

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño mecánico y modelado matemático para brazo robótico  
asistencial en cirugía estereotáctica del cerebro.**

Trabajo de graduación presentado por Didier Fernando Salazar Estrada  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño mecánico y modelado matemático para brazo robótico  
asistencial en cirugía estereotáctica del cerebro.**

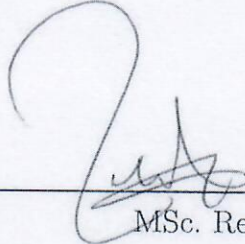
Trabajo de graduación presentado por Didier Fernando Salazar Estrada  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

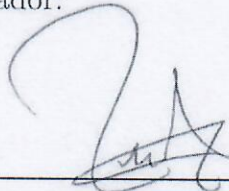
2020

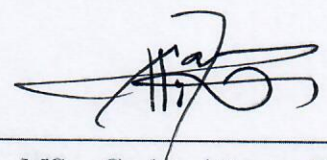


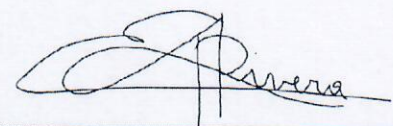
Vo.Bo.:

(f)  RENATO CONEDERA  
09 SEPT 20  
MSc. Renato J. Conedera

Tribunal Examinador:

(f)  RENATO CONEDERA  
09 SEPT 20  
MSc. Renato J. Conedera

(f)   
MSc. Carlos Alberto Esquit

(f)   
Dr. Luis Alberto Rivera

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2019.



La elaboración de la presente tesis surgió del interés personal de aplicar lo aprendido de robótica durante la carrera para ayudar a personas en el ámbito médico. De esta manera, mi principal reto en esta investigación consistió en poder utilizar los materiales a disposición para lograr un diseño de un prototipo robusto, el cual pudiese ser utilizado para hacer pruebas preliminares y así ser utilizado como base para la estructura final que pueda ser utilizado en una sala de operaciones. Cabe denotar que este proyecto ha sido apoyado por la organización HUMANA en coalición con la Universidad del Valle de Guatemala, bajo la dirección de Dr. Juan Carlos Lara Girón en la especificación de lo que se deseaba trabajar. Agradezco a mis padres por apoyarme tanto moral y económicamente durante mi carrera y a mis hermanas por siempre estar ahí cuando las necesitaba. Agradezco también a MSc. Renato J. Conedera y a MSc. Miguel Enrique Zea Arenales por sus asesorías en la delimitación y en sus guías tanto para la presente tesis como para el prototipo físico realizado.



<b>Prefacio</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XIV</b>
<b>Resumen</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Tecnología ROSA . . . . .	3
2.2. Tecnología NeuroMate . . . . .	4
2.3. Tecnología PathFinder . . . . .	4
2.4. Tecnología Da Vinci . . . . .	5
<b>3. Justificación</b>	<b>7</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>9</b>
4.1. Objetivo general . . . . .	9
4.2. Objetivos específicos . . . . .	9
<b>5. Alcance</b>	<b>11</b>
<b>6. Marco teórico</b>	<b>13</b>
6.1. Epilepsia . . . . .	13
6.1.1. Tipos de crisis epilépticas . . . . .	13
6.1.2. Diagnóstico de la epilepsia . . . . .	14
6.1.3. Tratamiento de la epilepsia . . . . .	14
6.1.4. Cirugía estereotáctica . . . . .	15
6.2. Robótica . . . . .	15
6.3. Juntas robóticas . . . . .	15

6.4. Cinemática directa . . . . .	16
6.5. Matriz Denavit-Hartenberg . . . . .	16
6.6. Momento de una fuerza con respecto a un punto . . . . .	17
6.7. Análisis de esfuerzos . . . . .	18
6.7.1. Esfuerzo de Von Mises . . . . .	18
6.8. Norma ASTM D638 . . . . .	19
6.8.1. Límite elástico . . . . .	19
6.8.2. Módulo de elasticidad . . . . .	19
6.8.3. Coeficiente de poisson . . . . .	19
6.8.4. Resistencia última a la tracción . . . . .	19
6.9. Norma ASTM D790 . . . . .	19
6.9.1. Módulo de flexión . . . . .	19
6.9.2. Módulo secante . . . . .	19
6.9.3. Módulo de cuerda . . . . .	20
6.9.4. Resistencia a la flexión . . . . .	20
<b>7. Diseño mecánico del brazo robótico según iteraciones</b>	<b>21</b>
7.1. Análisis cinemático del brazo robótico varioguide . . . . .	21
7.1.1. Matriz de Denavit-Hartenberg . . . . .	22
7.2. Modelo cinemático en MATLAB . . . . .	23
7.3. Primer prototipo del diseño mecánico . . . . .	25
7.4. Segundo prototipo del diseño mecánico . . . . .	28
7.5. Ensayos de tracción y flexión para material PLA . . . . .	30
7.5.1. Objetivo . . . . .	30
7.5.2. Materiales . . . . .	31
7.5.3. Procedimiento . . . . .	32
7.5.4. Resultados . . . . .	35
7.5.5. Discusión . . . . .	39
7.6. Tercer prototipo del diseño mecánico . . . . .	39
7.7. Cuarto prototipo del diseño mecánico . . . . .	44
7.8. Análisis del torque sobre los servomotores . . . . .	49
<b>8. Conclusiones</b>	<b>55</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>57</b>
9.1. Material . . . . .	57
9.2. Direcciones alternativas en el diseño . . . . .	57
<b>10. Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>11. Anexos</b>	<b>63</b>
11.1. Tablas de datos sobre los ensayos de esfuerzos . . . . .	63
11.2. Planos de construcción . . . . .	66
11.3. Análisis de esfuerzos en Inventor . . . . .	91

---

## Lista de figuras

---

1.	Brazo robótico ROSA [2]. . . . .	3
2.	Brazo robótico Neuromate [3]. . . . .	4
3.	Robot PathFinder [5]. . . . .	5
4.	Robot de cirugía Da Vinci [6]. . . . .	5
5.	Cadena cinemática de un conjunto de eslabones [13]. . . . .	16
6.	Brazo robótico PUMA sin analizar [14]. . . . .	16
7.	Brazo robótico PUMA con sus juntas analizadas según la cadena cinemática [14]. . . . .	17
8.	Momento $M_O$ resultante de una fuerza $F$ aplicada a un brazo $r$ y un ángulo $\theta$ [15]. . . . .	18
9.	Esfuerzo de un objeto rígido [17]. . . . .	18
10.	Brazo mecánico Varioguide, el cual se posee para realizar las operaciones actualmente [21]. . . . .	21
11.	Diagrama cinemático del brazo mecánico. . . . .	22
12.	Brazo robótico simulado en el software proveido por MATLAB. . . . .	23
13.	Inicio de simulación de la secuencia de movimiento del brazo mecánico. . . . .	24
14.	Secuencia de movimiento simulada en MATLAB, en orden de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha. . . . .	24
15.	Ensamble del primer prototipo del brazo robótico creado en inventor. . . . .	25
16.	Ensamble del primer prototipo del brazo robótico físico. . . . .	25
17.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 1, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	26
18.	Desplazamiento de la estructura con la gravedad desde la parte superior. . . . .	27
19.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 1, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	27
20.	Desplazamiento de la estructura con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	27
21.	Ensamble de la segunda versión del brazo robótico creado en inventor. . . . .	28
22.	Ensamble físico del segundo prototipo del brazo robótico. . . . .	28
23.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 2, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	29

24.	Desplazamiento de la estructura del segundo prototipo con la gravedad desde la parte superior. . . . .	29
25.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 2, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	29
26.	Desplazamiento de la estructura del segundo prototipo con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	30
27.	Medidas del modelo general de las probetas para el ensayo de tracción. . . . .	31
28.	Medidas del modelo general de las probetas para el ensayo de flexión. . . . .	31
29.	Probetas impresas utilizadas para el ensayo a tensión. . . . .	31
30.	Probetas impresas utilizadas para el ensayo a flexión. . . . .	32
31.	Sistema configurado para realizar el ensayo a flexión [26] . . . . .	34
32.	Equipo y configuración utilizada para el ensayo a tensión. . . . .	35
33.	Equipo y configuración utilizada para el ensayo a flexión visto lateralmente. . . . .	35
34.	Probetas llevadas al punto de rotura mediante el ensayo a tracción. . . . .	36
35.	Probetas llevadas al punto de rotura mediante el ensayo a flexión. . . . .	36
36.	Gráfica esfuerzo/deformación de los ensayos a tracción de todas las probetas. . . . .	37
37.	Diseño mecánico del tercer prototipo. . . . .	40
38.	Tercer prototipo ensamblado en físico. . . . .	40
39.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	41
40.	Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	41
41.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	41
42.	Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	42
43.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	42
44.	Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	42
45.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	43
46.	Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	43
47.	Diseño mecánico del cuarto prototipo. . . . .	44
48.	Cuarto prototipo ensamblado en físico. . . . .	45
49.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	45
50.	Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	45
51.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	46
52.	Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	46
53.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	46
54.	Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	47

55.	Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.	47
56.	Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.	47
57.	Coefficiente de seguridad de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	48
58.	Coefficiente de seguridad de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	48
59.	Coefficiente de seguridad del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior. . . . .	49
60.	Coefficiente de seguridad del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral. . . . .	49
61.	Modelo de un servomotor Dynamixel AX-12A diseñado para simular la estructura en inventor [27]. . . . .	50
62.	Modelo de un servomotor Dynamixel MX-106T diseñado para simular la estructura en inventor[28]. . . . .	50
63.	Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del primer prototipo cuando está completamente horizontal. . . . .	52
64.	Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del segundo prototipo cuando está completamente horizontal. . . . .	52
65.	Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del tercer prototipo cuando está completamente horizontal. . . . .	52
66.	Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del cuarto prototipo cuando está completamente horizontal. . . . .	52
67.	Diagrama para el análisis del ángulo de trabajo de la estructura, donde 'L' representa la longitud total medida desde el servomotor base y $\alpha$ representa el ángulo de trabajo. . . . .	53
68.	Servomotor MKS HBL388 [29]. . . . .	58



---

## Lista de cuadros

---

1.	Matriz Denavit - Hartenberg Brazo Robótico PUMA . . . . .	17
2.	Matriz Denavit - Hartenberg Brazo Robótico Varioguide . . . . .	23
3.	Propiedades mecánicas a utilizar en la simulación para material MDF, proveídas por Autodesk inventor . . . . .	26
4.	Propiedades mecánicas teóricas que posee el PLA trabajado por inyección . . . . .	30
5.	Datos de las probetas utilizados en los cálculos . . . . .	32
6.	Parámetros utilizados en la impresora 3D Ultimaker 3 . . . . .	32
7.	Velocidad a la que se trabajaron los ensayos con la compresora universal . . . . .	33
8.	Densidad relativa encontrada experimentalmente para las probetas utilizadas en el ensayo a tracción . . . . .	36
9.	Coefficiente de poisson encontrado experimentalmente . . . . .	37
10.	Resistencia última a la tracción del material encontrado a través de los ensayos . . . . .	37
11.	Módulo de Young y de corte encontrado experimentalmente . . . . .	38
12.	Densidad relativa encontrada experimentalmente para las probetas utilizadas en el ensayo a flexión . . . . .	38
13.	Resistencia última a la flexión del material encontrado a través de los ensayos . . . . .	38
14.	Parámetros encontrados en el ensayo a tensión de la probeta con relleno del 100%, se utilizan en las simulaciones de inventor . . . . .	39
15.	Comparación de resultados de la simulación con material PLA de datos teóricos contra el PLA encontrado en los ensayos con 100% de relleno para el prototipo 3 . . . . .	43
16.	Comparación de resultados de los tres diferentes prototipos . . . . .	43
17.	Comparación de resultados de la simulación con material PLA de datos teóricos contra el PLA encontrado en los ensayos con 100% de relleno para el prototipo 3 . . . . .	47
18.	Comparación de resultados con material PLA modelado con 100% de relleno, entre el tercer prototipo y el cuarto . . . . .	48
19.	Valores de masa obtenidos desde iProperties en inventor . . . . .	50
20.	Cantidad de servomotores utilizados en cada prototipo . . . . .	50
21.	Valores dados por el proveedor sobre cada motor . . . . .	51
22.	Masa total de la estructura extraída desde iProperties de cada ensamblaje en Autodesk Inventor . . . . .	51

23.	Datos usados para calcular el peso a analizar en el análisis de torque del servomotor de la segunda junta . . . . .	51
24.	Análisis de torques máximos que soportan los servomotores en la base y los ángulos recomendados donde se cumple un quinto del torque máximo de los mismos . . . . .	53
25.	Análisis de peso de las piezas sobre el total que pesa la estructura en conjunto con los servomotores . . . . .	54
26.	Tabla de deformación lateral de las probetas durante el ensayo de tensión . . .	63
27.	Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 100 % a 60 % para ensayos de tensión . . . . .	64
28.	Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 50 % a 10 % para ensayos de tensión . . . . .	65
29.	Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 100 % a 60 % para ensayos de flexión . . . . .	65
30.	Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 50 % a 10 % para ensayos de flexión . . . . .	66

Este trabajo de tesis consiste en un brazo electromecánico para asistir en la inserción de electrodos durante una cirugía invasiva de localización de puntos focales epilépticos. El brazo electromecánico consistirá de un sistema de control en el que motores de precisión serán los actuadores y un joystick será el controlador de todos sus movimientos. Este trabajo se enfoca en el módulo de la construcción mecánica de dicho brazo, el cual se basa en la construcción en la simulación del movimiento del mismo en MATLAB, tomando en cuenta las etapas de ajuste del brazo Varioguide, para luego construir un diseño en inventor enfatizado en un peso ligero, robustez y similitud con el brazo original. Se realizaron 4 prototipos de los cuales se comparó como iba mejorando cada uno con análisis de esfuerzos calculados en Autodesk Inventor según el desempeño de las estructuras diseñadas y la implementación física de dichas estructuras para probar los otros dos módulos relacionados al proyecto. De las 4 iteraciones, las primeras 2 fueron realizadas con material MDF y las siguientes 2 impresas en PLA, donde se realizaron ensayos de tracción y flexión para el material impreso en las últimas 2 iteraciones para comparar los resultados físicos con los simulados en Autodesk Inventor.



This thesis work consists of an electromechanical arm to assist in the insertion of electrodes during an invasive surgery to locate epileptic focal points. The electromechanical arm will consist of a control system in which precision motors will be the actuators and a joystick will be the controller of all its movements. This work focuses on the module of the mechanical construction of said arm, which is based on the construction in the simulation of its movement in MATLAB, taking into account the adjustment stages of the Varioguide arm, and then constructing an Autodesk Inventor design emphasized in a light weight, robustness and similarity with the original arm. Four prototypes were made of which it was compared as each one improved with an analysis of stress calculated in inventor according to the performance of the designed structures and the physical implementation of said structures to test the other two modules related to the project. Of the 4 iterations, the first 2 were made with MDF material and the following 2 were made with impressions in PLA, where tensile and flexural tests were carried out for the printed material in the last 2 iterations to compare the physical results with those simulated in Autodesk Inventor.



