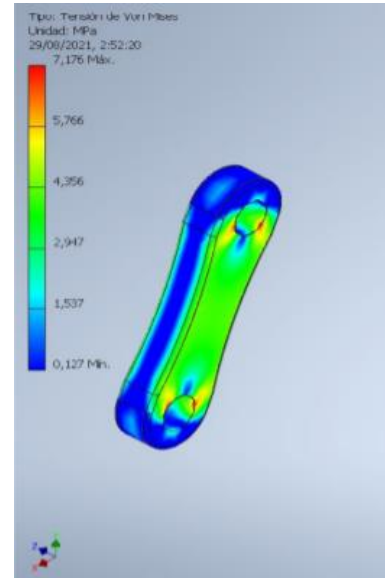
**Figura: 3.25: Resultados estáticos el eslabón cadera pie exterior**

### 3.3.4. Análisis Estático: Eslabón cadera pie interior

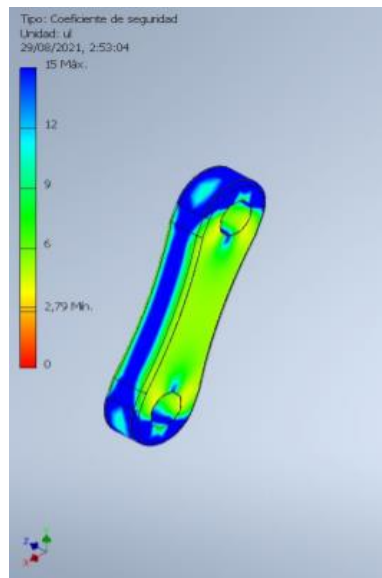
Como podemos observar en la Figura: 3.26 el máximo esfuerzo equivale a 7.17MPa lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 2.79 y una deformación equivalente máxima de  $2.97 \times 10^{-3}$  ul.



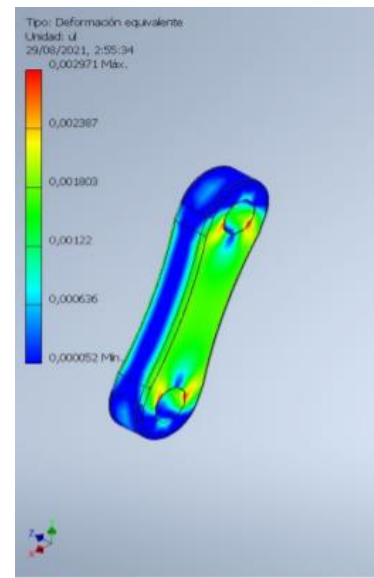
m) Cargas críticas aplicadas



n) Esfuerzos principales



o) Coeficiente de seguridad



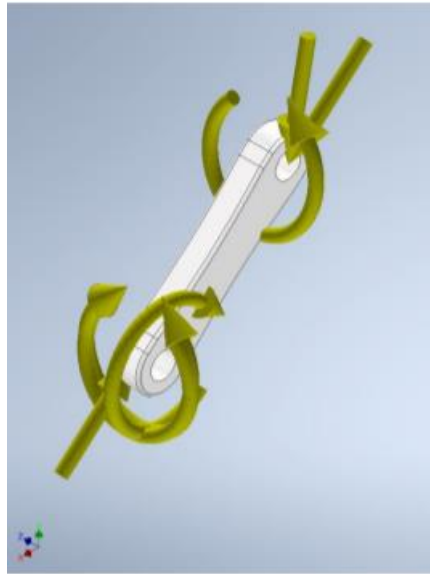
p) Deformación equivalente

**Figura: 3.26: Resultados estáticos para el eslabón cadera pie interior**

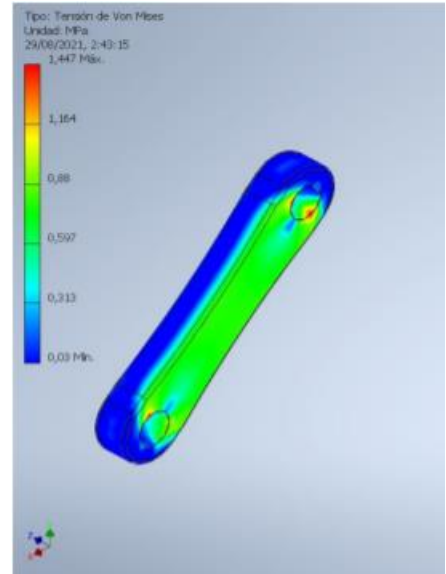
### 3.3.5. Análisis Estático: Eslabón bancada cadera superior

Como podemos observar en la Figura: 3.27 el máximo esfuerzo equivale a  $1.447 \text{ MPa}$  lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 13.82 y una deformación equivalente máxima de  $6.01 \times 10^{-4} \text{ ul}$ .

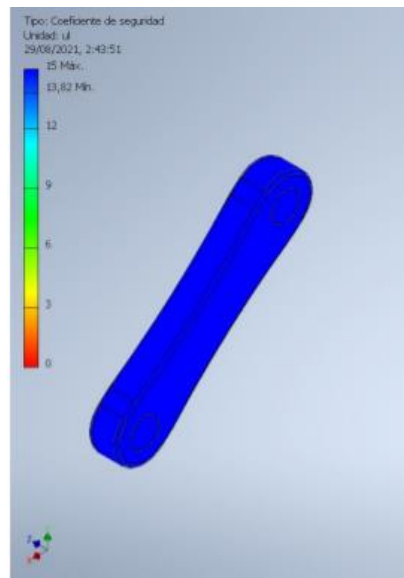




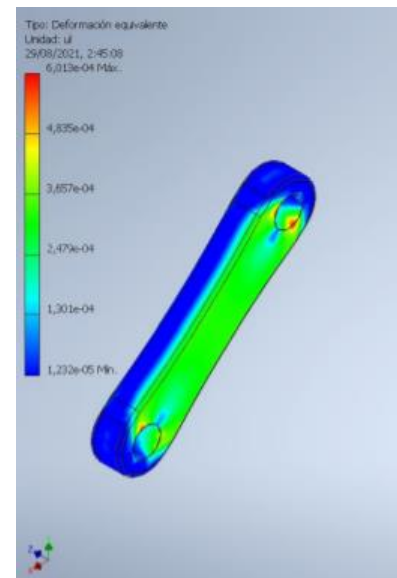
q) Cargas críticas aplicadas



r) Esfuerzos principales



s) Coeficiente de seguridad

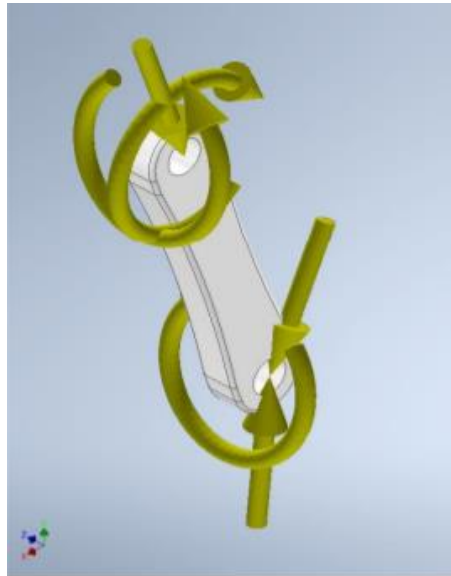


t) Deformación equivalente

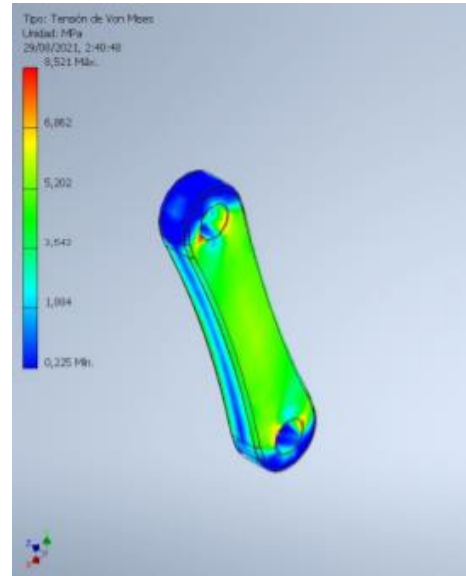
**Figura: 3.27: Resultados estáticos para el eslabón bancada cadera superior**

### 3.3.6. Análisis Estático: Eslabón bancada pie inferior

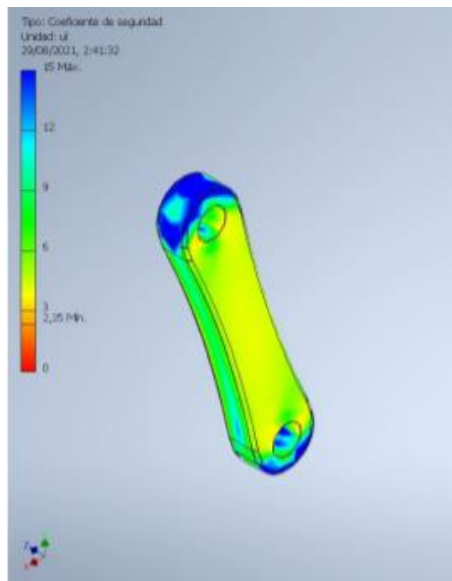
Como podemos observar en la Figura: 3.28 el máximo esfuerzo equivale a  $8.521 \text{ MPa}$  lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 2.35 y una deformación equivalente máxima de  $3.53 \times 10^{-3} \text{ ul}$ .