En Guatemala, el tratamiento de la epilepsia se da en el Centro de Epilepsia y Neurocirugía Funcional HUMANA. La epilepsia puede tratarse con terapias, dietas o cirugías cerebrales en último caso siempre y cuando esta no afecte funciones vitales del órgano. Un tipo de proceso quirúrgico común es la cirugía estereotáctica del cerebro en la que se ingresan distintas mediciones de electroencefalogramas, tomografías y demás exámenes en un sistema de navegación para que este localice los puntos focales de la epilepsia y se puedan insertar electrodos en los mismos. El proyecto ROSA de Stanford realiza la navegación e inserción de electrodos de manera automática con un brazo robótico. Actualmente en HUMANA se realiza la inserción de electrodos en cirugía estereotáctica del cerebro con el brazo mecánico Varioguide utilizando el sistema de navegación BrainLab Vector Vision 2008 como guía. El hecho de que el brazo sea mecánico y se ajuste de manera manual provoca que los tiempos de operación sean mayores al igual que la fatiga en el doctor que realiza el ajuste. HUMANA se comunicó con la Universidad del Valle de Guatemala para buscar realizar que el sistema que poseen se parezca más al del proyecto ROSA. Entonces, el presente proyecto consiste en la construcción de un brazo electromecánico para asistencia en la inserción de electrodos durante cirugía invasiva del cerebro. El brazo se coloca sobre el punto de inserción siguiendo un proceso de cuatro etapas dado por BrainLab Vector Vision 2008. Ambos sistemas deben ser compatibles por lo que el brazo a diseñar poseerá ocho grados de libertad. El último acople del brazo por su baja complejidad de ajuste se pretende emular como estático para este concepto de brazo robótico, donde en futuras iteraciones se pretende diseñar un acople para que utilice la del brazo mecánico original junto con la antena para que pueda reconocer las coordenadas y orientación del brazo. HUMANA no desea cambiar de sistema por los costos que conlleva por lo que en el presente proyecto el brazo se robotiza y se maneja con un mando de control, ya que no puede automatizarse debido a la complejidad de obtener la retroalimentación de posición actual desde el sistema existente. El nuevo brazo se controla con servos de la familia AX y MX, y cuenta con estructura propia exceptuando la antena de Varioguide.



## 2.1. Tecnología ROSA

La más reciente innovación en neurocirugía es sin duda el asistente robótico de cirugías ROSA, ya que puede asistir a cirujanos en operaciones no tan invasivas para epilepsia y otras afecciones neurológicas de forma precisa y que brinda seguridad a los pacientes de ser operados en una zona tan delicada del cuerpo como lo es el cerebro (ver Figura 1). No solo reduce el tiempo de operación, sino que producto de esto, los pacientes usan menos anestesia, por lo que pueden recuperarse más rápido; también se reducen los medicamentos para el dolor que deben tomarse luego de la operación, debido a que el asistente robótico brinda una operación mínimamente invasiva [1]. Dentro de los estudios que se han hecho con esta tecnología se tiene uno donde se deseaba determinar la viabilidad de la colocación de un catéter de ablación con láser estereotáctico en una lesión cerebral con el uso de asistencia robótica, de manera segura, precisa, eficiente y mínimamente invasiva. La técnica utilizada, usando la combinación de la ablación láser de Visualase, el robot ROSA y una resonancia magnética intraoperativa facilitó un enfoque seguro, eficaz, eficiente y mínimamente invasivo que podría usarse para la colocación de 1 o múltiples electrodos en el futuro [2].



Figura 1: Brazo robótico ROSA [2].

## 2.2. Tecnología NeuroMate

El robot asistivo estereotáctico NeuroMate se especializa en neurocirugía que se usa para insertar electrodos para estimulación profunda del cerebro, estéreo-electroencefalografía, entre otras aplicaciones (ver Figura 2) [3]. Uno de los estudios que se han hecho con este robot muestra su aplicación con un sistema de registro ultrasónico sin marco, esto para evaluar su desempeño en neurocirugía funcional. Se encontró que tiene una exactitud de 1.29 mm, datos demostrados a través de 153 neurocirugías, incluyendo 113 implantes de estimulador en el cerebro profundo [4]. El robot demostró tener suficiente exactitud para un rango de neurocirugía funcional.



Figura 2: Brazo robótico Neuromate [3].

## 2.3. Tecnología PathFinder

Se realizó un estudio de la aplicación de este robot en cirugía de epilepsia (ver Figura 3), proveído por la empresa Armstrong Healthcare Ltd, en el cual se utilizan imágenes del cerebro para aplicaciones robóticas. Este utiliza TC reflectivas visibles oficiales. Este es utilizado para operaciones intrusivas para insertar electrodos en sus respectivos focos y localizar el asta temporal. La técnica se utilizó en tres pacientes donde se salvó tiempo operacional comparado a experiencias previas, se encontró que se puede utilizar este robot para poder lograr gran precisión y consistencia para localizar el asta temporal y colocar dichos electrodos. [5].



Figura 3: Robot PathFinder [5].

## 2.4. Tecnología Da Vinci

Se encontró un estudio en el cual se evaluó la viabilidad y seguridad de la neurocirugía "keyhole" asistida por el robot Da Vinci. Este robot no es autónomo, requiere la intervención y toma de decisiones de un profesional para todas sus acciones. Se obtuvo el permiso ético obtenido de la NRES para realizar el estudio. No fue posible pasar el endoscopio y los instrumentos con la técnica adoptada para la craneotomía "keyhole", el endoscopio se tuvo que dejar afuera, limitando la iluminación, magnificación y un ángulo amplio de visualización. En el estudio se concluyó que dicha tecnología no es segura o viable para usar en neurocirugía "keyhole"[6].

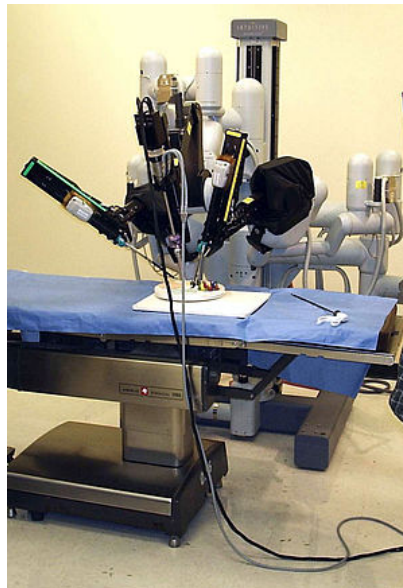


Figura 4: Robot de cirugía Da Vinci [6].



De acuerdo al director de la institución, el Dr. Juan Carlos Lara Girón, la inserción de cada electrodo puede tomar hasta 30 minutos y en ciertos casos se requieren hasta ocho electrodos por paciente, esto puede cuantificarse en cuatro horas de cirugía invasiva del cerebro sin contar los retardos por desgaste del personal médico y esto a su vez provoca una recuperación más tardía en el paciente. Al automatizar este proceso se puede reducir drásticamente la fatiga del doctor, la anestesia utilizada y el tiempo de recuperación del paciente. Adicionalmente, existen sistemas similares siendo implementados en Estados Unidos (Proyecto ROSA); sin embargo, es muy costoso por lo que el presente trabajo presentará una alternativa económica apta para las necesidades del país y que pueda brindar el mismo tipo de seguridad al operar que los proyectos internacionales. Durante reuniones con el Dr. Lara, se solicitó ayuda a la Universidad del Valle de Guatemala para solucionar este problema con la robotización del brazo existente en las instalaciones de HUMANA, sin alterar el sistema Vector Vision y garantizando que el seguimiento en las etapas de ajuste sea el mismo. Dado que no se puede alterar el sistema actual debido a que infringe en los derechos de la institución sobre el equipo e incurriría en gastos adicionales, se descartó la automatización del brazo robótico utilizando la visión de computadora. Entonces, surgió la necesidad de utilizar un mando de control para posicionar el brazo robótico de manera precisa y con un funcionamiento intuitivo para que pueda ser manejado por el Doctor a cargo de la cirugía. Adicionalmente, resulta mandatorio indicar al médico a través de dicho mando el estado mecánico y eléctrico del dispositivo para evitar fallas severas durante la operación quirúrgica. Al poseer el sistema en su totalidad requerimientos muy específicos en cuanto a sus etapas de ajuste, se debe diseñar un mando específico para ello para que el doctor lo encuentre sencillo de utilizar y así alcanzar la máxima eficiencia posible durante la cirugía. En el ámbito personal, el poder ser capaz de hacer uso de la robótica para diseñar el brazo sería el mejor de los placeres, dado que es en el ámbito que me deseo especializar luego de graduarme. Ayudar a Guatemala e inspirar a nuevas personas a estudiar en áreas de la tecnología es también una de mis metas, y pienso que este proyecto puede ser el primer peldaño para lograr lo que me he propuesto.



### 4.1. Objetivo general

- Construir un brazo robótico con ayuda de un diseño en Autodesk Inventor y Matlab a partir del brazo mecánico que posee HUMANA, siguiendo el proceso de ajuste de su equipo BrainLab Vector Vision y hacer más eficiente dicho proceso.

### 4.2. Objetivos específicos

- Brindar una adaptación robótica que se asemeje al brazo que ya posee el equipo de HUMANA en cuanto al tipo de juntas que posee este mismo, utilizando Matlab y Autodesk Inventor.
- Diseñar un sistema mecánico ligero para emular el movimiento del actual brazo mecánico de HUMANA utilizando Autodesk Inventor.
- Lograr un diseño robusto del brazo mecánico considerando diversos factores de seguridad en el proceso de ideación en Autodesk Inventor.



Se pretendió llegar a implementar un brazo robótico el cual fácilmente pueda ser adaptado al brazo mecánico "Varioguide" de navegación craneal que se tiene en la organización HUMANA para operaciones de neurocirugía y epilepsia. La adaptación conllevaría a que los doctores puedan ahorrar tiempo en el posicionamiento de los electrodos en la cabeza del paciente, esto se logra mediante el control de un joystick para mover las partes del brazo deseadas, reduciendo así significativamente el error que obtendrían si lo moviesen con sus manos, que es como actualmente lo hacen. Estos movimientos se realizan tomando en cuenta las fases que manualmente cambian para que puedan visualizar en el software de navegación craneal si se llegó a la posición indicada en su equipo. El ángulo del efector final se seguirá moviendo manualmente, debido a que la complejidad de su corrección no es tan elevada como el resto de los eslabones, dado que solo les toma aproximadamente un minuto su ajuste. Todo esto conlleva a un diseño mecánico que pueda soportar las perturbaciones de los movimientos de todos los eslabones, su estabilidad tiene que venir con relación tanto en la estructura y el material utilizado, porque debía poder aguantar su propio peso y los movimientos internos observándose un movimiento limpio y preciso. Se pretendió realizar un prototipo con el cual realizar pruebas preliminares que sirvan como base a un trabajo futuro donde se diseñe la estructura final, la cual debe poder ser lo suficientemente robusta para poder brindar seguridad tanto a los doctores como al paciente, para que de esta forma también se observe una eficiencia evidente cuando se compara el procedimiento manual y el robotizado a la hora de llegar al paso de inserción del electrodo en el cráneo del paciente.



## 6.1. Epilepsia

La epilepsia se define como un trastorno neurológico crónico en el que las neuronas cerebrales transmiten señales de manera anormal causando convulsiones y pérdida de conciencia. Las neuronas se comunican a través de impulsos eléctricos, pero durante un ataque, varias neuronas envían señales llegando a la tasa de 500 veces por segundo. Este sobre envío de señales puede provocar que el paciente sufra de movimientos involuntarios y pérdida temporal del conocimiento. Estas convulsiones o crisis generalmente duran unos breves minutos [7].

En la mayoría de los casos se desconoce la causa de la epilepsia. En caso de conocerse, las causas varían entre las cuales las razones más destacables son: factores genéticos, anomalías en el desarrollo del cerebro, infección, lesión cerebral traumática, accidente cerebrovascular o tumores cerebrales. En el caso que la epilepsia esté provocada por lesión o motivos fuera de lo genético, ésta puede ser tratada y detener las crisis, aunque la posibilidad de lo mismo sea incierta [7].

### 6.1.1. Tipos de crisis epilépticas

Los ataques epilépticos se suelen dividir en dos grandes ramas: crisis focales y crisis generalizadas. Las crisis focales se originan en una parte del cerebro. Generalmente las crisis focales diagnosticadas son las del lóbulo frontal y lóbulo temporal medial. Las crisis focales pueden categorizarse como crisis focales sin pérdida de conocimiento y crisis focales con alteración de la conciencia. El primer tipo de convulsión puede afectar motricidad, sentimientos y sensaciones mientras que el segundo tipo puede provocar que se realicen movimientos repetitivos. Cabe mencionar que justo previo a una crisis focal puede sentirse un aura que es básicamente una crisis focal sin pérdida de conocimiento que advierte la ocurrencia de una crisis focal mayor. Las crisis generalizadas se producen en todas las áreas del cerebro. Se clasifican en seis tipos principales. Las crisis de ausencia se caracterizan por episodios de mirada fija y movimientos corporales sutiles. Las crisis tónicas causan rigidez muscular y pueden ocasionar caídas. Las crisis atónicas causan la pérdida del control

muscular por lo que se corre el riesgo de un colapso repentino. Las crisis clónicas producen movimientos musculares espasmódicos repetitivos. Las crisis mioclónicas se caracterizan por movimientos espasmódicos breves y repentinos. Las crisis tonicoclónicas se considera el tipo de ataque más intenso debido a que puede provocar pérdida abrupta del conocimiento, rigidez, sacudidas de cuerpo, pérdida de control de la vejiga y mordeduras de lenguas [7].

### 6.1.2. Diagnóstico de la epilepsia

Existen distintos métodos y pruebas para diagnosticar la epilepsia y el tipo de epilepsia para conocer como se puede tratar el problema [8].

- **Electroencefalograma (EEG):** Se fijan electrodos en el cuero cabelludo del paciente para medir la actividad eléctrica cerebral. El fin de este método es detectar la zona de origen de las crisis focales.
- **Electroencefalografía de alta densidad:** Se colocan los electrodos a una menor distancia para conocer con mayor precisión la zona de origen de las convulsiones. En algunos casos pueden colocarse los electrodos de manera invasiva en el cerebro del paciente para detectar zonas de origen de convulsiones en las partes medias y bajas del órgano
- **Tomografía computarizada (TC):** Obtiene imágenes transversales del cerebro con el uso de rayos X. Con este método pueden encontrarse tumores, quistes, sangrados, etc. en el cerebro que pueden estar causando las convulsiones.
- **Resonancia magnética (RM):** Con ondas de radio e imanes se puede crear una vista detallada del cerebro. Al igual que la tomografía, puede ayudar a detectar anomalías que causen las convulsiones.
- **Resonancia magnética funcional (RMf):** Mide cambios en el flujo sanguíneo que ocurren debido a actividad cerebral. La RMf se utiliza principalmente para hallar áreas funcionales del cerebro para evitar extirparlas durante la cirugía.
- **Tomografía por emisión de positrones (TEP):** Se utiliza una pequeña dosis de material radioactivo para visualizar áreas del cerebro.
- **Tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT):** Igualmente al TEP, inyecta una baja dosis de material radioactivo en la vena para generar un mapa tridimensional de las regiones cerebrales. El fin es detectar el flujo sanguíneo del cerebro durante una convulsión.

### 6.1.3. Tratamiento de la epilepsia

La epilepsia puede tratarse a través de medicamentos, cirugía, dietas o terapias como la estimulación del nervio vago. La opción química suele ser la primera en aplicarse y en caso de fracasar -la epilepsia es resistente contra los fármacos- puede evaluarse si es viable una cirugía invasiva. El proceso preoperatorio requiere conocer de la ruta de ingreso al cerebro y de la fuente focal de epilepsia en el paciente con alguno de los exámenes mencionados anteriormente. En algunos casos incluso puede ser conveniente realizar una EEG invasiva para poder encontrar el origen del problema de manera más precisa [8].

#### 6.1.4. Cirugía estereotáctica

Es un tipo de cirugía común para la epilepsia y es el utilizado por HUMANA en Guatemala. Se basa en encontrar una correlación entre el espacio físico y el espacio de imagen, en utilizar un dispositivo señalador para la interacción con el sistema y en obtener retroalimentación de imagen para guiar el sistema de inserción de electrodos utilizando una interfaz de computadora. Puede utilizarse un marco o no para sostener la cabeza del paciente en un punto de referencia. En caso de no sostenerse, debe colocarse una antena como referencia para que el sistema de imagen pueda correlacionar el espacio. En el sistema de imagen deben colocarse los resultados de alguno de los exámenes mencionados anteriormente para que pueda reconstruirse la cabeza del paciente y asignarse con detalle la ruta de inserción de cada electrodo. Una vez el sistema de imagen reconstruye la cabeza, guía al doctor en una serie de pasos para que pueda insertarse el electrodo en el mundo físico mientras que le brinda retroalimentación de la posición actual del electrodo con respecto a la cabeza del paciente [9].

### 6.2. Robótica

La robótica es una técnica que aplica la informática al diseño y empleo de aparatos que, en sustitución de personas, realizan operaciones o trabajos, por lo general, en instalaciones industriales[10]. En los últimos años el uso de sistemas automatizados se ha vuelto imprescindible en la industria, dispositivos mecánicos que pueden ser programados para realizar una amplia variedad de aplicaciones se les llama robots industriales, mientras que aquellas que solo realizan una única tarea se consideran de automatización fija [11].

### 6.3. Juntas robóticas

Las juntas robóticas son uniones en las que se unen dos enlaces. No se permiten juntas con un mayor número de enlaces (o eslabones). Las juntas más comunes son [12]:

- **Revoluta:** Consiste en la unión de dos eslabones en un eje. Permite movimiento de rotación alrededor del eje de la junta por lo que posee solo un grado de libertad.
- **Prismática:** Permite movimiento traslacional a lo largo de la dirección de la junta. Posee un grado de libertad.
- **Helicoidal:** Consiste en la unión de dos eslabones con un tornillo. Al girar uno de los eslabones en el tornillo se consigue rotación como con la revoluta con la adición de un movimiento de traslación en la dirección del eje del tornillo. Se considera que tiene solo un grado de libertad ya que la traslación sobre el eje es proporcional a la rotación.
- **Cilíndrica:** Similar a la helicoidal con la diferencia que los movimientos de rotación y traslación son independientes ya que no van unidos por un tornillo. Toma su nombre ya que su extremo puede describir al cuerpo de un cilindro. Tiene dos grados de libertad.
- **Universal:** Está formada por un par de juntas revolutas con ejes ortogonales por lo que tiene dos grados de libertad.
- **Esférica:** Simula la junta de un hombro humano por lo que permite la rotación en cualquiera de los tres ejes rectangulares ortogonales; por consiguiente, cuenta con tres grados de libertad.

## 6.4. Cinemática directa

Un robot puede considerarse como una estructura que basa su movimiento en base a los eslabones u objetos rígidos que la conforman, esta unión es llamada una cadena cinemática. La base del robot se toma como un punto de referencia para poder localizar el resto de los eslabones con respecto a la misma [13].

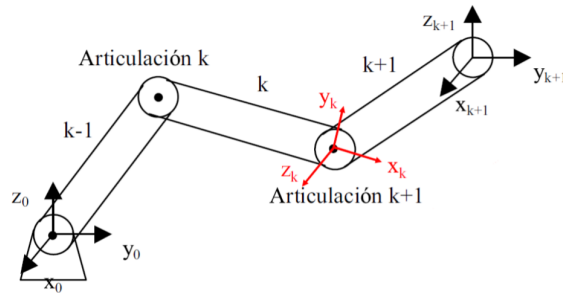


Figura 5: Cadena cinemática de un conjunto de eslabones [13].

## 6.5. Matriz Denavit-Hartenberg

Es una notación sistemática que ayuda a asignar sistemas coordenados, siendo cada fila de la matriz transformaciones entre sistemas coordenados adyacentes que representan las juntas del sistema, y estas pueden ser representadas por una sola matriz homogénea compuesta. El eje 'Z' se usa para representar el giro de una junta revoluta o el desplazamiento lineal de una junta prismática [13].

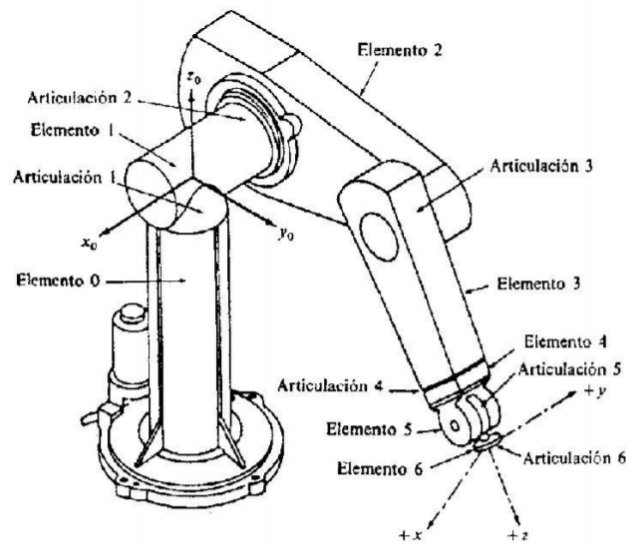


Figura 6: Brazo robótico PUMA sin analizar [14].

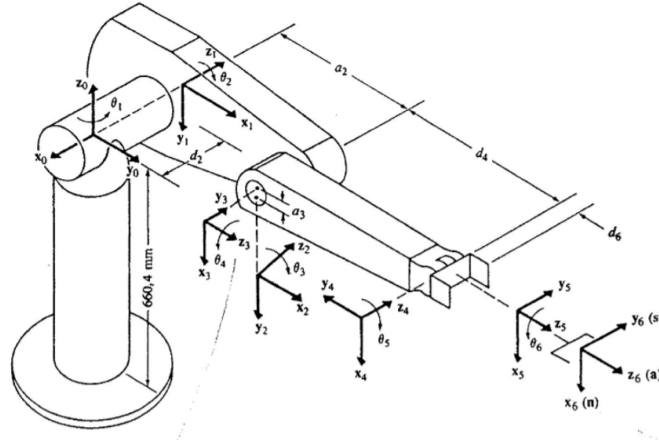


Figura 7: Brazo robótico PUMA con sus juntas analizadas según la cadena cinemática [14].

Juntas	$\theta$	d	a	$\alpha$
1	$\theta_1 + 90^\circ$	$d_2$	$a_2$	$-90^\circ$
2	$\theta_2$	0	$a_3$	$0^\circ$
3	$\theta_3 + 90^\circ$	0	0	$90^\circ$
4	$\theta_4$	$d_4$	0	$-90^\circ$
5	$\theta_5$	0	0	$90^\circ$
6	$\theta_6$	$d_6$	0	$0^\circ$

Cuadro 1: Matriz de Denavit-Hartenberg perteneciente al análisis cinemático del brazo robótico PUMA.

## 6.6. Momento de una fuerza con respecto a un punto

Una fuerza aplicada a una distancia o 'brazo' de un punto a medir resulta en una magnitud perpendicular al plano que contiene dicho punto y a la fuerza, a este resultado se refiere como 'torque' o 'momento' [15]. El sentido del momento depende de la rotación que se obtiene luego de aplicar la fuerza, un giro contrario al movimiento de las manecillas del reloj se considera como sentido positivo.

$$M_O = r \times F = rF \text{sen}(\theta) = Fd \quad (1)$$

Donde:

' $M_O$ ' es el momento resultante.

' $r$ ' es el brazo al que se aplica la fuerza.

' $F$ ' es la fuerza.

' $\theta$ ' es el ángulo al que se aplica la fuerza.

' $d$ ' es la distancia cuando el ángulo de la fuerza está a  $90^\circ$  del brazo en donde se aplica la fuerza.

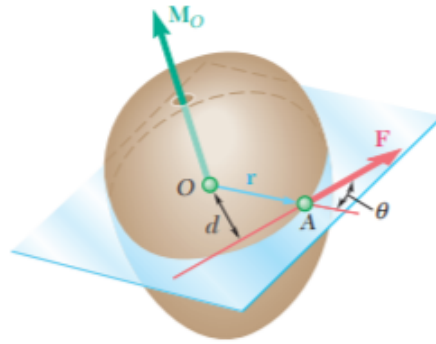


Figura 8: Momento  $M_O$  resultante de una fuerza  $F$  aplicada a un brazo  $r$  y un ángulo  $\theta$  [15].

## 6.7. Análisis de esfuerzos

El esfuerzo se define como una fuerza que actúa sobre un área de una sección transversal de una pieza. La importancia de un análisis de esfuerzos en un estructura radica en que se necesita saber si puede soportar la carga a la que está sometida. Para hacer esto se realizan cálculos manuales o se analiza con software para encontrar el esfuerzo más grande en la estructura y comparar con el esfuerzo último a la tensión del material del que está hecha la misma [16].

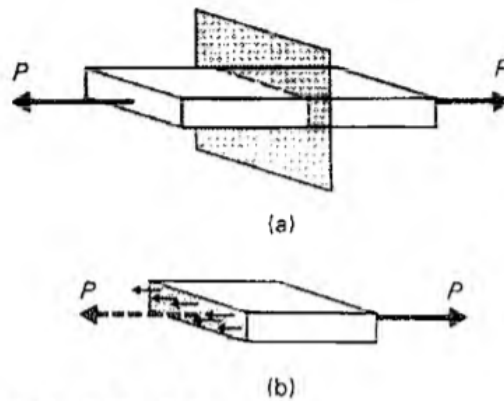


Figura 9: Esfuerzo de un objeto rígido [17].

### 6.7.1. Esfuerzo de Von Mises

Este esfuerzo apodado así en honor al doctor R. Von Mises, quien contribuyó a desarrollar la teoría, es el utilizado en la teoría de la energía de distorsión, no predice falla bajo presión hidrostática pero concuerda con los datos del comportamiento dúctil, es por esto mismo que es la teoría más utilizada para los materiales dúctiles y se recomienda para los problemas de diseño, a menos que se especifique otra cosa. La ecuación de diseño es la siguiente:  $\sigma' = \frac{S_y}{n}$  donde ' $S_y$ ' indica la resistencia a la fluencia del material y ' $n$ ' indica el factor de seguridad del mismo [18].

## **6.8. Norma ASTM D638**

Es la norma más común de ensayos estandar para determinar las propiedades a tensión para plásticos normales o no reforzados [19]. Los ensayos se conducen en una compresora universal para ensayos de tensión a velocidades de 1 a 500 mm/min. Esta prueba mide el límite elástico, el modulo de elasticidad, la elongación del material, el coeficiente de poisson y la resistencia última a la tracción. Esta norma solo aplica a plásticos rígidos entre 1 mm a 14 mm en espesor.

### **6.8.1. Límite elástico**

Es la cantidad de carga que puede aplicarse al material antes de que se estire y que ya no pueda volver a su forma natural [19].

### **6.8.2. Módulo de elasticidad**

Cuando un material se puede deformar en relación a cuanto esfuerzo se le aplica [19].

### **6.8.3. Coeficiente de poisson**

Es una medida de la relación entre cuanto un material se puede estirar a que tan delgado llega a ser luego de este proceso [19].

### **6.8.4. Resistencia última a la tracción**

Es la cantidad de carga que puede aplicarse al material antes de que se rompa [19].

## **6.9. Norma ASTM D790**

Es la norma que se utiliza para determinar las propiedades a flexión de plásticos normales, reforzados, compuestos de alto módulo y materiales de aislamiento eléctrico [20]. Para estos ensayos se puede emplear el método de 3 puntos (2 de apoyo y 1 donde aplica la carga al centro de la probeta) o de 4 puntos (2 de apoyo y 2 de carga distribuidos uniformemente en la probeta). Se pueden utilizar dos procedimientos, el primero emplea una tasa de deformación de 0.01 mm/min. mientras que el segundo utiliza una de 0.10 mm/min, esta última es para materiales que no se rompen luego de una deformación del 5% si se realizan las pruebas a una menor velocidad. Esta prueba mide el módulo a flexión, módulo secante, módulo de cuerda y la resistencia a la flexión.

### **6.9.1. Módulo de flexión**

Es una medida para saber la rigidez del material [20].

### **6.9.2. Módulo secante**

La pendiente entre el origen y un punto predefinido en la curva de carga contra deflexión [20].

### **6.9.3. Módulo de cuerda**

La pendiente entre dos puntos predefinidos en la curva de carga contra deflexión [20].

### **6.9.4. Resistencia a la flexión**

Es la cantidad de carga que puede aplicarse al material a flexión antes de que se rompa [20].

---

## Diseño mecánico del brazo robótico según iteraciones

---

### 7.1. Análisis cinemático del brazo robótico varioguide

Se buscó realizar una adaptación electrónica al brazo mecánico actual (Varioguide), por lo que se usó como base para poder construir los modelos matemáticos requeridos y su diseño mecánico, y así probar su desempeño con los servomotores a utilizar. Se analizó la estructura y la secuencia de movimientos en el que se ajusta el brazo mecánico actual para determinar como se mueven las juntas y proseguir con su modelado mecánico.



Figura 10: Brazo mecánico Varioguide, el cual se posee para realizar las operaciones actualmente [21].

Se observó que posee dos juntas esféricas, 6 juntas revolutas normales y 1 junta prismática, por lo que se procedió a analizar por cinemática directa cada junta del brazo robótico. Las juntas esféricas se modelan como dos juntas revolutas en serie con movimientos Rollz "Pitch" para la implementación en el diseño mecánico físico.

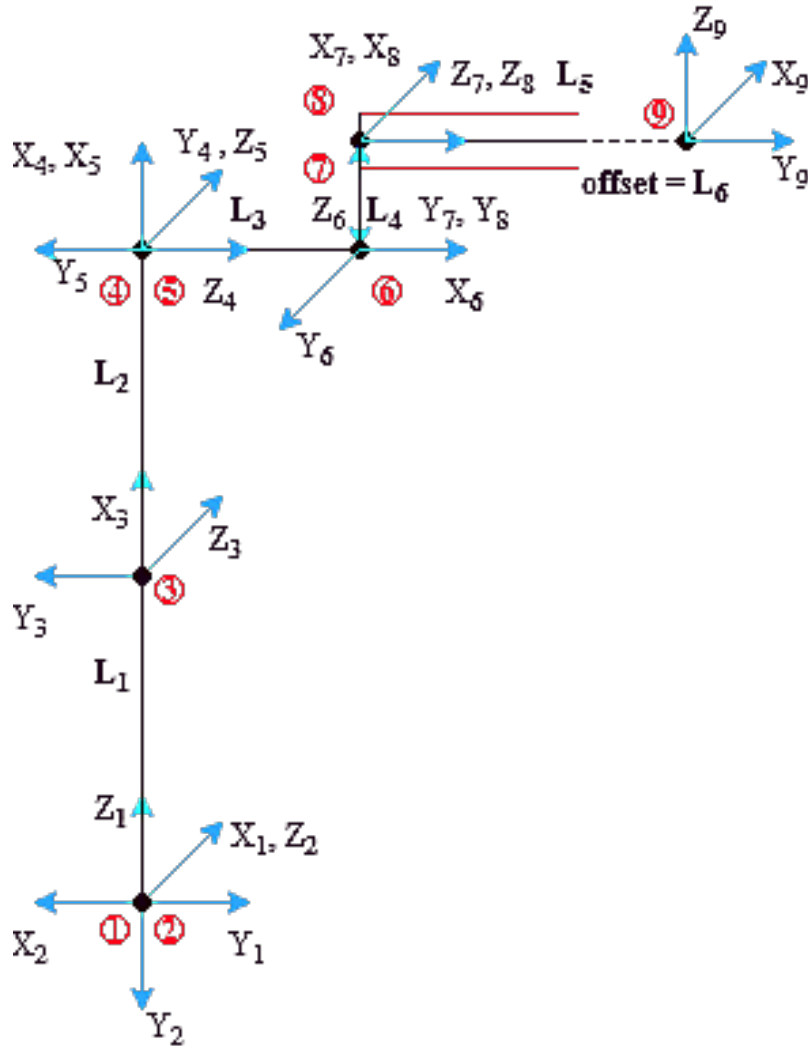


Figura 11: Diagrama cinemático del brazo mecánico.