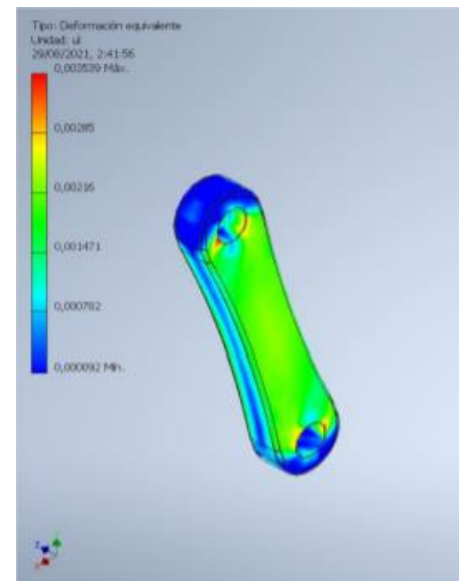
u) Cargas críticas aplicadas



v) Esfuerzos principales



w) Coeficiente de seguridad

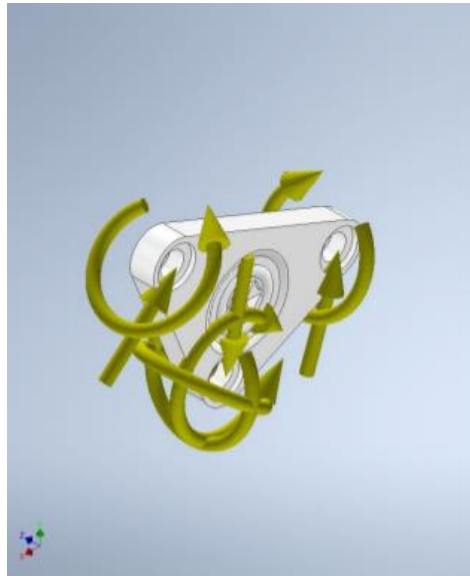


x) Deformación equivalente

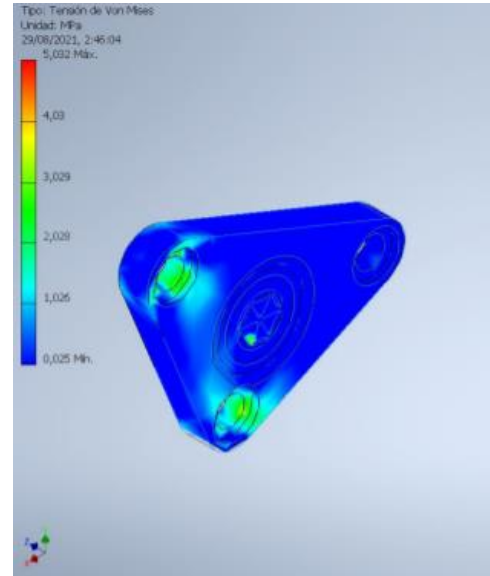
**Figura: 3.28: Resultados estáticos para el eslabón bancada pie inferior**

### 3.3.7. Análisis Estático: Cadera

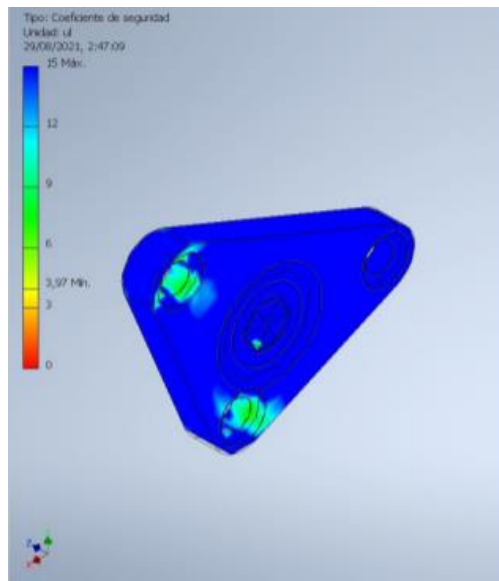
Como podemos observar en la Figura: 3.29 el máximo esfuerzo equivale a  $5.032 \text{ MPa}$  lo que resulta en un factor de seguridad mínimo de 3.97 y una deformación equivalente máxima de  $2.13 \times 10^{-3} \text{ ul}$ .



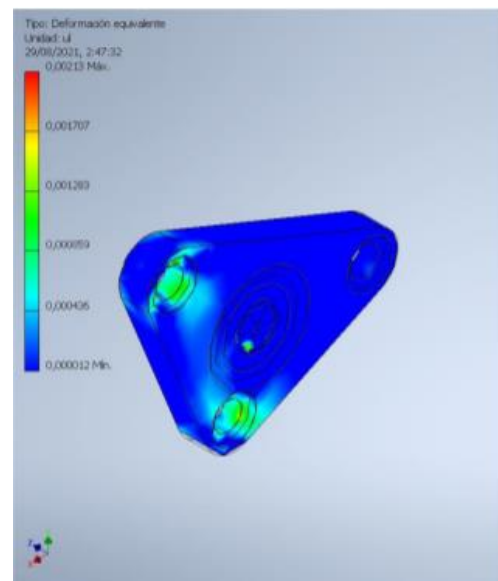
y) Cargas críticas aplicadas



z) Esfuerzos principales



aa) Coeficiente de seguridad



bb) Deformación equivalente

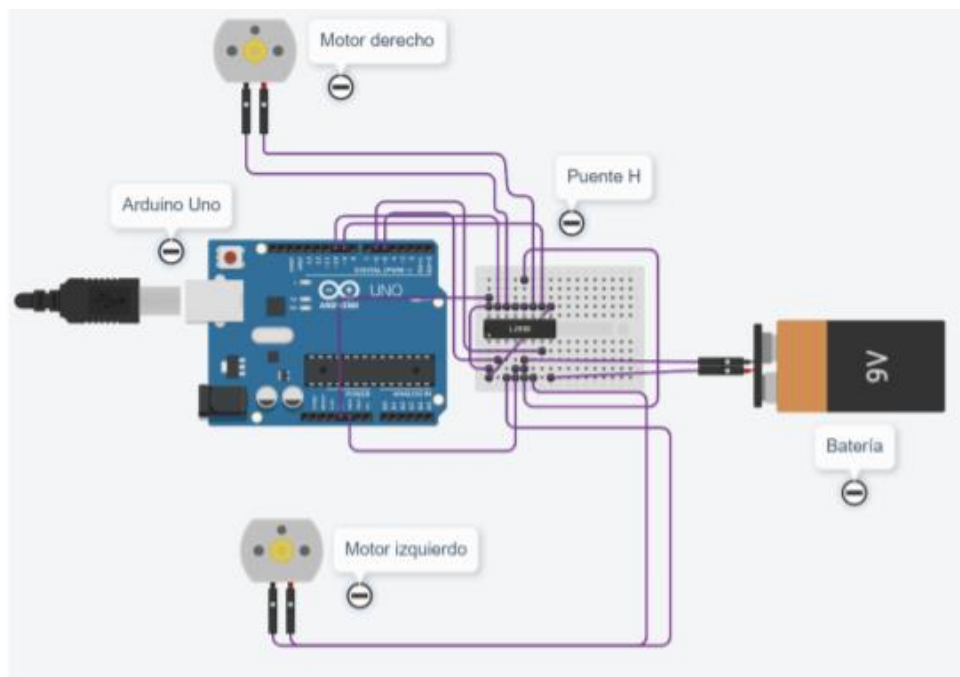
**Figura: 3.29: Resultados estáticos para la cadera**

### 3.4. Sistemas de control

El sistema de control se consideró tanto la forma de controlar el dispositivo como su complejidad, debido a que el sistema motriz solamente está compuesto de un par de motores y los cigüeñales conectados por poleas. Pudiendo usar un Arduino OneShield o un Arduino UNO incluyendo una librería y un módulo receptor para

ser controlado remotamente, pero el resultado hubiera sido un código un poco más complejo.

Al ser algo demostrativo se optó por dejar de lado el control remoto y mantener la simplicidad en este prototipo. Para ello se definió un código para realizar un recorrido determinado, evidenciando la movilidad del prototipo en un escenario previamente establecido.



**Figura: 3.30: Diagrama de conexiones**

En el código para definir el recorrido se incluyó tanto movimientos lineales como giros en ambos sentidos, controlando los motores con un puente H para cambiar la dirección de cada motor de forma independiente. El código completo será incluido en la sección de anexos.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "Codigo\_Silla\_Thao\_Jansen | Arduino 1.8.15 (Windows Store 1.8.49.0)". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for a checkmark, a right arrow, a document, an up arrow, and a down arrow. The main workspace shows a file named "Codigo\_Silla\_Thao\_Jansen" containing the following C++ code:

```
int izqA = 5;
int izqB = 6;
int derA = 9;
int derB = 10;
int vel = 225; // Velocidad de los motores
void setup()
{
  pinMode(derA, OUTPUT);
  pinMode(derB, OUTPUT);
  pinMode(izqA, OUTPUT);
  pinMode(izqB, OUTPUT);
}

void loop()
{
  analogWrite(derB, 0); // Detiene los Motores 0.5 segundos
  analogWrite(izqB, 0);
  analogWrite(derA, 0);
  analogWrite(izqA, 0);
  delay (500);

  analogWrite(derA, vel); // Frente 2 segundos
  analogWrite(izqA, vel);
  delay (2000);

  analogWrite(derB, 0); // Detiene los Motores 0.5 segundos
  analogWrite(izqB, 0);
  analogWrite(derA, 0);
  analogWrite(izqA, 0);
  delay (500);

  analogWrite(derA, vel); // Derecha 2 segundos
  analogWrite(izqB, vel);
  delay (2000);
```

Figura: 3.31: Código de recorrido

Se obtuvo la potencia necesaria para cada motor tomando en cuenta la velocidad establecida anteriormente y el momento necesario para mover el cigüeñal, se muestra a continuación.

$$P = 0.6 \text{ Nm} \times 17.47 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

(3.1)

$$P = 10.49 \text{ W}$$

(3.2)

### 3.5. Fabricación

Se imprimieron las piezas utilizando filamento de ABS con una impresora 3D, tomando en cuenta la orientación de la impresión para utilizar la menor cantidad de soportes posibles y tener mejor acabado en los puntos de contacto, sin embargo, se necesitó realizar cambios en las piezas con el fin de imprimir solamente lo indispensable para el funcionamiento del mecanismo.