### 7.1.1. Matriz de Denavit-Hartenberg

Una vez obtenidos los ejes de referencia que corresponden a cada junta del brazo mecánico, se procede a armar la matriz Denavit-Hartenberg correspondiente a los movimientos que se desean tener en las juntas del mismo tomando el eje 'Z' como el de giro o desplazamiento. Las medidas de los largos 'L' observados en la matriz quedan como variables para luego ingresar las dimensiones del brazo 'Varioguide'.

Juntas	$\theta$	d	a	$\alpha$
1	$\theta_1 + 90^\circ$	0	0	$90^\circ$
2	$\theta_2 + 90^\circ$	0	$L_1$	$0^\circ$
3	$\theta_3$	0	$L_2$	$-90^\circ$
4	$\theta_4$	0	0	$90^\circ$
5	$\theta_5 + 90^\circ$	0	$L_3$	$90^\circ$
6	$\theta_6 + 90^\circ$	$L_4$	0	$90^\circ$
7	$\theta_7$	0	0	$0^\circ$
8	$0^\circ$	$d_8 + L_5$	0	$90^\circ$
9	$\theta_9$	0	0	$0^\circ$

Cuadro 2: Matriz de Denavit - Hartenberg perteneciente al análisis cinemático anterior.

## 7.2. Modelo cinemático en MATLAB

La matriz Denavit-Hartenberg se ingresó a un script de MATLAB donde se realizó la cinemática directa para lograr una simulación del brazo robótico a construir [22].

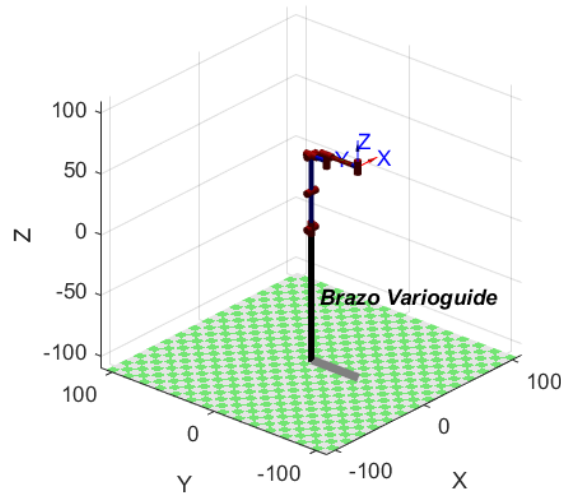


Figura 12: Brazo robótico simulado en el software proveído por MATLAB.

Una vez obtenido el modelo matemático de MATLAB, se procedió a realizar una simulación de la secuencia de movimientos que debe seguir el brazo robótico final. Estos se dividen en 4 secuencias, la primera envuelve a las primeras 5 juntas del brazo, la segunda secuencia radica en la sexta junta, la tercera en la séptima y octava, y la cuarta en la novena. Se simuló tomando como si fuese la cabeza del paciente a una esfera situada al lado del brazo mecánico simulado.

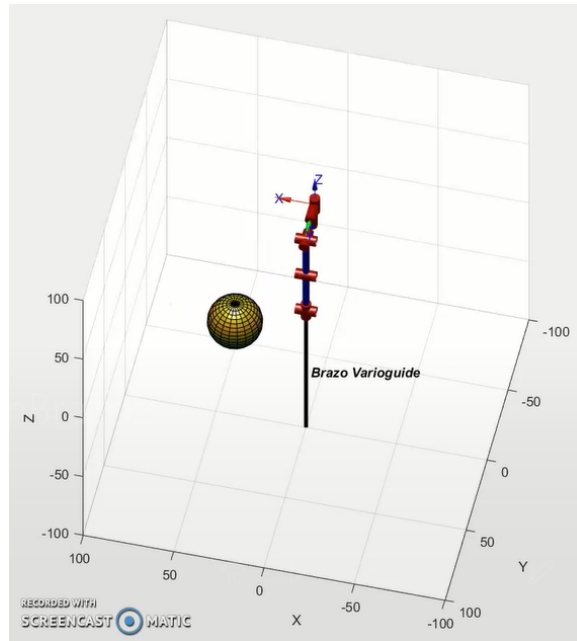


Figura 13: Inicio de simulación de la secuencia de movimiento del brazo mecánico.

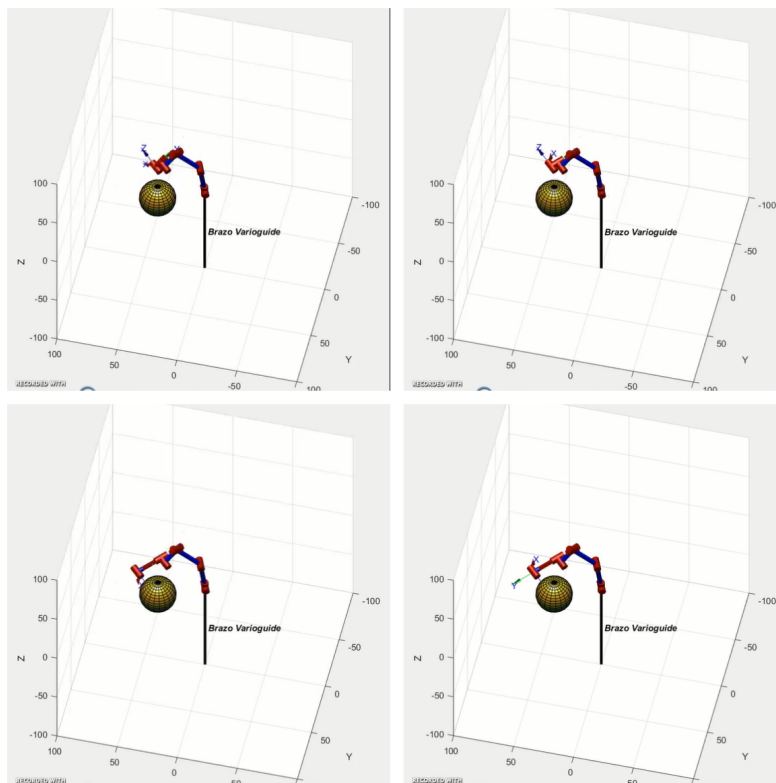


Figura 14: Secuencia de movimiento simulada en MATLAB, en orden de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha.

### 7.3. Primer prototipo del diseño mecánico

Una vez obtenido el modelo matemático simulado en MATLAB se procede a la creación de piezas en inventor, de esta forma se logra una implementación inicial del brazo mecánico actual, para así probar su eficiencia con los servomotores a utilizar. Para ello inicialmente se diseño una única conexión al costado de los servos para la unión de cada junta de la estructura. El diseño se realizó tomando como base de movimiento a los servomotores Dynamixel AX-12A y tomando como junta prismática a un acople con un tornillo sin fin. Los planos de dicho prototipo se encuentran en los anexos desde la página 66.

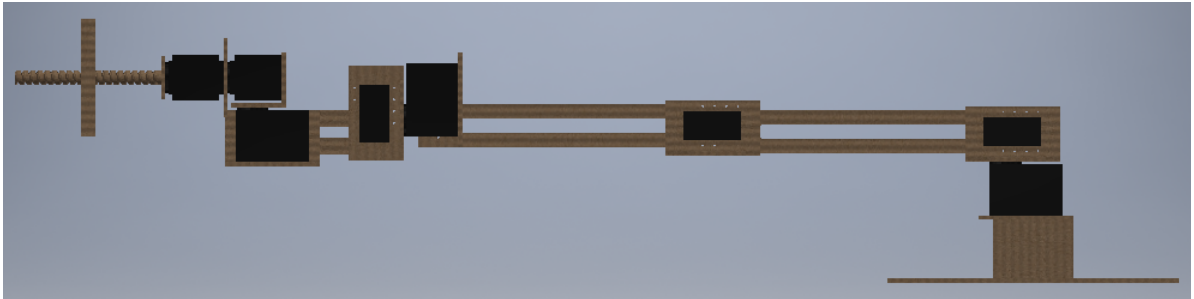


Figura 15: Ensamble del primer prototipo del brazo robótico creado en inventor.

Se cortaron las respectivas piezas en una cortadora láser y se ensambló el prototipo, por cuestiones de disponibilidad en el momento, tan solo se utilizaron 6 servos, por lo tanto se ensambló únicamente hasta la sexta junta.

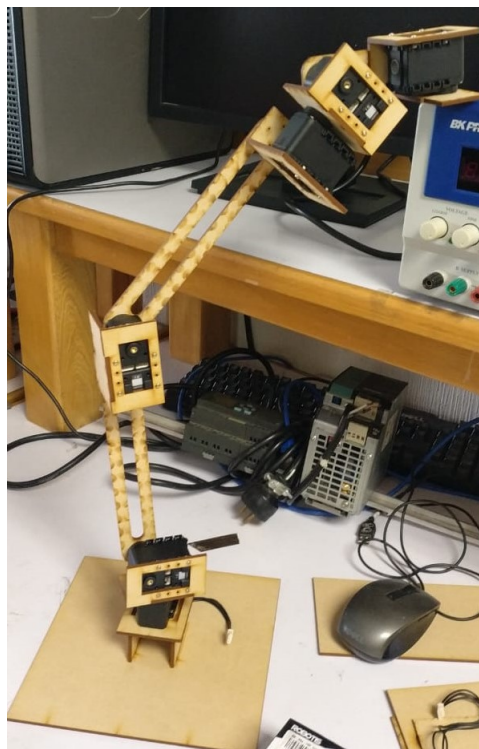


Figura 16: Ensamble del primer prototipo del brazo robótico físico.

El prototipo físico no soportó su propio peso, y eso se puede observar en el análisis de esfuerzos realizado en inventor, justificando que la estructura necesitaba ser mejorada. El análisis se llevo a cabo utilizando la fuerza de gravedad ubicada en el extremo ultimo de la estructura midiendo desde la base, para comparar el esfuerzo obtenido con el máximo del material. La configuración del brazo que asegura donde se puede obtener el máximo esfuerzo es cuando está completamente extendido de forma horizontal. El primer tipo de análisis se basa en una configuración horizontal cuando la gravedad está dada desde la parte superior de la estructura, el segundo análisis es suponiendo una configuración del brazo cuando la gravedad está dada desde la parte lateral de la estructura, para comparar los esfuerzos de máximos y ver en qué punto puede fallar. Para simular los servomotores se utilizó un plástico con el que la pieza tuviese un peso similar al de la vida real, siendo este *55gr* cada uno. Para más información ir a anexos en la página 91 donde se tienen los análisis completos.

Parámetros	Valores	Unidades
Densidad	8.00E+02	$kg/m^3$
Coefficiente de Poisson	0.25	
Límite de elasticidad	7.72	MPa
Esfuerzo último a tracción	7.72	MPa
Módulo de Young	2.4	GPa
Módulo de corte	960	MPa

Cuadro 3: Propiedades mecánicas a utilizar en la simulación para material MDF, proveídas por Autodesk inventor.

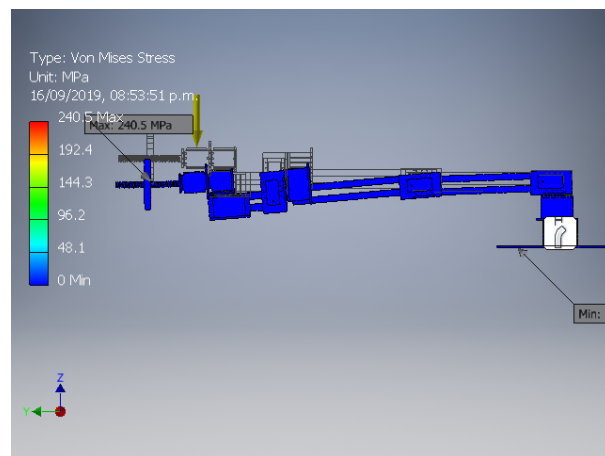


Figura 17: Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 1, con la gravedad desde la parte superior.

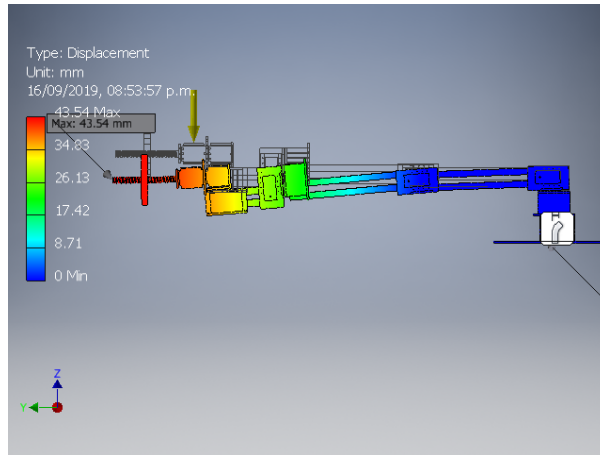


Figura 18: Desplazamiento de la estructura con la gravedad desde la parte superior.

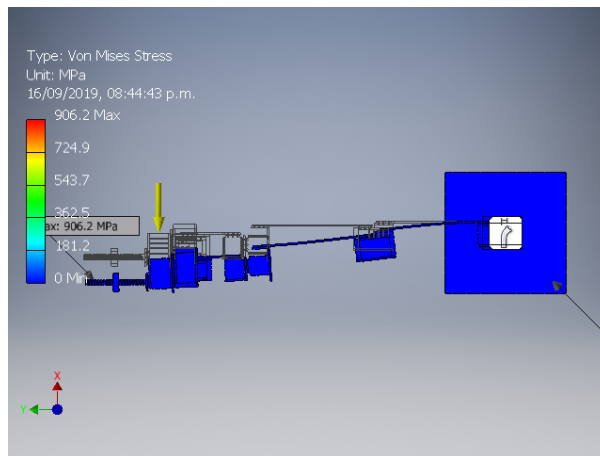


Figura 19: Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 1, con la gravedad desde la parte lateral.

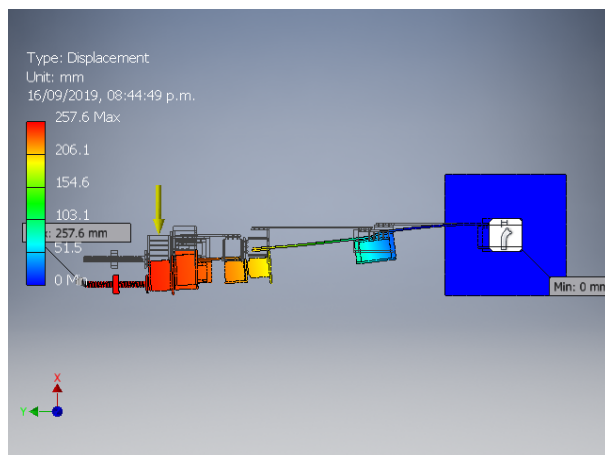


Figura 20: Desplazamiento de la estructura con la gravedad desde la parte lateral.

De la Figura 17 se puede observar que con la gravedad desde la parte superior aún no llega al esfuerzo máximo de flexión, pero el desplazamiento en la Figura 18 ya es significativo. Pero el problema se observa en las figuras 19 y 20, donde el esfuerzo máximo es de 906.2 MPa, sobrepasando por un amplio margen los máximos del material, observando el desplazamiento de la estructura por los límites también. Por lo que se concluye que el prototipo fue infructífero y que se debía mejorar el diseño.

#### 7.4. Segundo prototipo del diseño mecánico

Se mejoró el mecanismo añadiendo conexiones de ambos lados entre cada junta revoluta para hacerlo estable, cubriendo así la falla del anterior diseño. Los planos de dicho prototipo se encuentran en los anexos desde la página 73.

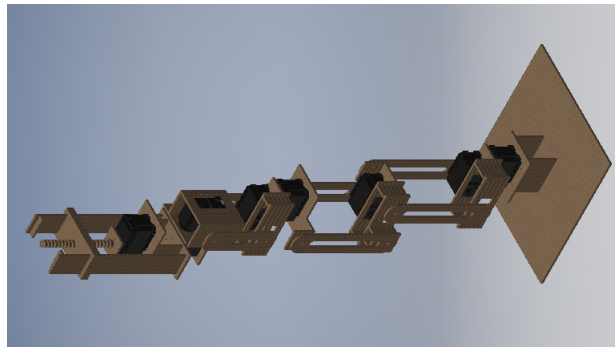


Figura 21: Ensamble de la segunda versión del brazo robótico creado en inventor.