**Figura: 3.32: Proceso de armado de prototipo**

Esto se realizó para reducir la complejidad de la impresión y la cantidad de material utilizado, debido a que influye tanto en el tiempo de impresión como el costo de fabricación. Se buscó imprimir de forma perpendicular a los agujeros que tienen las piezas, con el fin de reducir la fricción en ellas, por lo que fue necesario lijar ligeramente estas zonas como se puede apreciar en la Figura: 3.32: **Proceso de armado de prototipo** en donde se pueden observar las piezas antes y después del armado, sin embargo esto no fue suficiente y las irregularidades en las piezas continuaron siendo significativas, debido a que el proceso de lijado dejaba

filamentos similares a hebras de ABS, las cuales hacían persistir el problema. Las irregularidades no fueron medidas, pero fueron comprobadas por inspección visual.

Debido a que era un prototipo demostrativo y no se plantea utilizar de forma extensiva, no es necesario que se puedan desarmar los mecanismos posteriormente, se decidió imprimir todas las partes con ABS de forma que los mecanismos no se puedan desarmar.

Sin embargo, la fricción fue demasiado alta y el cigüeñal fallo en su zona más crítica, acorde a la simulación de esfuerzos que se realizó, por lo que se procedió a dejarlo estático como prueba de su construcción. Se planteó cambiar el material del cigüeñal para reducir en gran medida la fricción presentada entre las partes móviles.

Las bases para el sistema de control fueron establecidas logrando que los motores se muevan antes de armar el prototipo, acorde al código establecido, mostrando como deben comportarse los motores para generar un movimiento lineal o un giro, sin embargo, no pudo ser comprobado con el mecanismo en movimiento debido a problemas con el cigüeñal mientras se armaba el prototipo.



**Figura: 3.33: Prototipo impreso con ABS**

### **3.6. Costos**

Como se describió en la sección anterior, los costos tomaron en cuenta tanto el material usado en la silla como los soportes que fueron necesarios para su impresión, utilizando aproximadamente 2 Kg, teniendo un costo unitario de 30 \$, mientras que el costo por la impresión debido al tiempo que involucró la tanto las piezas como los repuestos de 10 días corresponden 40 \$ como se muestra de la **Tabla 3.1: Resumen completo de costos.**

Los elementos utilizados para el sistema de control electrónico constan de un Arduino Uno, un puente H L293D, dos motores, baterías y cables de conexión, por lo que el costo sería de aproximadamente 70 \$. El uso de la licencia del software de Autodesk Inventor por el equivalente a dos meses, serían aproximadamente 365 \$, mientras que tanto el diseño como los cambios necesarios para la impresión de los elementos, junto con los cálculos, simulaciones y dimensionamientos realizados corresponden a 1000 \$.



Todos los gastos realizados tanto de materia prima, procesos, componentes, cálculos e interpretaciones, incluyen la realización del diseño desde cero costaría aproximadamente 1535 \$ como se detalla en la Tabla 3.1: **Resumen completo de costos**. Debido a que este proyecto tiene como objetivo analizar el funcionamiento y la viabilidad mecánica del mecanismo de Theo Jansen en reemplazo a las ruedas convencionales, esta estimación de costo no brinda información útil sobre el costo real para una producción a tamaño real con los materiales adecuados.

**Tabla 3.1: Resumen completo de costos.**

	Precio	Cantidad	Total
Filamento ABS (1kg)	\$ 30.00	2	\$ 60.00
Impresión	\$ 40.00	1	\$ 40.00
Motor	\$ 15.00	2	\$ 30.00
Arduino UNO	\$ 30.00	1	\$ 30.00
Puente H (L293D)	\$ 2.50	1	\$ 2.50
Batería 9V	\$ 4.50	1	\$ 4.50
Cables de conexión (40)	\$ 3.00	1	\$ 3.00
Software Inventor	\$ 365.00	1	\$ 365.00
Memoria de cálculo	\$ 1000.00	1	\$ 1000.00
		Total	\$ 1535.00

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- El diseño de un sistema de 8 extremidades basadas en el mecanismo de Theo Jansen se realizó con éxito, probando que el desplazamiento lineal presenta pocas perturbaciones en el eje transversal al movimiento, tal como se observó en la simulación, lo que implica que el prototipo, se presenta como una alternativa virtualmente viable a las sillas de ruedas convencionales.
- Las simulaciones fueron realizadas exitosamente, mostrando las posiciones y cargas críticas para cada elemento al definir las condiciones e interacciones correctamente, logrando descubrir los puntos débiles del mecanismo. Mostrando la necesidad de aumentar los factores de seguridad de ciertas piezas aumentando sus dimensiones o alterando su geometría mediante refuerzos.
- La impresión 3D como medio para la fabricación de un prototipo con la escala usada, no fue la opción más viable para hacer un diseño funcional y eficiente, debido a que las piezas impresas por filamento de ABS presentaron superficies irregulares, principalmente en las conexiones, causando más fricción de la esperada y burlando así la obtención de información relevante para un escalamiento a tamaño real.

### 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda aumentar el diámetro del eje central del cigüeñal para aumentar su factor de seguridad, cambiar la orientación en la impresión o en su defecto usar un cigüeñal metálico, ya que este es un elemento más crítico del sistema.
- Se sugiere realizar un prototipo solamente del mecanismo con mayor magnitud, para facilitar su armado y mostrar el mecanismo funcionando en

físicamente, por lo que se necesitaría la inclusión de otros elementos para el armado del cigüeñal.

- Se recomienda utilizar la impresión por filamento como una primera aproximación, para la generación de moldes que pueden servir para la construcción de piezas con mejor calidad usando otros procesos de manufactura o materiales que tengan mejores acabados para un prototipo completamente funcional.

# Bibliografía

- Alberoni, O. (2012). *Ayudas técnicas para la discapacidad o personas mayores*. España.
- Centeno-Romero, E. E. (2008). *Diseño de un control electrónico para una silla de ruedas*.
- Cheein, F. A. A., De la Cruz, C., Carelli, R., y Bastos Filho, T. F. (2011). *Navegación autónoma asistida basada en slam para una silla de ruedas robotizada en entornos restringidos*. *Revista Iberoamericana de automática e informática Industrial RIAI*, 8(2), 81–92.
- CONADIS. (2021, abril). *Estadísticas de personas con discapacidad registradas en el registro nacional de discapacidad*. Ecuador. (Accedido en 11-06-2021 a <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>)
- Gorrini, B., Poblete, H., Hernandez, G., y Dunn, F. (2004). *Tableros de partículas y MDF de eucalyptus nitens: Ensayos a escala industrial*. *Bosque (Valdivia)*, 25 (3), 89–97.
- Jansen, T. (2007). *Theo Jansen: The great pretender*. Rotterdam, Netherlands.
- Klann, J. C. (2002). *Walking device*. Estados Unidos. (Patente: US6478314B1)
- Kulandaiaasan Sheba, J., Elara, M., Martínez-García, E., y Tan-Phuc, L. (2016). *Trajectory generation and stability analysis for reconfigurable klann mechanism-based walking robot*. *Robotics*, 5, 13. (doi:10.3390/robotics5030013.)
- Letcher, T., Rankouhi, B., y Javadpour, S. (2015). *Experimental study of mechanical properties of additively manufactured abs plastic as a function of layer parameters*. *En Asme international mechanical engineering congress and exposition* (Vol. 57359, p. V02AT02A018).
- Ley orgánica de discapacidades. (2012). Registro oficial.
- McCORMAC, J. (2012). *Diseño de estructuras de acero*. Alfaomega Grupo Editor.
- Mehrdad Mohsenizadeh, J. Z. (2015). *Kinematic analysis and simulation of Theo Jansen mechanism*. Beaumont, Texas, USA: Department of Mechanical Engineering Lamar University.
- Nise, N. S. (2020). *Control systems engineering*. John Wiley & Sons.
- Norton, R. L. (1995). *Diseño de maquinaria: Una introducción a la síntesis y al análisis de mecanismos y maquinas*. McGraw-Hill. (ISBN: 970-10-0820-0)
- Onieva, J., Martínez, M., y Romeo, G. (2019). *Diseño y construcción de un mecanismo andante*. Madrid.
- Shunsuke, N., Mohan Rajesh, E., y Masami, I. (2013). *Dynamic analysis and modeling of Jansen mechanism, procedia engineering* (Vol. 64). (ISSN 1877-7058)

# APÉNDICES

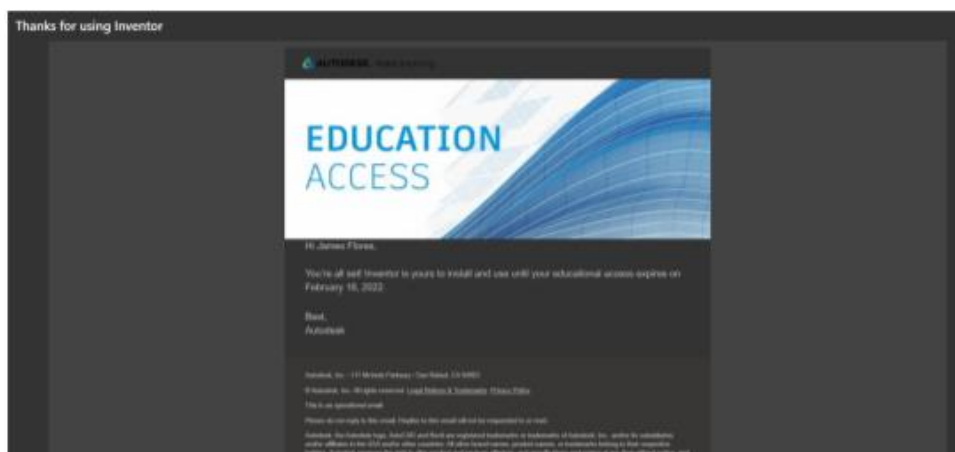
# APÉNDICE A: Programas utilizados

## Autodesk Inventor Professional 2021

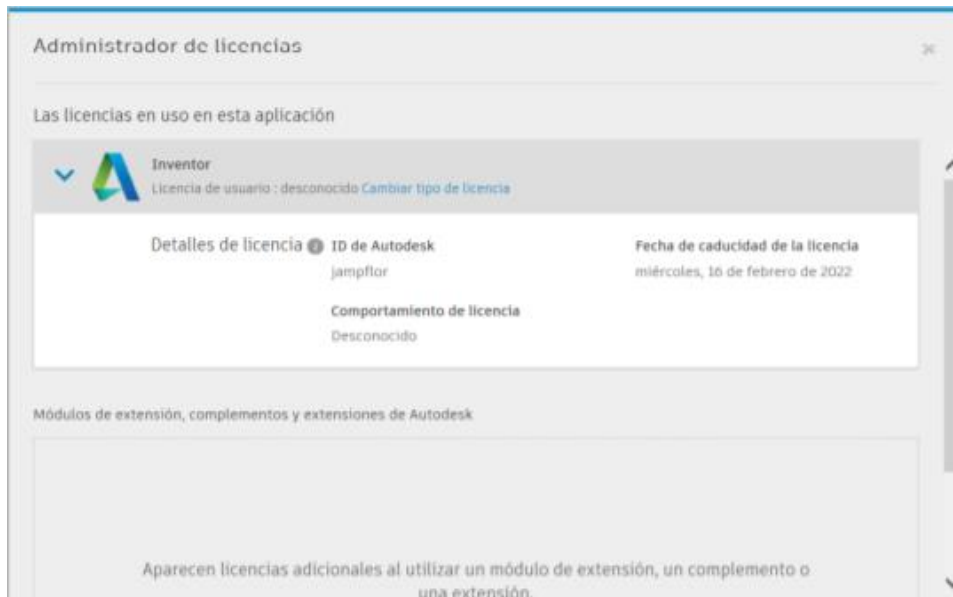
Licencia estudiantil de Inventor Professional 2021 obtenida a través de la página de Autodesk.



A 1: Captura acceso estudiantil de Autodesk



A 2: Correo de adquisición de licencia de Inventor profesional



**A 3: Administrador de licencias de Inventor**

## Tinkercard

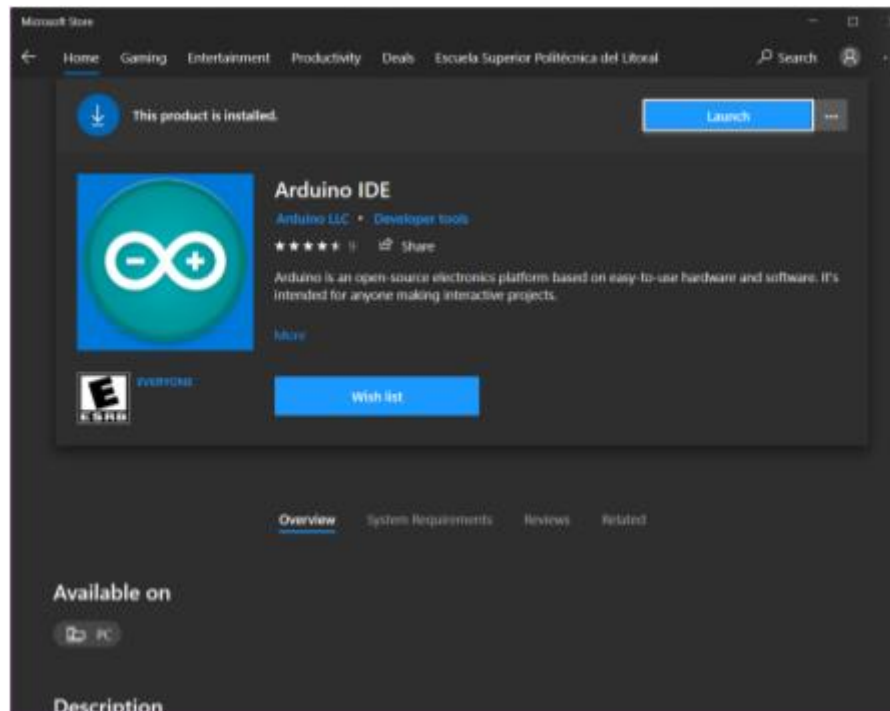
Utilizada en línea a través de la cuenta de Autodesk, con licencia estudiantil.



**A 4: Captura de la página principal de Tinkercard**

## Arduino IDE

El programa Arduino IDE fue obtenido a través de Windows Store con la versión 1.8.49.0, siendo un software de código libre.



A 5: Captura de la tienda de Microsoft del programa Arduino IDE



# APÉNDICE B: Código completo del recorrido de prueba.

Código en Arduino IDE.

A screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "Codigo\_Silla\_Thao\_Jansen | Arduino 1.8.15 (Windows Store 1.8.49.0)". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for a checkmark, a right arrow, a document, an up arrow, and a down arrow. The main editor area shows the following code:

```
Codigo_Silla_Thao_Jansen
int izqA = 5;
int izqB = 6;
int derA = 9;
int derB = 10;
int vel = 225; // Velocidad de los motores
void setup()
{
  pinMode(derA, OUTPUT);
  pinMode(derB, OUTPUT);
  pinMode(izqA, OUTPUT);
  pinMode(izqB, OUTPUT);
}
```

B 1: Variables utilizadas

```

void loop()
{
    analogWrite(derB, 0); // Detiene los Motores 0.5 segundos
    analogWrite(izqB, 0);
    analogWrite(derA, 0);
    analogWrite(izqA, 0);
    delay (500);

    analogWrite(derA, vel); // Frente 2 segundos
    analogWrite(izqA, vel);
    delay (2000);

    analogWrite(derB, 0); // Detiene los Motores 0.5 segundos
    analogWrite(izqB, 0);
    analogWrite(derA, 0);
    analogWrite(izqA, 0);
    delay (500);

    analogWrite(derA, vel); // Derecha 2 segundos
    analogWrite(izqB, vel);
    delay (2000);

    analogWrite(derA, 0); // Izquierda 2 segundos
    analogWrite(izqB, 0);
    analogWrite(izqA, vel);
    analogWrite(derB, vel);
    delay (2000);

    analogWrite(derA, 0); // Detiene los Motores 1 segundo
    analogWrite(izqA, 0);
    analogWrite(derB, 0);
    analogWrite(izqA, 0);
    delay (1000);

    analogWrite(derB, vel); // Reversa 2 segundos
    analogWrite(izqB, vel);
    delay (2000);
}

```

## B 2: Recorrido a ser repetido

## APÉNDICE C: Discusión de resultados

En el análisis de la estructura de la silla, se utilizó como carga su propio peso y el peso del ocupante obteniendo un esfuerzo máximo de 0.430MPa el cual es muy pequeño con respecto al esfuerzo máximo permitido por el material (Letcher, Rankouhi, y Javadpour, 2015), por lo que su estructura no presentó problemas con la carga de diseño. Siendo las simulaciones el mecanismo de cálculo para la obtención de resultados, se requirió de criterio tanto para su correcta generación como interpretación al momento de definir las características de dichas simulaciones.

El mecanismo realizado, cuyas proporciones se basaron en las propuestas por Theo Jansen (Jansen, 2007), cumplieron con su propósito de garantizar un movimiento casi uniforme en el eje del desplazamiento, tal como podemos observar en la Figura: 3.5, aunque se puede observar bastantes micro fluctuaciones en su desplazamiento por lo que el mecanismo por sí solo no es perfecto, indicando la posibilidad de un sistema de amortiguación para garantizar el confort del ocupante, pero el mismo debe ser dimensionado para un modelo a escala real.

La realización de un análisis dinámico para el conjunto del mecanismo como tal, fue completamente justificado ya que permitió encontrar los instantes en el tiempo en donde la posición del mecanismo daba los esfuerzos críticos en cada uno de los elementos, es decir, los puntos en donde se debía hacer un análisis de tensión. Producto de este análisis se encontró que la pieza que recibe mayor esfuerzo en relación con su resistencia, es decir un menor factor de seguridad, es el cigüeñal.

Era algo previsible, ya que el cigüeñal es el alma motriz del sistema y es quien transmite la potencia, en la bancada también se encontraron cargas considerables, pero debido a la robustez implícita de este soporte los esfuerzos generados no son muy grandes en comparación a otros elementos, obteniendo un factor de seguridad mayor a 10.95 como podemos observar en la Figura: 3.23 (b).