Se cortaron nuevamente las piezas y se ensambló con los 6 servos que se tenían, por motivos de disponibilidad, del tipo Dynamixel AX-12A. Se observó que los servos no suplían el torque necesario para levantar toda la estructura a partir de ciertos ángulos horizontales, para las siguientes iteraciones se consideran cambiar los primeros tres servomotores por unos más potentes.



Figura 22: Ensamble físico del segundo prototipo del brazo robótico.

Con el prototipo en físico, observado en la Figura 22, si se pudieron hacer pruebas, aunque poseía muy notables perturbaciones internas durante el movimiento, esta vez ya se podía sostener por sí mismo. Luego de las pruebas en físico, se realizó el mismo tipo de análisis de esfuerzos como en el prototipo anterior para así comparar con el primer prototipo y observar como se podía mejorar.

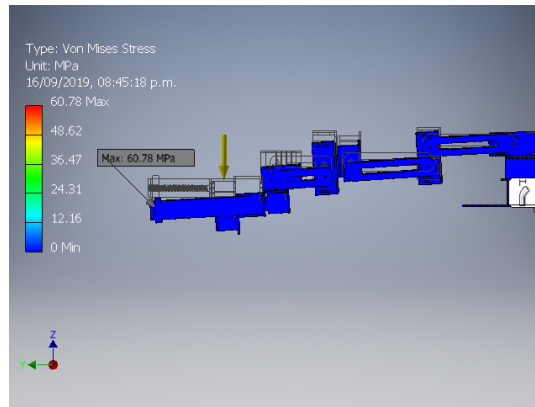


Figura 23: Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 2, con la gravedad desde la parte superior.

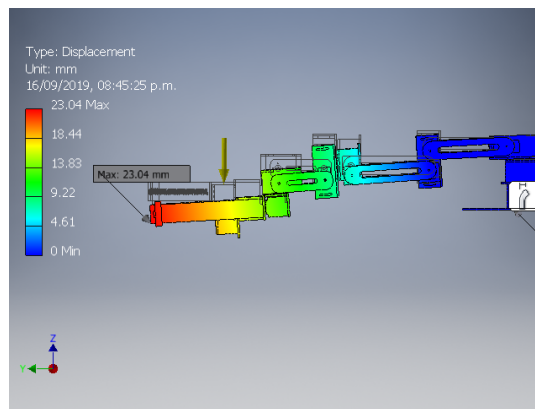


Figura 24: Desplazamiento de la estructura del segundo prototipo con la gravedad desde la parte superior.

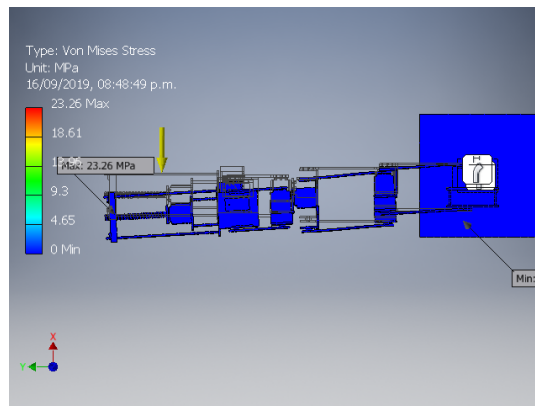


Figura 25: Análisis de esfuerzos de Von Mises del prototipo 2, con la gravedad desde la parte lateral.

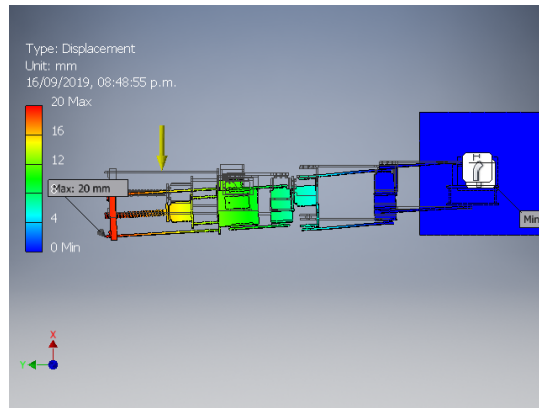


Figura 26: Desplazamiento de la estructura del segundo prototipo con la gravedad desde la parte lateral.

La mejora aportada por la inclusión en ambos lados de la estructura fue significativa, esto se observa comparando las figuras 17 a 20 con las figuras 23 a 26 donde se observa una amplia disminución de los esfuerzos del material y de su deformación. Se debe notar que los esfuerzos máximos en estos casos no son sobre la estructura como tal sino en sus conexiones, siendo estos esfuerzos referentes a los de corte en donde van los tornillos, esto se verifica observando el color azul sobre la estructura en los análisis de esfuerzos de Von Mises. Para más información ir a anexos en la página 106 donde se tienen los análisis completos.

## 7.5. Ensayos de tracción y flexión para material PLA

### 7.5.1. Objetivo

Obtener datos experimentales preliminares de las propiedades físicas del material PLA cuando este es utilizado en impresión 3D, esto ayudó a poder realizar una simulación más acorde a la realidad para la estructura diseñada del brazo robótico y así validar su diseño. Estos ensayos no buscan un análisis estadístico de estos datos, sino valores que puedan ser usados como referencia para el apoyo de dicha simulación.

Se buscó comparar parámetros teóricos obtenidos de probetas con PLA inyectado con los experimentales de PLA impreso y luego ver diferencias claves con simulaciones hechas con estos dos casos.

Parámetros	Valores	Unidades
Densidad [23]	1.24E+03	kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson [23]	0.4	
Límite de elasticidad [24]	49.5	MPa
Esfuerzo último a tracción [24]	45.6	MPa
Módulo de Young [24]	2.3465	GPa
Módulo de corte [25]	2400	MPa
Resistencia a la flexión [24]	103	MPa

Cuadro 4: Propiedades mecánicas teóricas que posee el PLA trabajado por inyección.

### 7.5.2. Materiales

Se utilizan diez probetas para cada ensayo. El grosor de cada una es de 5 mm, dado que es el promedio de grosor que se utilizan en las piezas de la estructura con este material. Las medidas restantes son como se indican a continuación:

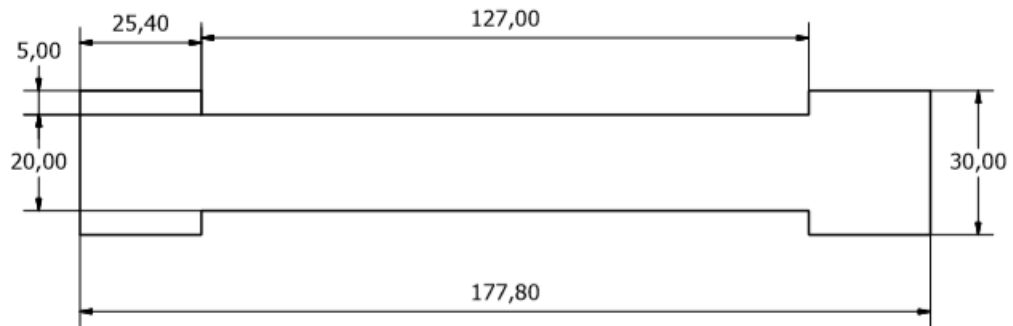


Figura 27: Medidas del modelo general de las probetas para el ensayo de tracción.

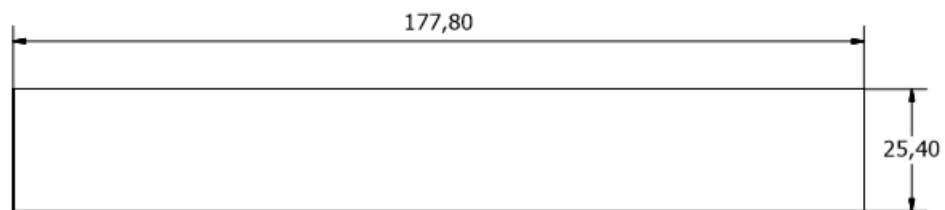


Figura 28: Medidas del modelo general de las probetas para el ensayo de flexión.



Figura 29: Probetas impresas utilizadas para el ensayo a tensión.

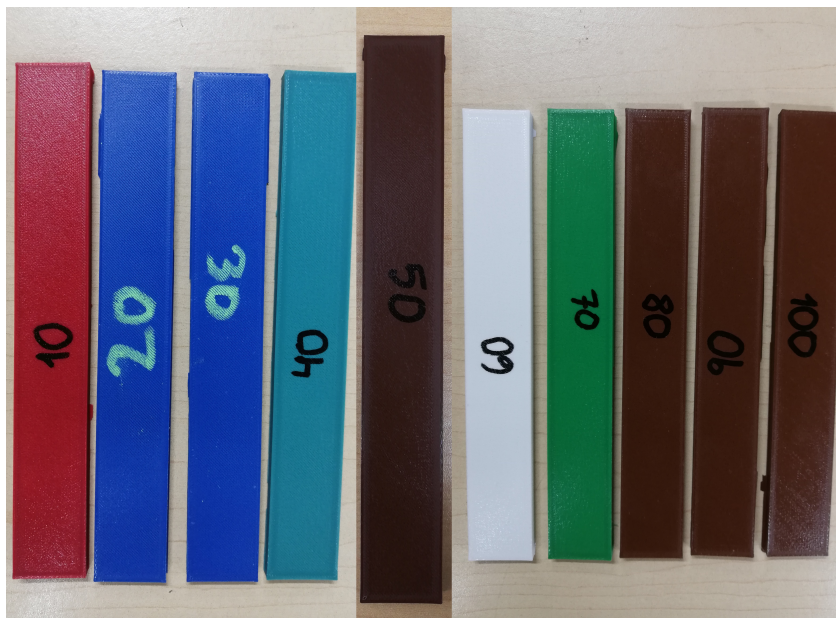


Figura 30: Probetas impresas utilizadas para el ensayo a flexión.

Piezas	Volumen total (mm <sup>3</sup> )	Área transversal (mm <sup>2</sup> )	Longitud (mm)
Probetas de tensión	20320	100	127
Probetas de flexión	22580	127	177.8

Cuadro 5: Datos de las probetas utilizados en los cálculos.

### 7.5.3. Procedimiento

Las probetas se imprimen tomando en cuenta que para cada una de ellas se varía el relleno en 10 %, siendo el rango entonces de 10 % a 100 %. Los parámetros de impresión son los mismos con que se imprimieron las partes de la estructura del brazo, siendo estos los siguientes:

Altura de la capa	Patrón de relleno	Velocidad de impresión
0.15 mm	Tri-Hexágono	70 mm/s

Cuadro 6: Parámetros utilizados en la impresora Ultimaker 3 para crear las probetas.

Se realizaron pruebas en una compresora universal Soiltest que posee la universidad en el departamento de ingeniería civil. Para ambos ensayos se siguió la norma ASTM para materiales plásticos en sus medidas; esta norma no se pudo aplicar a la hora usar el equipo, ya que no es especializado para operar a cargas bajas como las que soportan polímeros como el PLA, sino más para pruebas con concreto, acero, hierro fundido, entre otros materiales con esfuerzos últimos mucho más altos. La norma ASTM trabaja las velocidades de ensayos en *mm/min*, pero debido a que la compresora universal con la que se trabajó únicamente opera con velocidades de *lbf/s* como lo observado en el Cuadro 7, no se pudo aplicar en ese aspecto.

Ensayo	Velocidad (lb/s)
Tracción	3
Flexión	1

Cuadro 7: Velocidad a la que se trabajaron los ensayos con la compresora universal.

Los datos a encontrar para poder implementarlos en la simulación son: Densidad, coeficiente de Poisson, límite de elasticidad, resistencia máxima a tracción, módulo de Young y módulo de corte. Cabe resaltar que la densidad a encontrar será relativa a cuanto relleno tiene la pieza impresa y no la del material como tal. Para esto se midió antes de los ensayos la masa del material con una balanza digital y se calculó de la siguiente manera:

$$d = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Donde:

'd' es la densidad relativa del material.

'm' es la masa encontrada con la balanza digital.

'V' es el volumen total de la probeta.

Para despejar el coeficiente de poisson primero se midió antes del ensayo a tracción el espesor de cada una de las probetas, luego se midió de nuevo cuanto disminuyó al final del ensayo, siendo la ecuación entonces:

$$r = \frac{\frac{\Delta a}{a}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (3)$$

Donde:

'r' es el coeficiente de poisson.

' $\Delta a$ ' es la disminución en el espesor que experimentó la probeta luego del ensayo a tracción.

'a' es el espesor original de la probeta.

' $\Delta l$ ' es el incremento en su longitud.

'l' es la longitud de la probeta sin estirarse.

Para motivos de simplicidad, dado que el equipo utilizado tan solo tiene 1 mm de resolución en la medición transversal de la deformación, el límite de elasticidad se tomará igual a la resistencia última a la tracción.

La resistencia última a la tracción se despeja de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F * 0.00689476}{A} \quad (4)$$

Donde:

' $\sigma$ ' es el límite elástico.

'F' es la carga que lleva a la rotura de la probeta.

'A' es el área transversal.

Se observa que en la ecuación 4 se multiplica por un factor, el cual se debe a que el equipo maneja unidades en libras fuerza para la carga, al área también se le aplicó una conversión a  $in^2$ , entonces el resultado sería en unidades psi, el factor lo convierte a MPa.

Se despejó el módulo de Young con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} \quad (5)$$

Donde:

'E' es el modulo de Young.

'Σ' es la resistencia última a la tracción.

'Δl' es el incremento en su longitud.

'l' es la longitud de la probeta sin estirarse.

El modulo de corte del material se despejará con la siguiente ecuación:

$$G = \frac{E}{2 * (1 + r)} \quad (6)$$

Donde:

'G' es el módulo de rigidez del material.

'r' es el coeficiente de poisson.

'E' es el modulo de Young.

Se realizó un ensayo a flexión a tres puntos, como se observa a continuación:

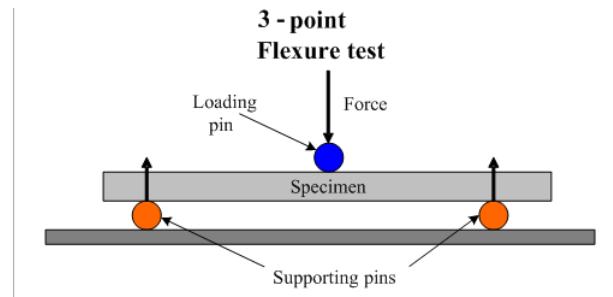


Figura 31: Sistema configurado para realizar el ensayo a flexión [26]

Se encontró la respectiva resistencia última a flexión y su deformación a ese punto. Aunque estos datos no son necesarios para realizar la simulación en inventor, sirven para validar el diseño del brazo robótico dado que se observa flexión en posiciones críticas debido a la gravedad.

Como la geometría de la probeta es rectangular y el ensayo es a tres puntos, la resistencia última a flexión se despeja de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{3Fl}{2ba^2} \quad (7)$$

Donde:

'F' es la carga que posee la probeta al momento de la rotura.

'l' es la longitud de la probeta.

'b' es el ancho de la probeta.

'a' es el espesor de la probeta.

#### 7.5.4. Resultados



Figura 32: Equipo y configuración utilizada para el ensayo a tensión.



Figura 33: Equipo y configuración utilizada para el ensayo a flexión visto lateralmente.

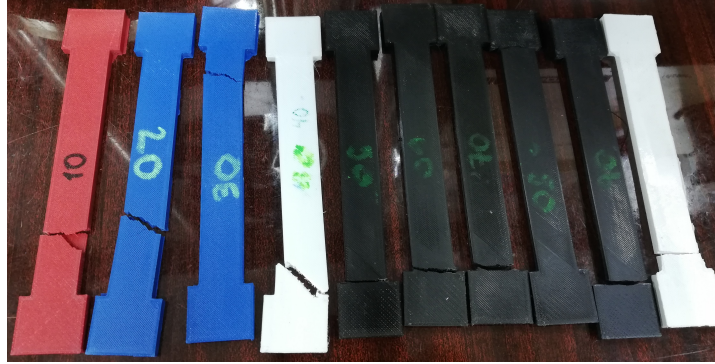


Figura 34: Probetas llevadas al punto de rotura mediante el ensayo a tracción.

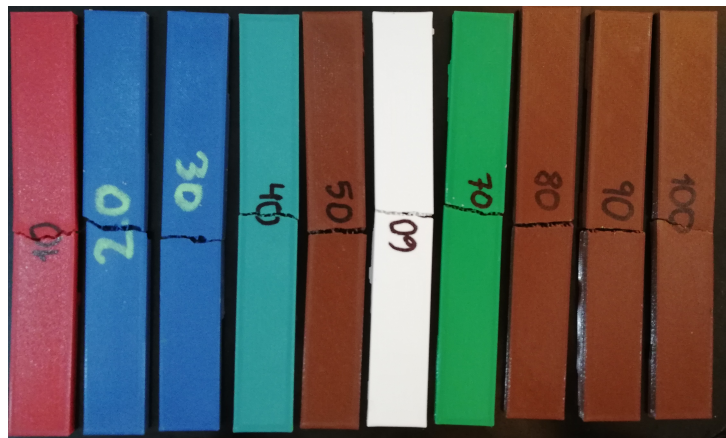


Figura 35: Probetas llevadas al punto de rotura mediante el ensayo a flexión.

Probeta (relleno)	Masa (gr)	Densidad relativa (kg/m <sup>3</sup> )
10.0 %	12	5.91E+02
20.0 %	14	6.89E+02
30.0 %	15	7.38E+02
40.0 %	17	8.37E+02
50.0 %	19.5	9.60E+02
60.0 %	21	1.03E+03
70.0 %	22	1.08E+03
80.0 %	22.5	1.11E+03
90.0 %	23	1.13E+03
100.0 %	25	1.23E+03

Cuadro 8: Densidad relativa encontrada experimentalmente para las probetas utilizadas en el ensayo a tracción.

Probeta (infill)	$\Delta l$ (mm)	$\Delta a$ (mm)	a (mm)	r
10.0 %	4	0.05	5.2	0.31
20.0 %	4	0.04	5.12	0.25
30.0 %	3	0.05	5.17	0.41
40.0 %	5	0.04	5.02	0.20
50.0 %	4	0.04	5.27	0.24
60.0 %	5	0.05	5.39	0.24
70.0 %	5	0.05	5.38	0.24
80.0 %	4	0.04	5.47	0.23
90.0 %	4	0.06	5.46	0.35
100.0 %	4	0.07	5.12	0.43

Cuadro 9: Coeficiente de poisson encontrado experimentalmente.

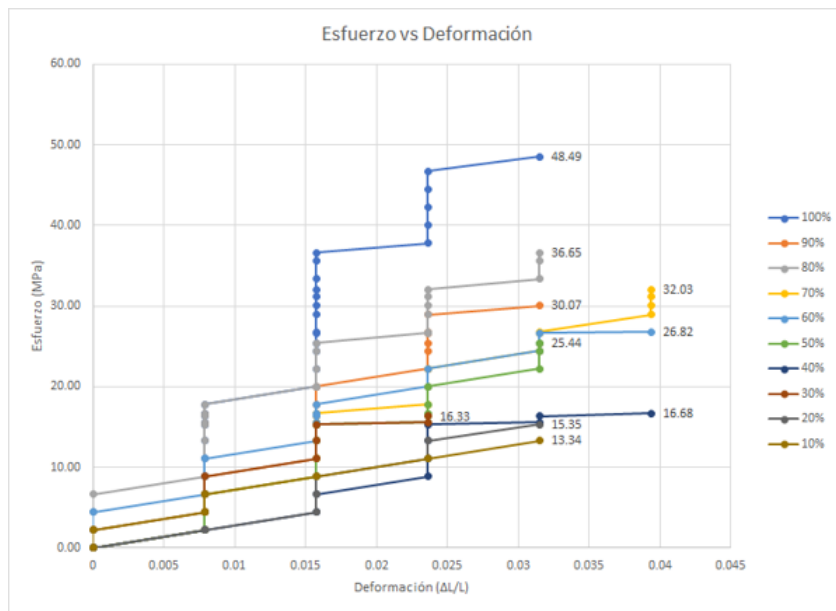


Figura 36: Gráfica esfuerzo/deformación de los ensayos a tracción de todas las probetas.

Probeta (infill)	Carga última a la rotura (lbf)	Esfuerzo último a tracción (MPa)
10.0 %	300	13.34
20.0 %	345	15.35
30.0 %	367	16.33
40.0 %	375	16.68
50.0 %	572	25.44
60.0 %	603	26.82
70.0 %	720	32.03
80.0 %	824	36.65
90.0 %	676	30.07
100.0 %	1090	48.49

Cuadro 10: Resistencia última a la tracción del material encontrado a través de los ensayos.

Probeta (infill)	E (GPa)	G (MPa)
10.0 %	0.42	162.30
20.0 %	0.49	195.20
30.0 %	0.69	245.17
40.0 %	0.42	176.19
50.0 %	0.81	325.48
60.0 %	0.68	275.69
70.0 %	0.81	329.07
80.0 %	1.16	472.23
90.0 %	0.95	353.89
100.0 %	1.54	536.73

Cuadro 11: Módulo de Young y de corte encontrado experimentalmente.

Probeta (infill)	Masa (gr)	Densidad relativa (kg/m <sup>3</sup> )
10.0 %	13.5	5.98E+02
20.0 %	14.5	6.42E+02
30.0 %	15	6.64E+02
40.0 %	16	7.09E+02
50.0 %	16.5	7.31E+02
60.0 %	17	7.53E+02
70.0 %	18.5	8.19E+02
80.0 %	20.5	9.08E+02
90.0 %	22	9.74E+02
100.0 %	26.5	1.17E+03

Cuadro 12: Densidad relativa encontrada experimentalmente para las probetas utilizadas en el ensayo a flexión.

Probeta (infill)	Carga última a la rotura (lbsf)	$\Delta l$ (mm)	Resistencia a la flexión (MPa)
10.0 %	15	24.00	5.52
20.0 %	23	23.00	8.46
30.0 %	16.5	21.00	6.07
40.0 %	21	23.00	7.72
50.0 %	13	26.00	4.78
60.0 %	10.5	23.00	3.86
70.0 %	19.5	21.00	7.17
80.0 %	24	24.00	8.83
90.0 %	23.5	22.00	8.64
100.0 %	20	25.00	7.36

Cuadro 13: Resistencia última a la flexión del material encontrado a través de los ensayos.

Parámetros	Valores	Unidades
Densidad	1.23E+03	kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.43	
Límite de elasticidad	48.49	Mpa
Esfuerzo último a tracción	48.49	MPa
Módulo de Young	1.53	GPa
Módulo de corte	536.73	MPa

Cuadro 14: Parámetros encontrados en el ensayo a tensión de la probeta con relleno del 100 %, se utilizan en las simulaciones de inventor.

### 7.5.5. Discusión

Se observó en los ensayos a tensión en los cuadros 8, 9 y 10 que los datos experimentales obtenidos se asemejan a los teóricos en el Cuadro 4 cuando el relleno es del 100 %, disminuyendo desde ese punto conforme al porcentaje de relleno, aunque el coeficiente de poisson no muestra un comportamiento que se pueda relacionar al porcentaje de relleno. Se observa en la Figura 36 que efectivamente, en los ensayos se observa indicios de una disminución conforme menos relleno tiene la probeta. En el Cuadro 11 se observa que comparado a los datos teóricos se tiene un menor módulo de Young y de corte, esto indica que las piezas impresas en 3D de PLA son menos rígidas y más propensas a deformarse debido a esfuerzos de corte. Dentro de los resultados de los ensayos a flexión las densidades relativas de las probetas en el Cuadro 12 comparadas a los del Cuadro 8 del ensayo a tensión varían ligeramente, que puede deberse a las diferencias que pueden presentarse entre cada impresión, aún utilizando los mismos parámetros. Desde el Cuadro 13 se observa que las resistencias a la flexión son varias veces menor a la teórica en el Cuadro 4, pero logra una deformación máxima en promedio de 23.2 mm antes de romperse que representa un total de un 13 % de su longitud total, lo cual da un amplio margen para validar el diseño desde las simulaciones. Se debe hacer notar que el equipo con el que se trabajó para hacer las pruebas no cuenta con un software desde el cual tome datos para ser exportados y analizados con mayor fidelidad, sino que se tomó datos de forma escrita observando el sensor de deformación y cuanta carga tenía la probeta en ese momento. Los datos de medición completos de todos los prototipos se encuentran en los anexos, a partir de la página 63.

## 7.6. Tercer prototipo del diseño mecánico

Luego de las pruebas físicas realizadas a los prototipos anteriores, se determinó que se necesitaban servos más potentes en la base, directamente en las primeras tres juntas que soportan todo el brazo en su conjunto. Se optó por utilizar servos Dynamixel MX-106T que tienen un torque que va de  $8Nm$  a  $10Nm$  dependiendo de los voltajes finales a operar, los cuales superan por mucho a los AX-12A utilizados anteriormente en estas juntas con sus respectivos torques de 1.5 Nm cada uno. El material utilizado para esta etapa del prototipo fue de plástico PLA buscando mejorar la estabilidad y aligerar el diseño de la estructura, así como su simpleza en el diseño. En el diseño se buscó reducir el número de piezas para la estructura y también disminuir la excentricidad del movimiento con respecto a la unión de las juntas (servomotores). Los planos de dicho prototipo se encuentran en los anexos desde la página 79.

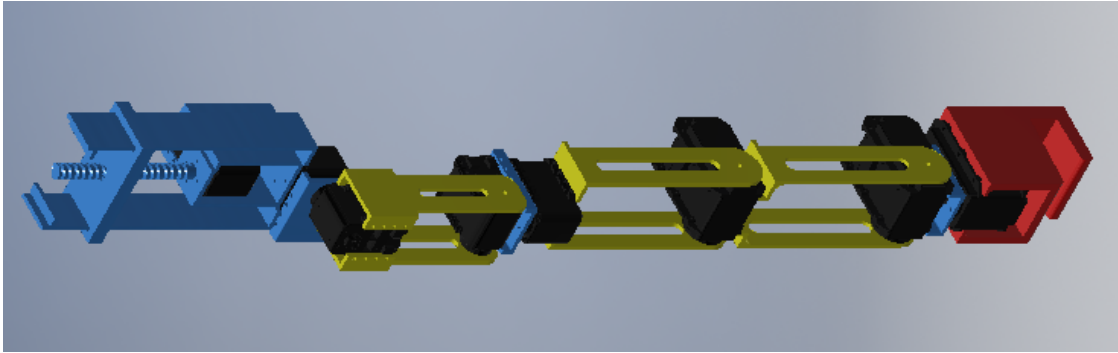


Figura 37: Diseño mecánico del tercer prototipo.

Luego del diseño en inventor se procedió a imprimir las piezas en 3D procurando un infill del 100% para mayor robustez en las piezas que se asocian a los servos 1 a 5 y un infill del 70% para el resto.

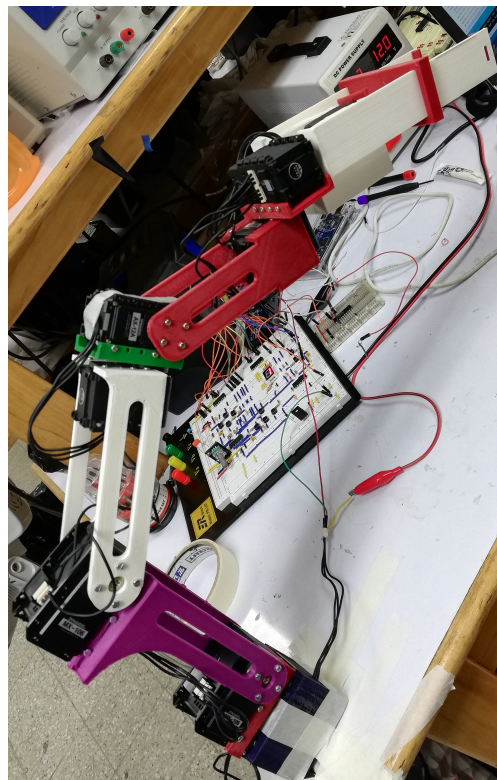


Figura 38: Tercer prototipo ensamblado en físico.

En esta etapa al hacer pruebas se observó que las perturbaciones internas fueron mínimas, aunque ciertamente serían considerables a la hora de llevar a cabo la operación a una persona. Se realizó de nuevo un análisis de esfuerzos para comparar con los prototipos anteriores que mejoró en torno al cambio del material y el diseño, también se comparó probando los datos del material inyectado (Cuadro 4) y asumiendo los encontrados con los ensayos de esfuerzos (Cuadro 14). Se debe notar que las simulaciones para el primer caso se realizaron asumiendo que el material es dúctil y frágil para el segundo caso, esto para el cálculo del coeficiente de seguridad (ir a anexos a partir de la página 121 para observar los resultados completos de las simulaciones).

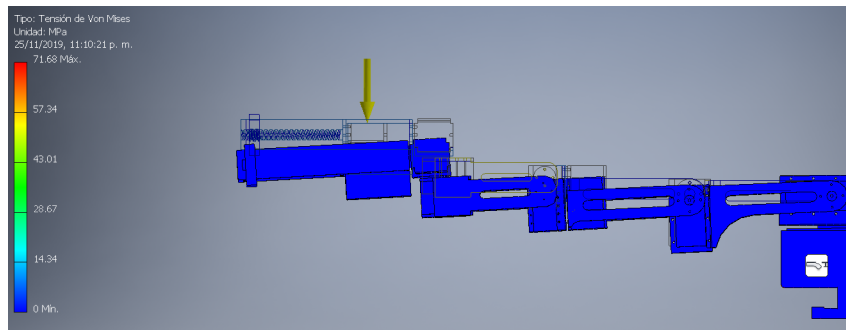


Figura 39: Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

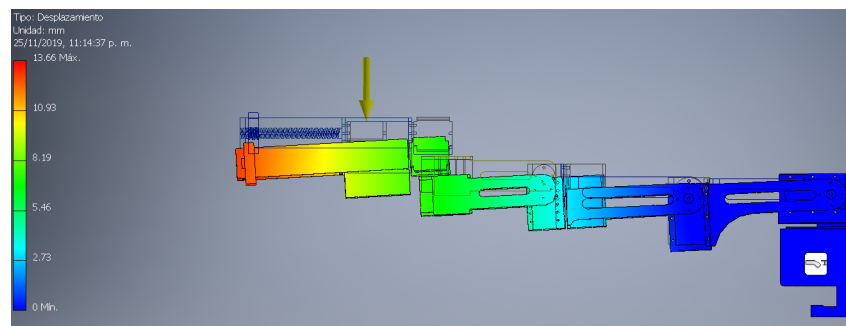


Figura 40: Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte superior.