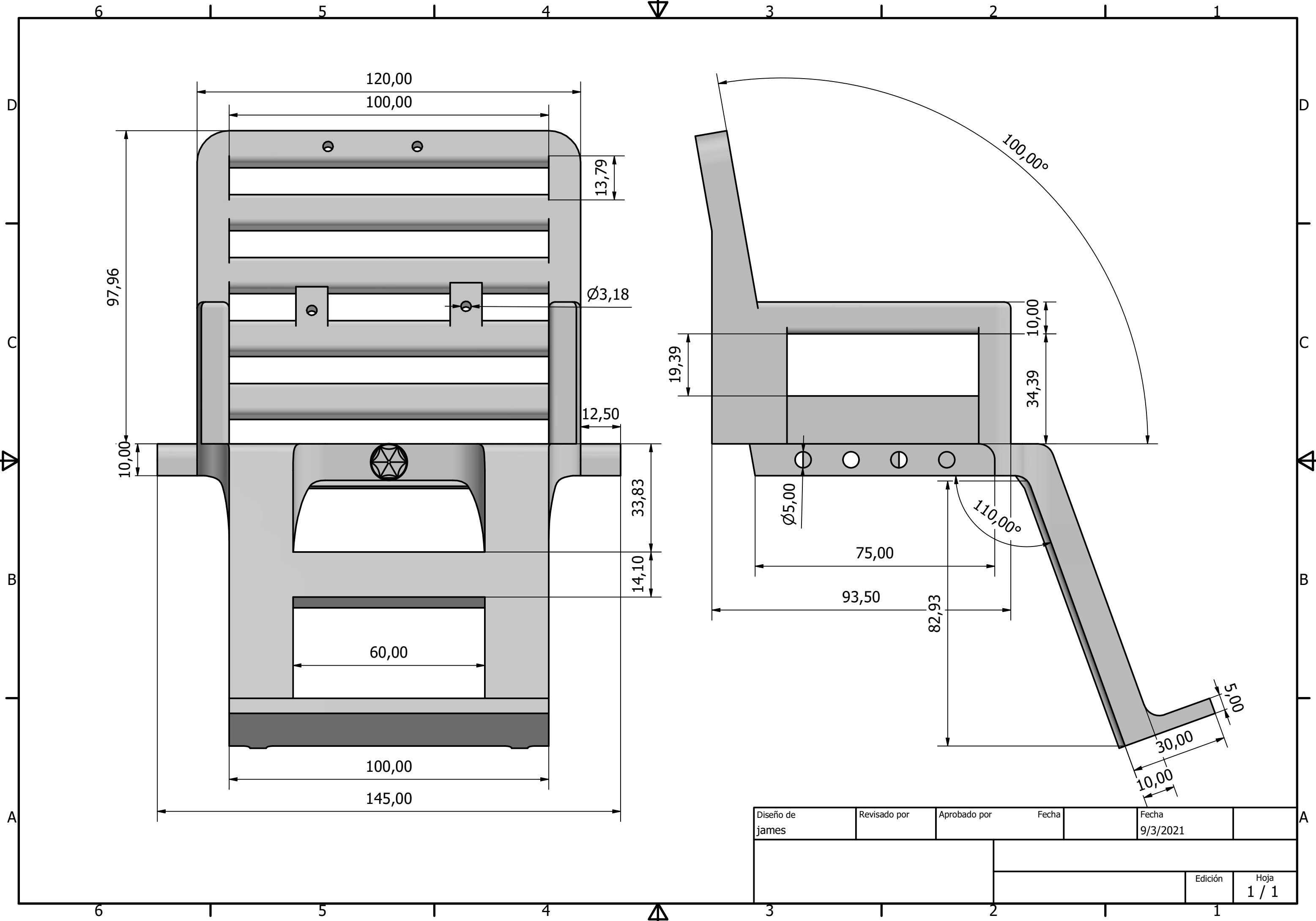
Al referirnos al mecanismo en sí mismo, se encontró que los eslabones que más se esfuerzan, son los eslabones que se encuentran en la parte interior del mecanismo, concretamente el eslabón bancada pie inferior y el eslabón cadera pie interior como podemos observar en la Figura: 3.26(c) y la Figura: 3.29 (c), ambos con un factor de seguridad de 2.79 los cuales son los más bajos en todo el mecanismo a parte del cigüeñal, esto se debe a que estas piezas del mecanismo están mucho más hacia el centro de gravedad del sistema y frecuentemente a lo largo de su movimiento se ponen en posición completamente paralelas a las cargas, por lo que era de esperarse que estas piezas sean críticas, llegando a ser necesario aumentar el factor de seguridad en estas piezas.

Por otro lado, los componentes exteriores como el eslabón cadera pie exterior y el eslabón bancada cadera superior poseen un factor de seguridad mucho más alto ya que todas las piezas poseen la misma sección transversal y sus cargas tienen valores mucho menores, como podemos observar en la Figura: 3.27 (c) y la Figura: 3.25(c), pero no se descarta la opción de refuerzos sobre los mismos.

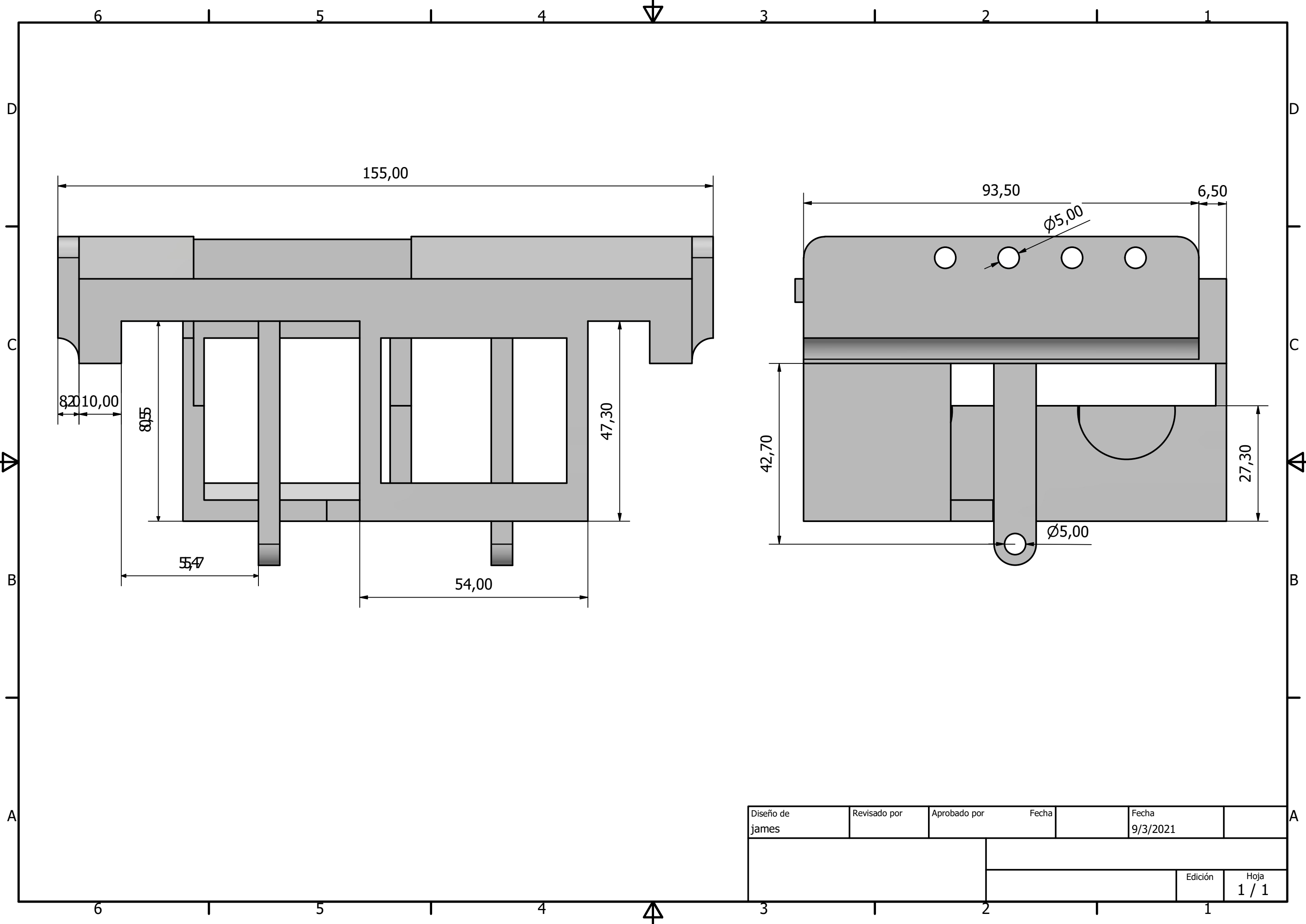
Finalmente, los eslabones ternarios como lo son el pie y la cadera sufren esfuerzos más pequeños debido a su forma geométrica que los hace mucho más rígidos y estables para administrar las cargas generadas por el movimiento impregnados en ellos desde el cigüeñal, llegando a tener un factor seguridad mínimo de 3.97 como podemos observar en la Figura: 3.29 (c), pese a ello se plantea una forma de aumentar dicho factor.

Respecto a la impresión, se encontraron dificultades al armar el mecanismo causadas por el tamaño de las piezas y las irregularidades encontradas en la impresión utilizando filamentos causadas por las bases de apoyo y el tamaño de las piezas en comparación al calibre del filamento utilizado.