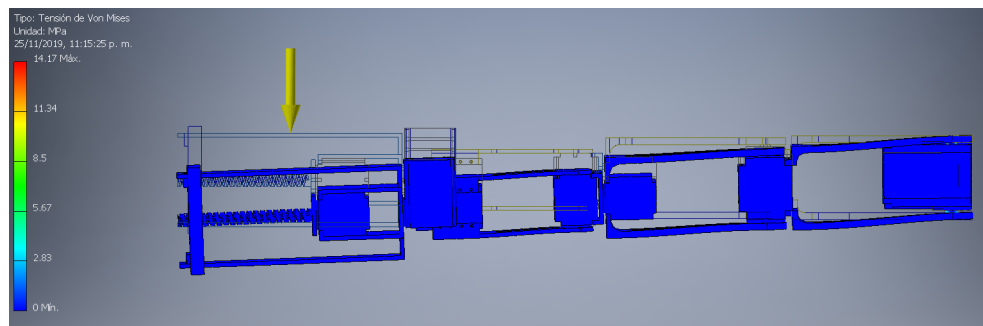


Figura 41: Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

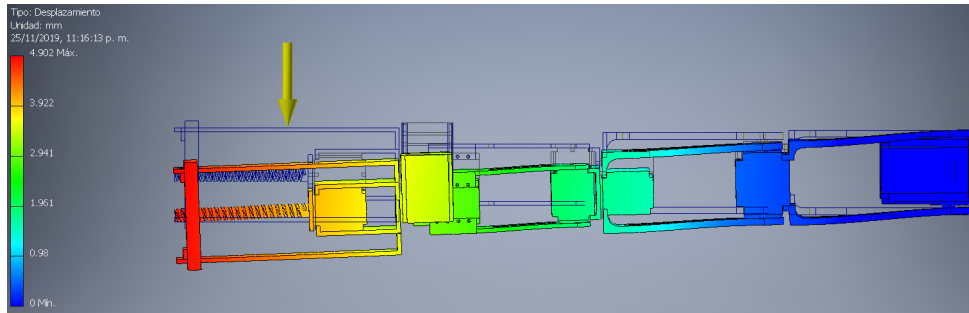


Figura 42: Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

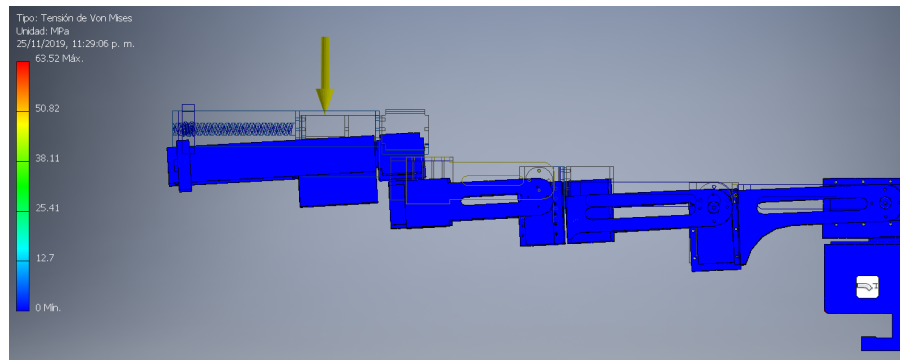


Figura 43: Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior.

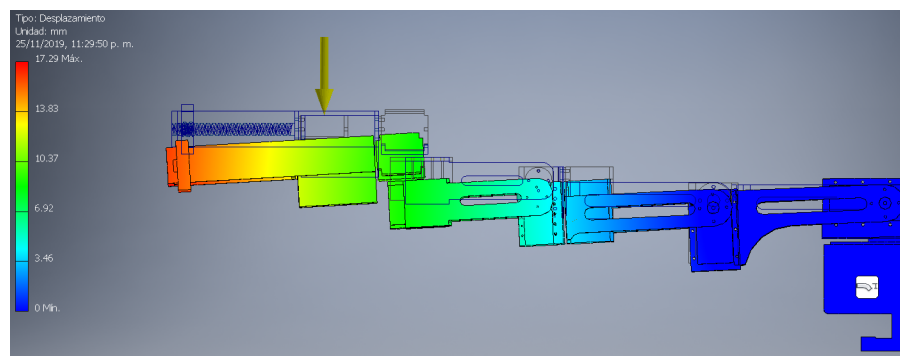


Figura 44: Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior.

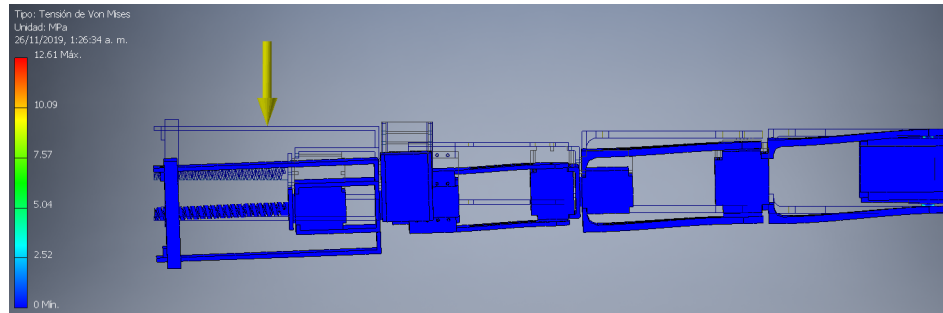


Figura 45: Análisis de esfuerzos de Von Mises del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.

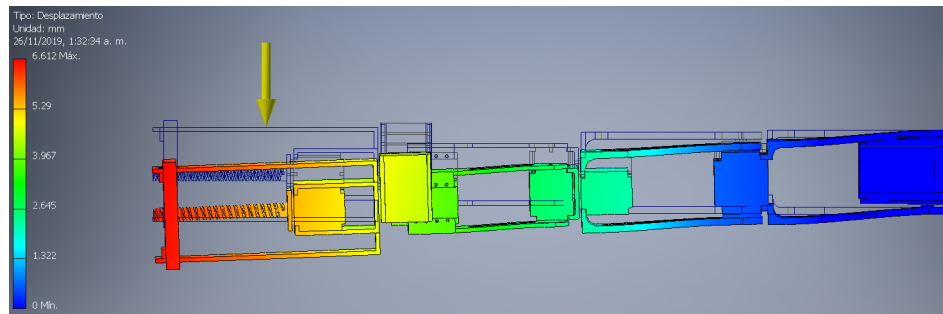


Figura 46: Desplazamiento de la estructura del tercer prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.

Valores máximos obtenidos	PLA teórico	PLA 100 % de relleno
Esfuerzo en la parte superior	71.68 MPa	53.52 MPa
Desplazamiento en la parte superior	13.66 mm	17.29 mm
Esfuerzo en la parte lateral	14.17 Mpa	12.61 Mpa
Desplazamiento en la parte lateral	4.902 mm	6.612 mm

Cuadro 15: Comparación de resultados de la simulación con material PLA de datos teóricos contra el PLA encontrado en los ensayos con 100 % de relleno para el prototipo 3.

Valores máximos obtenidos	Primer Prototipo	Segundo Prototipo	Tercer Prototipo
Esfuerzo en la parte superior	240.50 MPa	60.78 MPa	53.52 MPa
Desplazamiento en la parte superior	43.54 mm	23.04 mm	17.29 mm
Esfuerzo en la parte lateral	906.20 Mpa	23.26 Mpa	12.61 MPa
Desplazamiento en la parte lateral	257.60 mm	20.00 mm	6.612 mm

Cuadro 16: Comparación de resultados de los tres diferentes prototipos

En el Cuadro 15 se observa una clara diferencia entre simular la estructura con PLA inyectado o impreso con 100 % de relleno y es que al ser este último menos rígido se deforma ligeramente más, y bajan los esfuerzos a comparación del desempeño teórico. Se debe resaltar que aunque los esfuerzos máximos son mayores al límite elástico o de resistencia última a la tracción, estos no están ubicados sobre las piezas de PLA, sino sobre a cortante sobre sus acoples a tornillo, como se observa por el color azul en dichas figuras. En el Cuadro 16 se observa como fue mejorando el desempeño de las estructuras a lo largo del proceso de prototipado, observando que si se mejoró mucho utilizando PLA como material. Los análisis de esfuerzos completos de todos los prototipos se encuentran en los anexos, a partir de la página 91.

## 7.7. Cuarto prototipo del diseño mecánico

Para esta iteración se enfatizó en mejorar en robustez lo que ya se había diseñado en el tercer prototipo, siendo estos cambios reducciones de tamaño en los eslabones que van del segundo servo al tercero, de este último al cuarto y del quinto al sexto. También se añadió 2 mm de espesor en las bases de los servos AX-12A y en el eslabón entre el quinto y el sexto servo. Los planos de dicho prototipo se encuentran en los anexos desde la página 85.

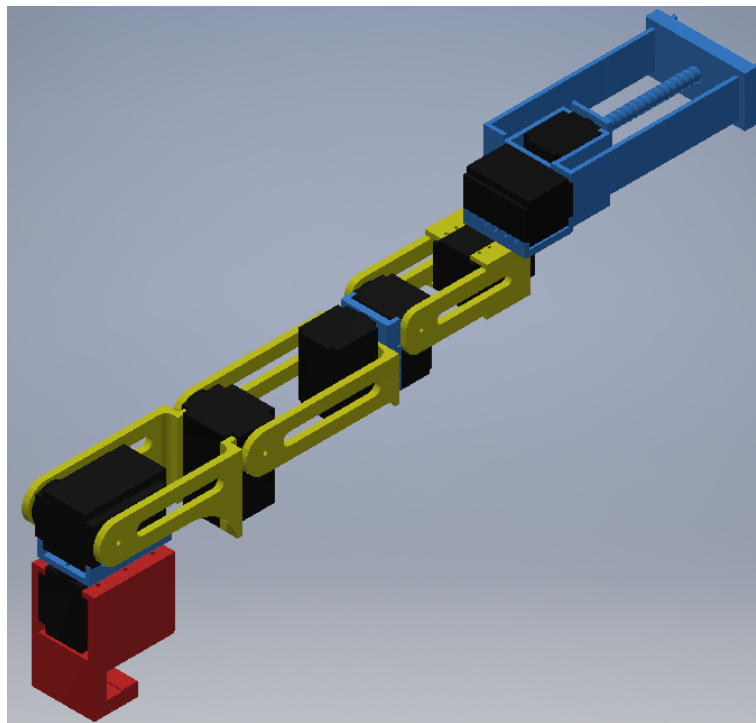


Figura 47: Diseño mecánico del cuarto prototipo.

Luego del diseño en inventor se procedió a imprimir las piezas en 3D procurando un infill del 100 % para mayor robustez en todas las piezas del prototipo.



Figura 48: Cuarto prototipo ensamblado en físico.

Se realizó de nuevo un análisis de esfuerzos para comparar con el prototipo anterior que mejoró en torno al cambio en las medidas de las piezas, también se comparó probando los datos del material inyectado (Cuadro 4) y asumiendo los encontrados con los ensayos de esfuerzos (Cuadro 14). Si se desea observar los análisis completos ir a anexos, desde la página 11.3 buscar los respectivos para el caso del prototipo 4.

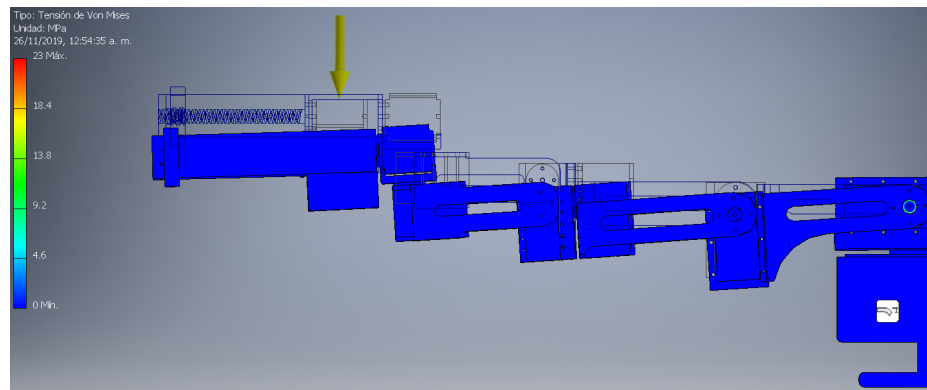


Figura 49: Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

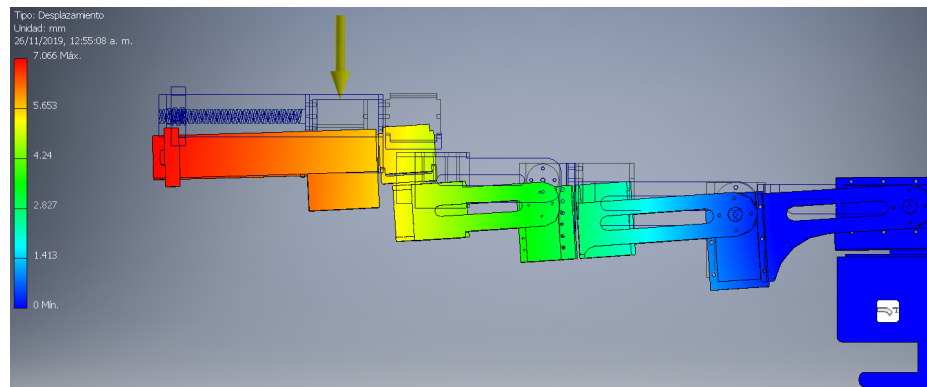


Figura 50: Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte superior.

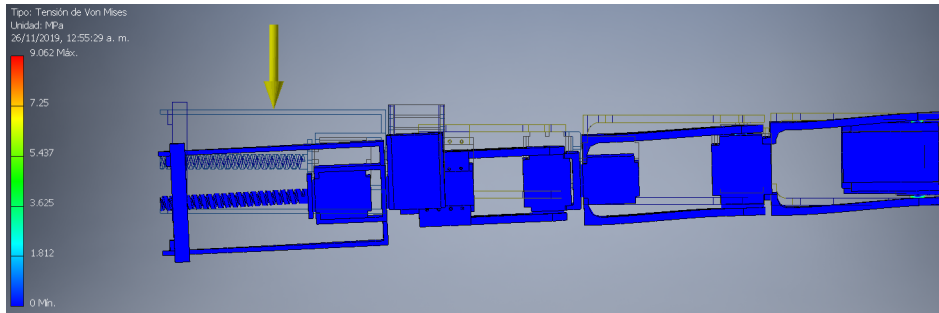


Figura 51: Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

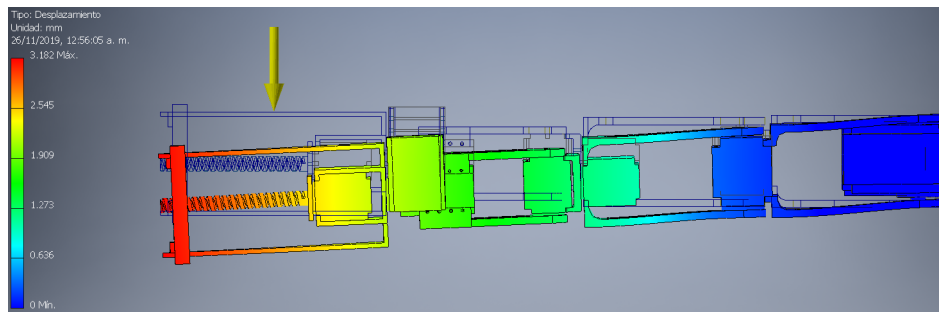


Figura 52: Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

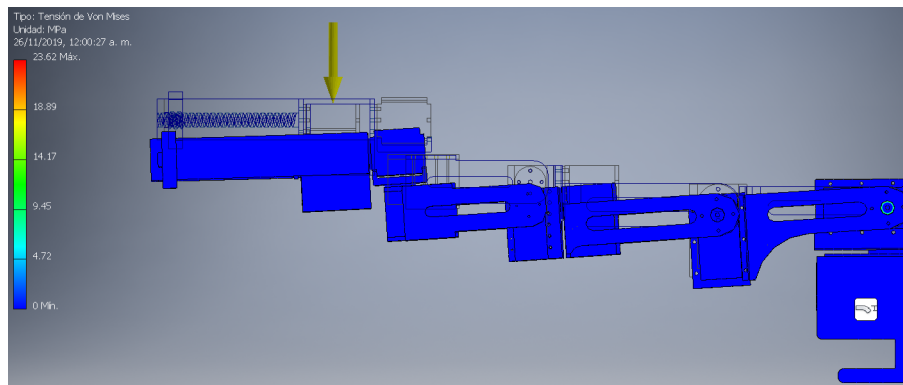


Figura 53: Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior.