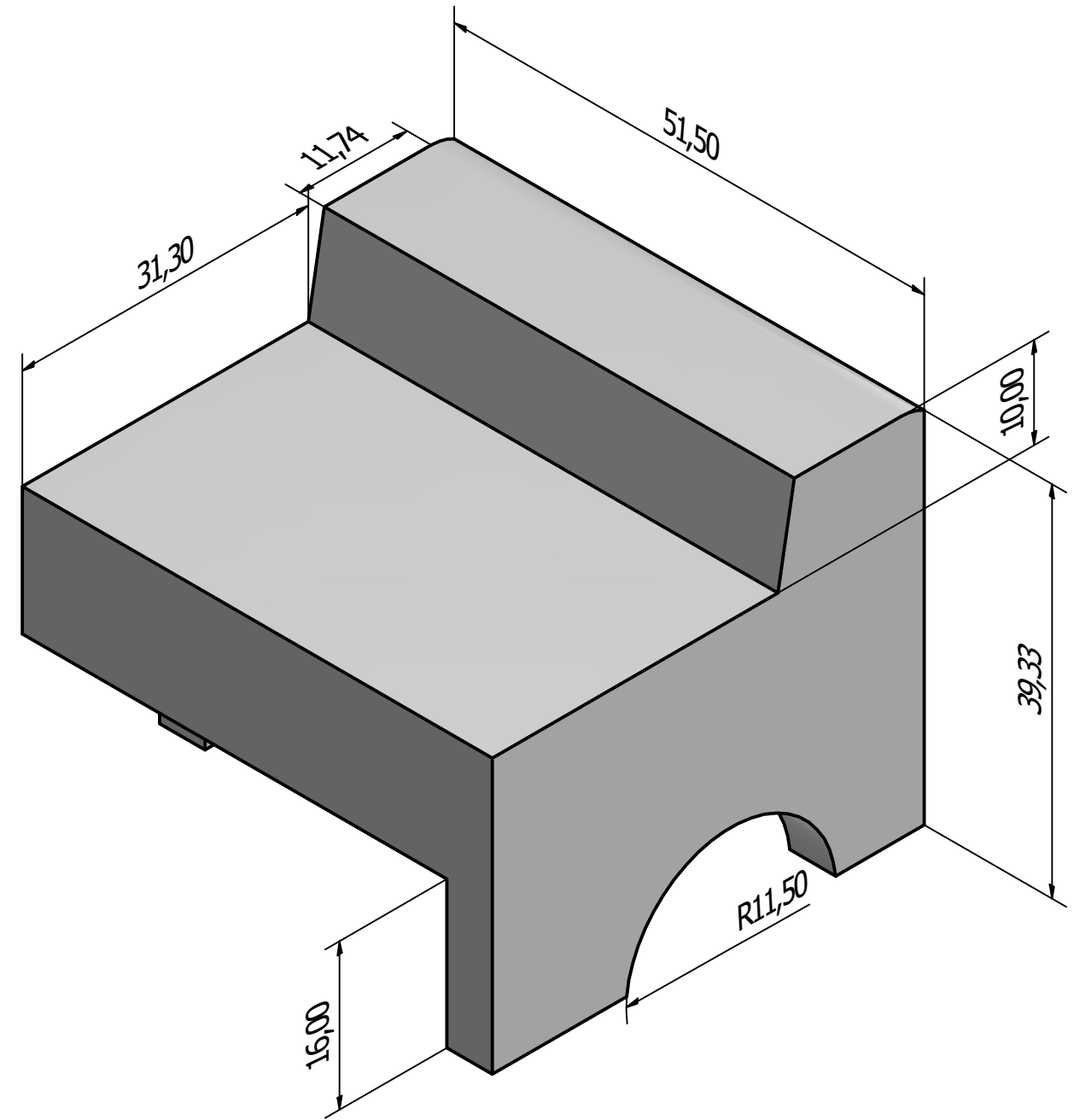
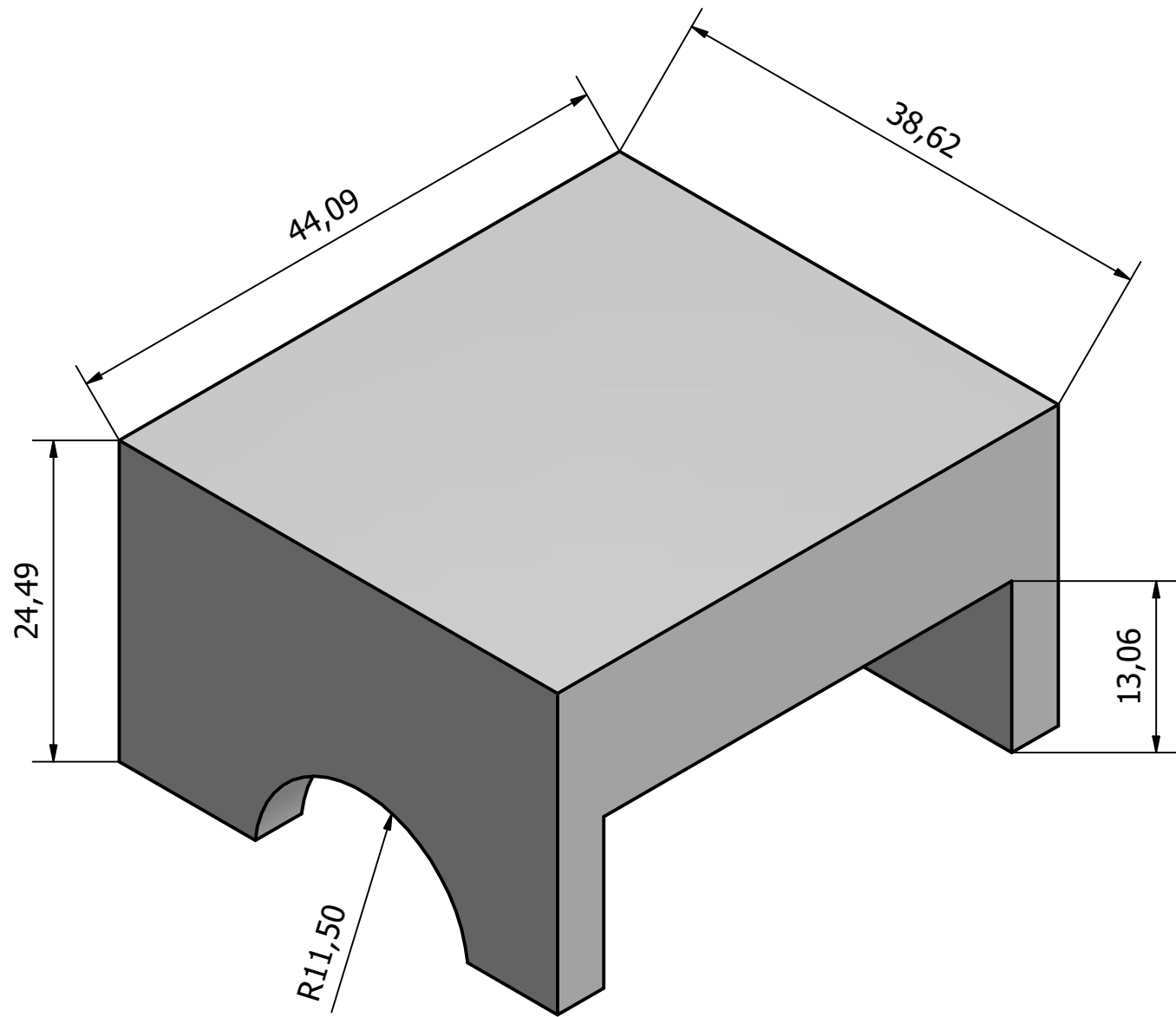
# APÉNDICE D: Planos



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
james				9/3/2021	
			Edición		Hoja
			1		1 / 1



Diseño de james	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 9/3/2021
			Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de james	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 9/3/2021	
			Edición	Hoja 1 / 1	



6 5 4 3 2 1

D

D

C

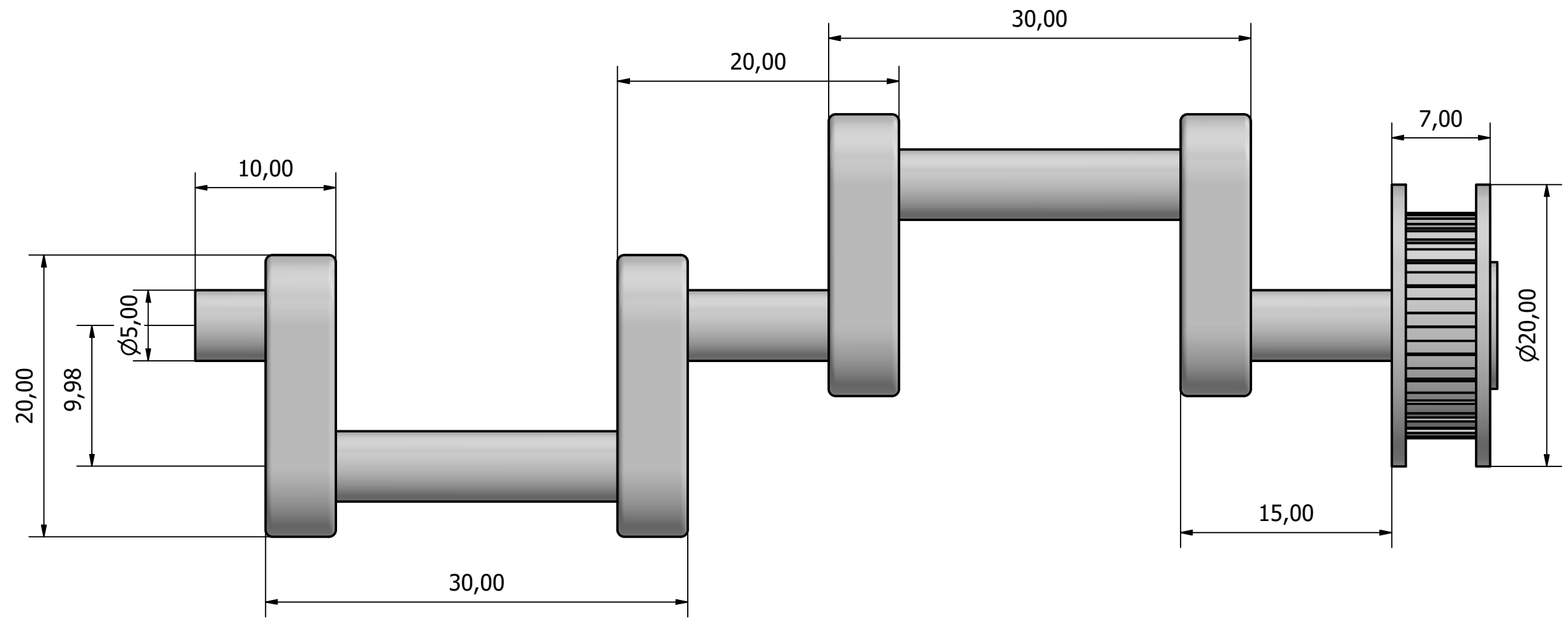
C

B

B

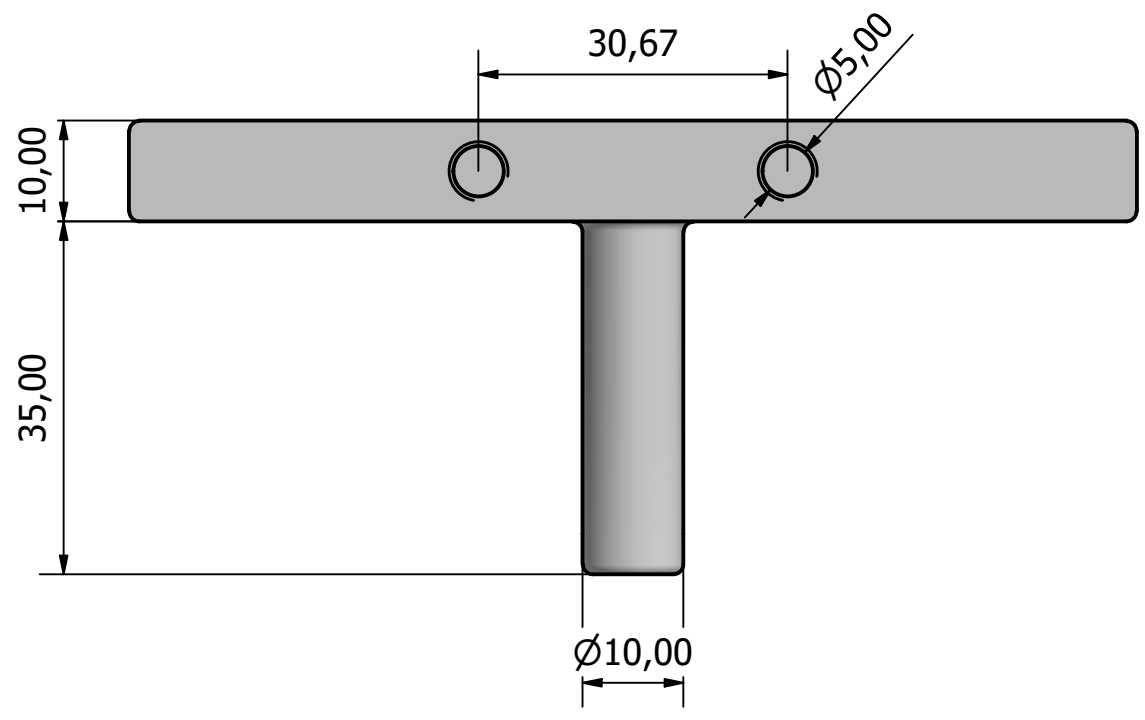
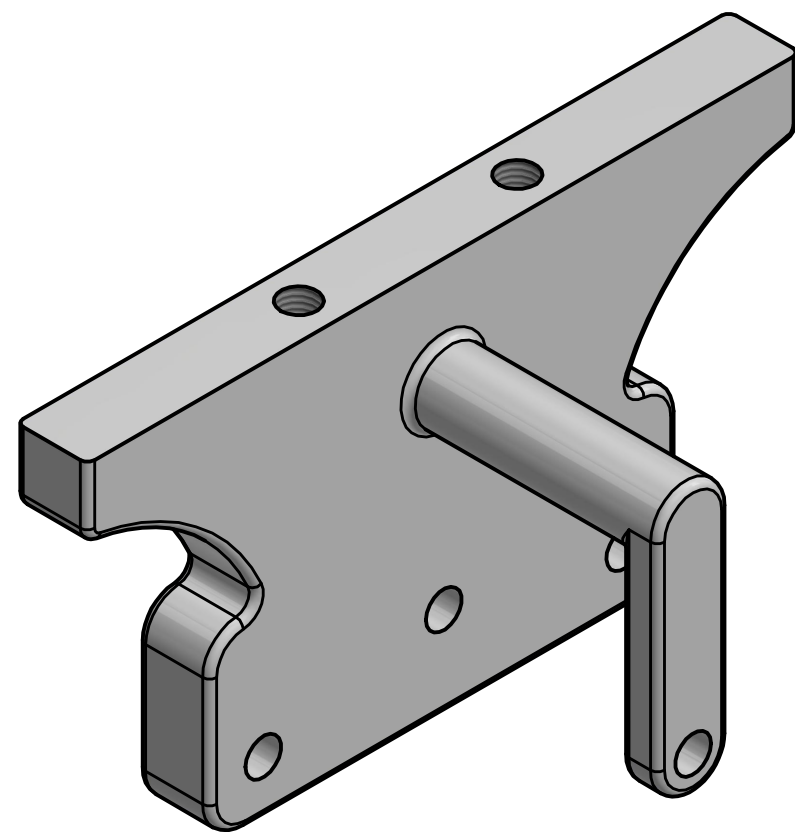
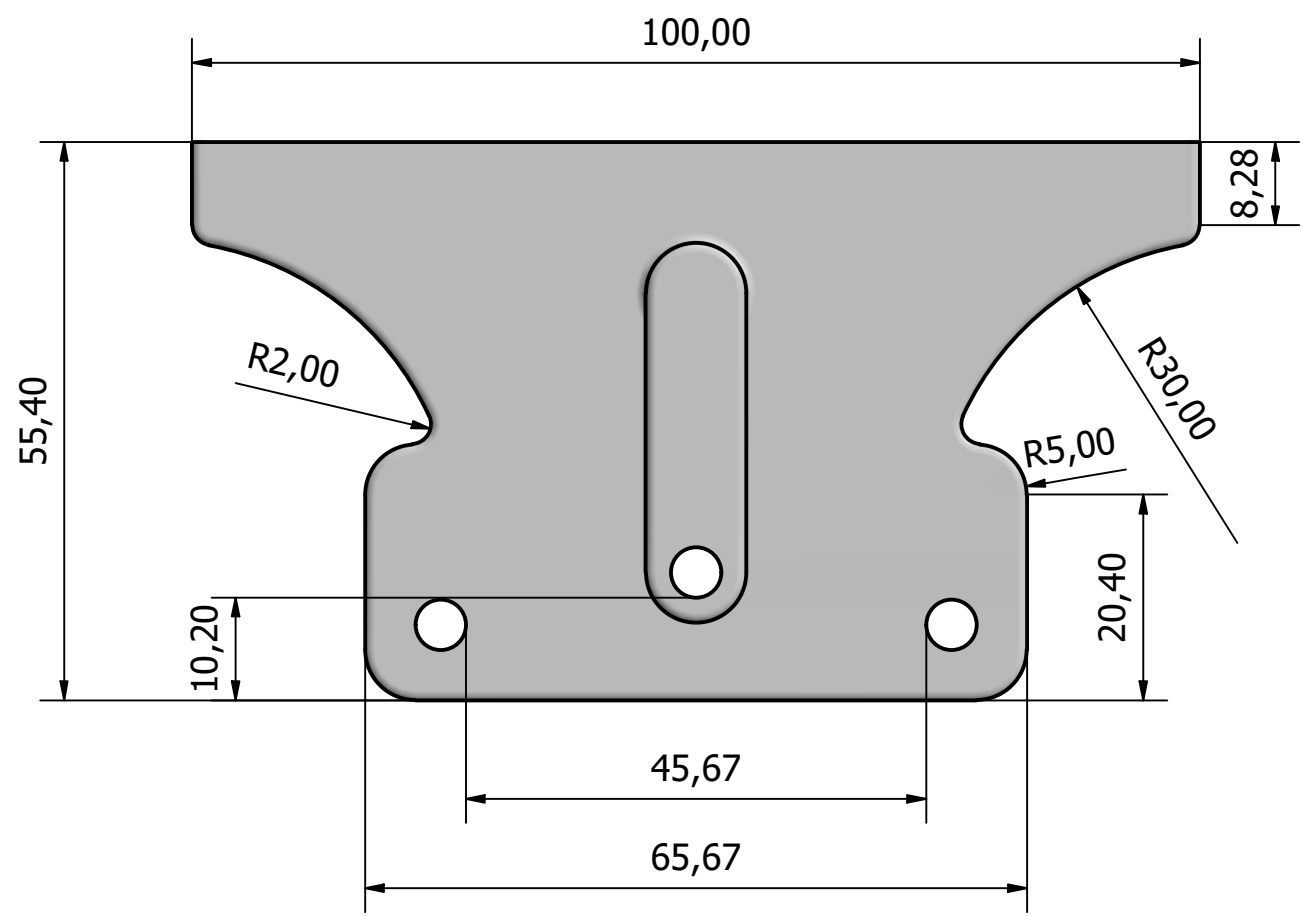
A

A

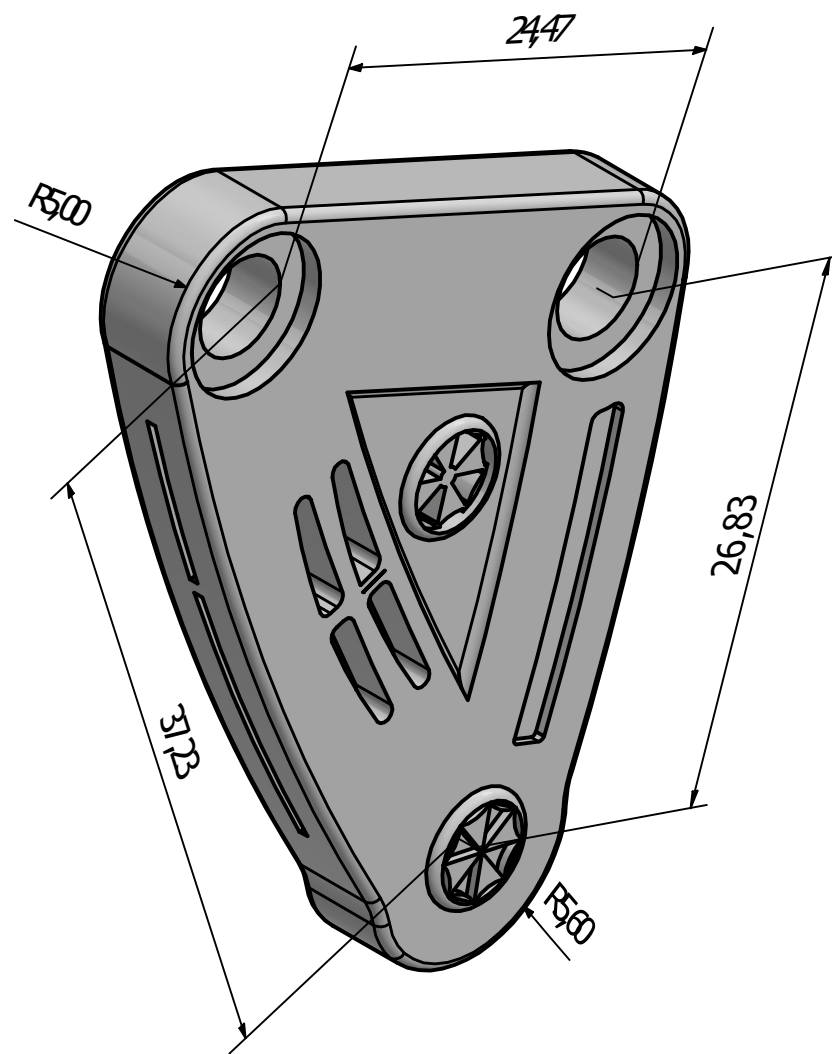
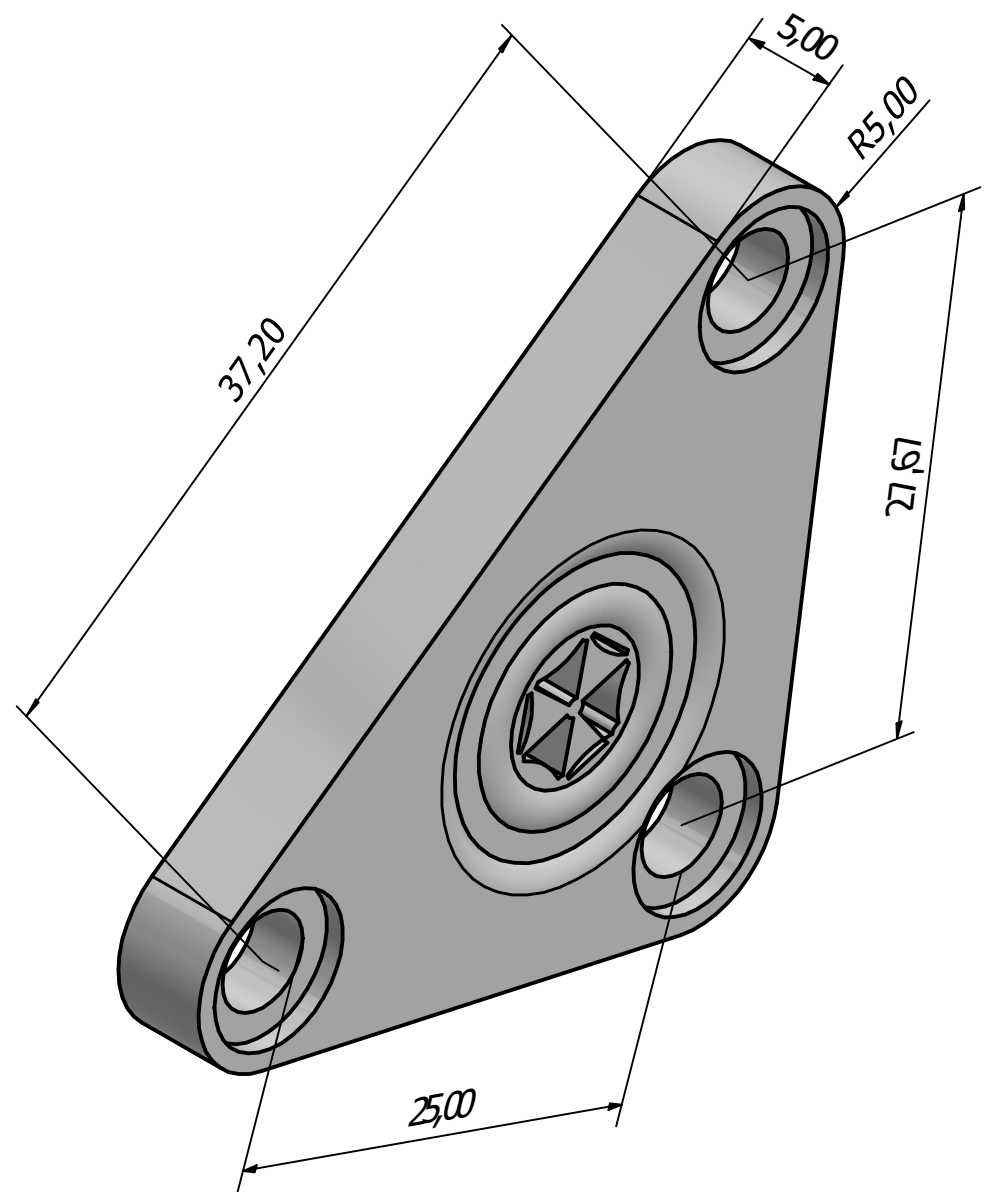


Diseño de james	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 9/3/2021	
			Edición	Hoja 1 / 1	

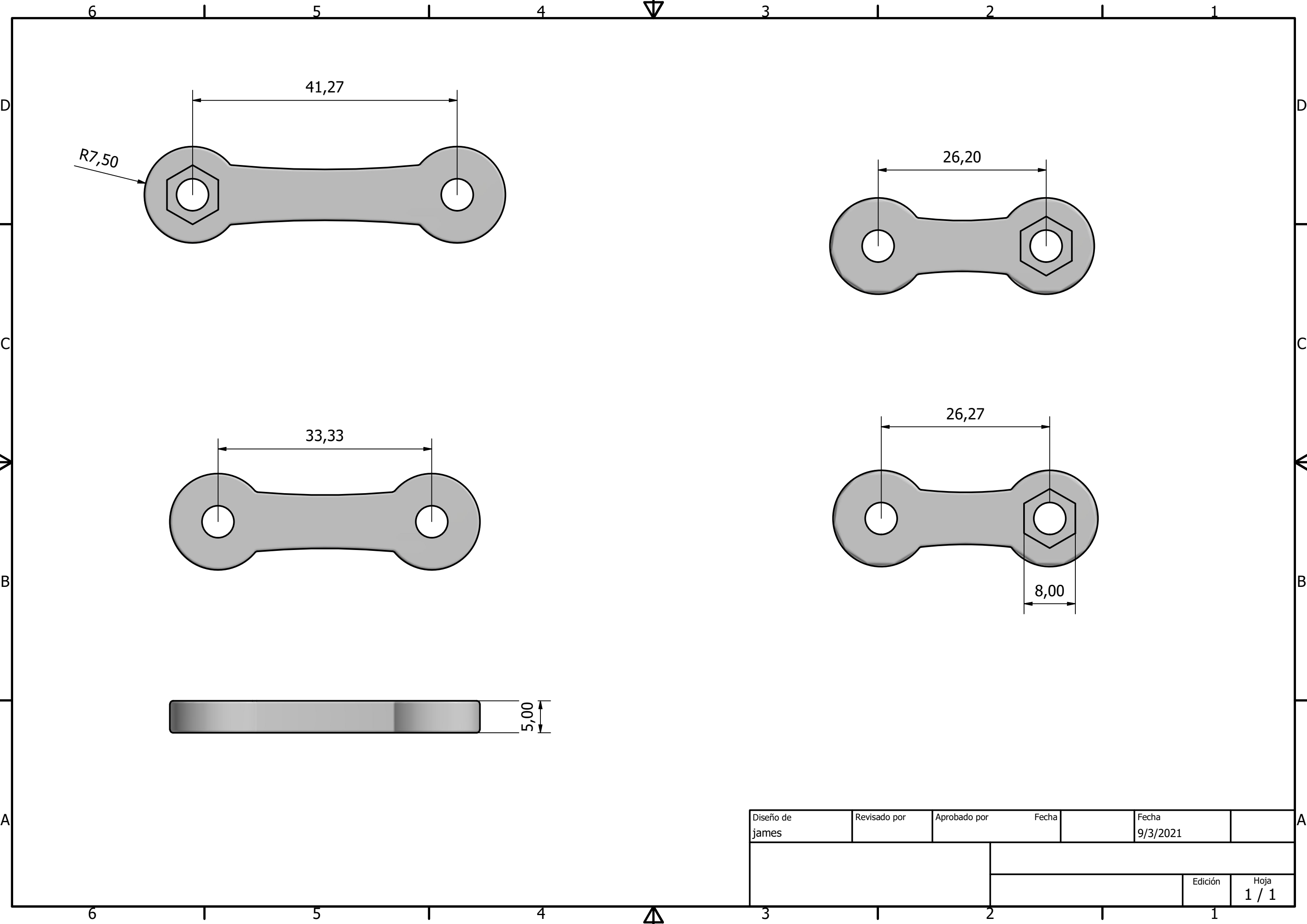
6 5 4 3 2 1



Diseño de james	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 9/3/2021	
			Edición	Hoja 1 / 1	



Diseño de james	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 9/3/2021	
			Edición	Hoja 1 / 1	



Diseño de james	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 9/3/2021	
			Edición	Hoja 1 / 1	