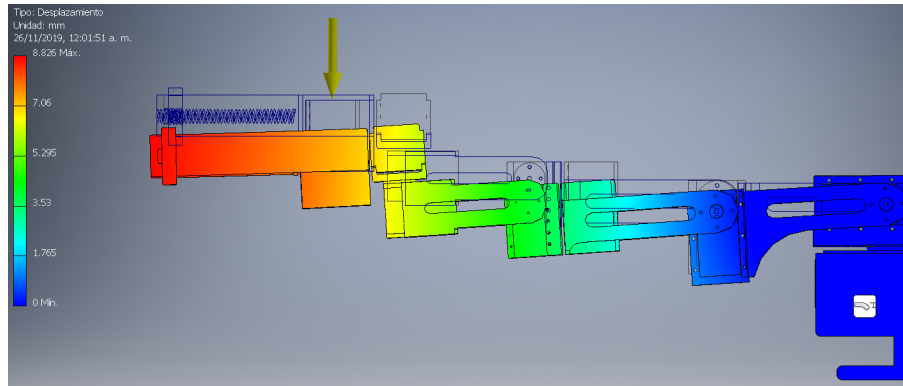


Figura 54: Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior.

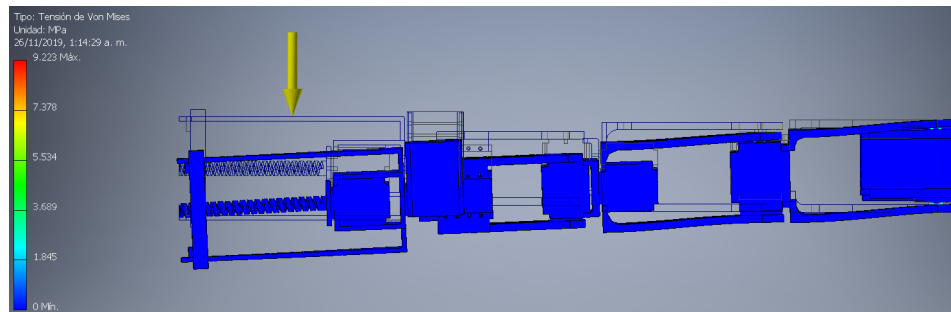


Figura 55: Análisis de esfuerzos de Von Mises del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.

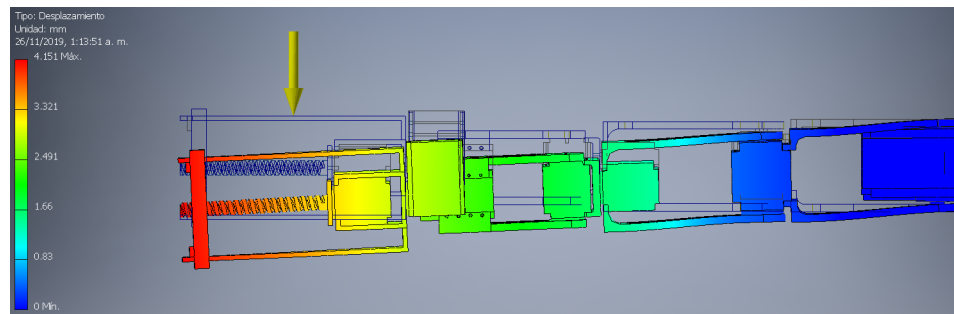


Figura 56: Desplazamiento de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.

Valores máximos obtenidos	PLA teórico	PLA 100 % de relleno
Esfuerzo en la parte superior	23 MPa	23.62 MPa
Desplazamiento en la parte superior	7.065 mm	8.826 mm
Esfuerzo en la parte lateral	9.062 Mpa	9.223 Mpa
Desplazamiento en la parte lateral	3.182 mm	4.151 mm

Cuadro 17: Comparación de resultados de la simulación con material PLA de datos teóricos contra el PLA encontrado en los ensayos con 100 % de relleno para el prototipo 3.

Valores máximos obtenidos	Tercer prototipo	Cuarto prototipo
Esfuerzo en la parte superior	53.52 MPa	23.62 MPa
Desplazamiento en la parte superior	17.29 mm	8.826 mm
Esfuerzo en la parte lateral	12.61 Mpa	9.223 Mpa
Desplazamiento en la parte lateral	6.612 mm	4.151 mm

Cuadro 18: Comparación de resultados con material PLA modelado con 100 % de relleno, entre el tercer prototipo y el cuarto.

En el Cuadro 17 se observa la misma diferencia que en el prototipo anterior, con el PLA con 100 % de relleno la estructura se deforma ligeramente más que su contraparte teórica, aunque sus esfuerzos máximos son casi los mismos a este último. En este prototipo se observa que los esfuerzos máximos ya no superan a la resistencia última a la tracción del material, aunque igual estos máximos se encuentran a cortante sobre los acoples donde van los tornillos, donde se puede observar en las figuras donde se simulan los esfuerzos, lo indica el color azul en toda la estructura. En el Cuadro 18 se observa como fue mejoró el desempeño del cuarto prototipo en ambos tipos de simulaciones habiendo validado estos últimos cambios en la estructura como beneficiosos para la misma. Los análisis de esfuerzos completos de todos los prototipos se encuentran en los anexos, a partir de la página 147.

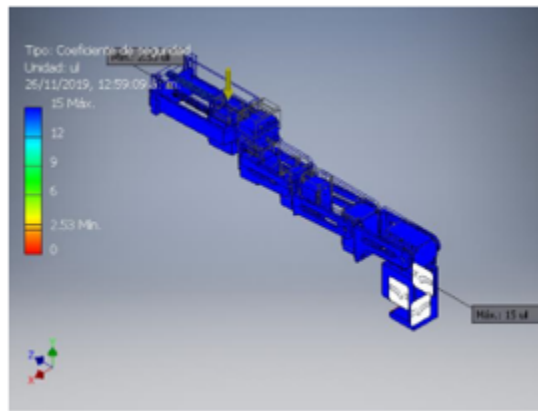


Figura 57: Coeficiente de seguridad de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte superior.

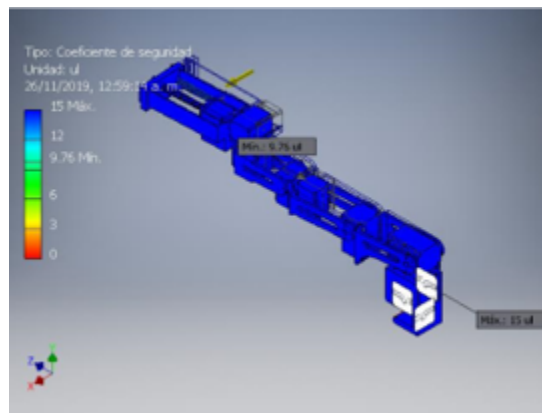


Figura 58: Coeficiente de seguridad de la estructura del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA inyectado, con la gravedad desde la parte lateral.

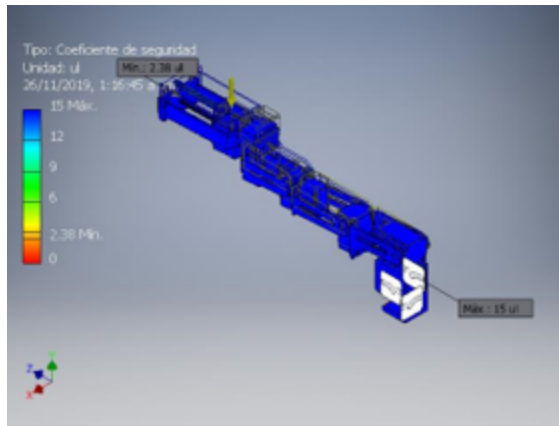


Figura 59: Coeficiente de seguridad del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte superior.

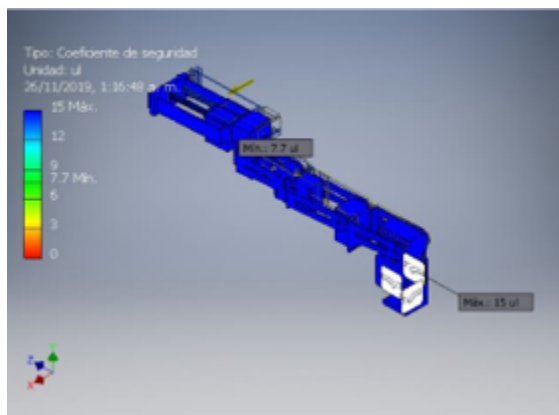


Figura 60: Coeficiente de seguridad del cuarto prototipo asumiendo el material como PLA impreso con 100 % de relleno, con la gravedad desde la parte lateral.

Comparando las figuras 57 y 58 con las figuras 59 y 60 se observa que asumiendo un material PLA inyectado se obtiene un coeficiente de seguridad ligeramente mayor, pero aún así los datos obtenidos mediante los ensayos de esfuerzos físicos aún brinda un resultado favorable para el concepto del prototipo, con un coeficiente de seguridad de al menos 2.38, el cual asegura que la estructura no fallará si la única fuerza que se le es aplicada es el peso de sus mismas piezas.

## 7.8. Análisis del torque sobre los servomotores

Se realizaron cálculos para observar el efecto del peso de cada uno de los prototipos sobre el servomotor base que soportará la mayor carga en la estructura y así dar ángulos de trabajo sobre el primer eslabón donde se asegura que el torque máximo que estaría soportando dicho servomotor se mantiene sobre los límites que recomienda el proveedor, el cual es un quinto del máximo que puede proveer este mismo. Los servomotores utilizados en el diseño de la estructura se construyeron tomando en cuenta las medidas de los orificios y formas importantes, dejando de lado los detalles y se les colocó un material que lo hiciese tener una masa similar a la real.

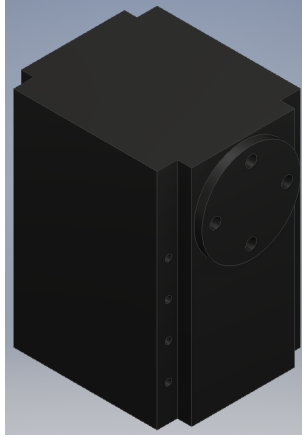


Figura 61: Modelo de un servomotor Dynamixel AX-12A diseñado para simular la estructura en inventor [27].

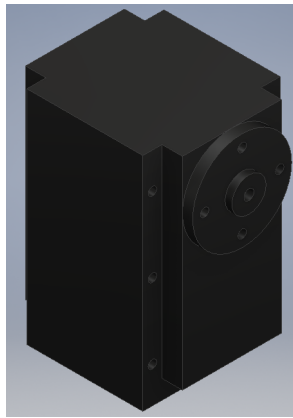


Figura 62: Modelo de un servomotor Dynamixel MX-106T diseñado para simular la estructura en inventor[28].

Servomotor	Material usado en la simulación	Masa dentro de la simulación (Kg)
AX-12A	Plástico ABS	0.062
MX-106T	Plástico PAEK	0.146

Cuadro 19: Valores de masa obtenidos desde iProperties en inventor

Prototipos	Unidades AX-12A	Unidades MX-106T
1 y 2	8	0
3 y 4	5	3

Cuadro 20: Cantidad de servomotores utilizados en cada prototipo

Servomotor	Masa (Kg)	Torque máximo (Nm)	Torque recomendado (Nm)
AX-12A [27]	0.055	1.5	0.3
MX-106T [28]	0.153	8	1.6

Cuadro 21: Valores de masa obtenidos desde iProperties en inventor

Se extrajo la masa total que tiene la estructura desde inventor, se considera que se correlaciona con la masa en físico dado que para los prototipos 1 y 2 se utiliza una densidad proveída desde inventor para MDF y en los prototipos 3 y 4 se utiliza la densidad de las piezas PLA a 100% de relleno en la impresión (ver Cuadro 14).

Prototipo	Masa total (Kg)
1	0.724
2	0.843
3	1.141
4	1.154

Cuadro 22: Masa total de la estructura extraída desde iProperties de cada ensamblaje en Autodesk Inventor

Se desea utilizar el peso que soporta el servomotor base, por lo tanto se debe descontar el peso que produce este mismo y la base como tal, para poder analizar el peso del resto de partes y servomotores de la estructura. El servomotor base para los prototipos 1 y 2 es el modelo Dynamixel AX-12A, para los prototipos 3 y 4 es el Dynamixel MX-106T.

En el Cuadro 23 se describe la masa de la estructura de los prototipos descontando el exceso que se produce al cambiar el material de los modelos de los servomotores en Autodesk Inventor; la masa de las bases del primer y segundo servomotor; la masa de la estructura total descontando estas últimas calculadas, al igual que las del primer y segundo servomotor; la última columna describe el peso que estará aguantando el segundo servomotor, que sale del producto de la gravedad contra la masa encontrada anteriormente.

Prototipos	Masa (Kg)	Suma de las bases 1 y 2 (Kg)	Masa análisis (Kg)	Peso análisis (N)
1	0.668	0.123	0.435	4.263
2	0.787	0.134	0.543	5.3214
3	1.127	0.133	0.688	6.7424
4	1.14	0.146	0.688	6.7424

Cuadro 23: Datos usados para calcular el peso a analizar en el análisis de torque del servomotor de la segunda junta.

Para analizar el torque se utilizó un valor de gravedad de  $9.8m/s^2$  y las longitudes medidas desde el servo base a la punta opuesta de la estructura.

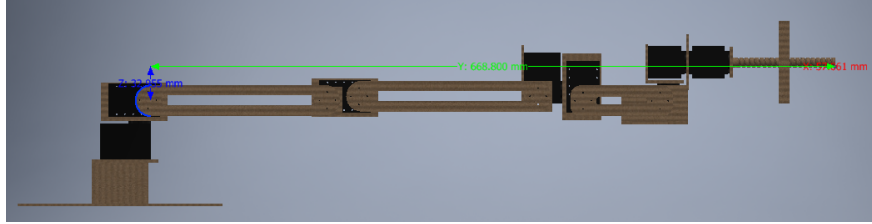


Figura 63: Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del primer prototipo cuando está completamente horizontal.

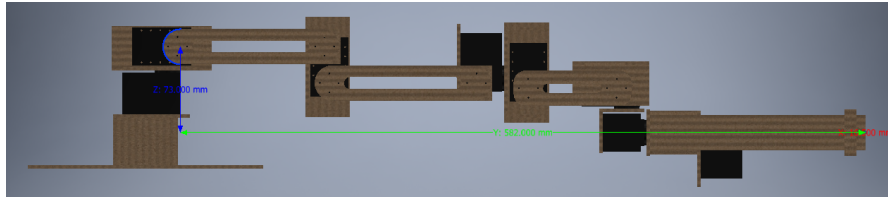


Figura 64: Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del segundo prototipo cuando está completamente horizontal.

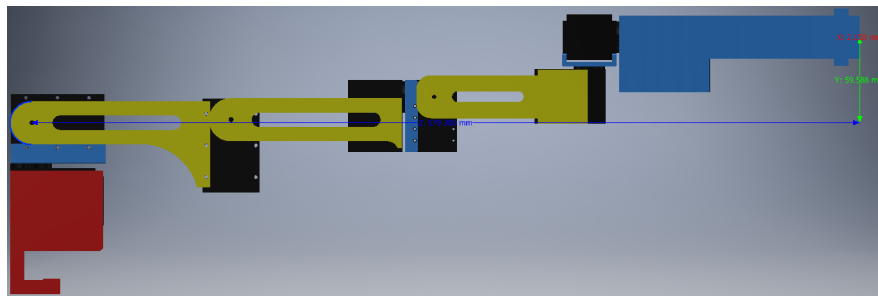


Figura 65: Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del tercer prototipo cuando está completamente horizontal.

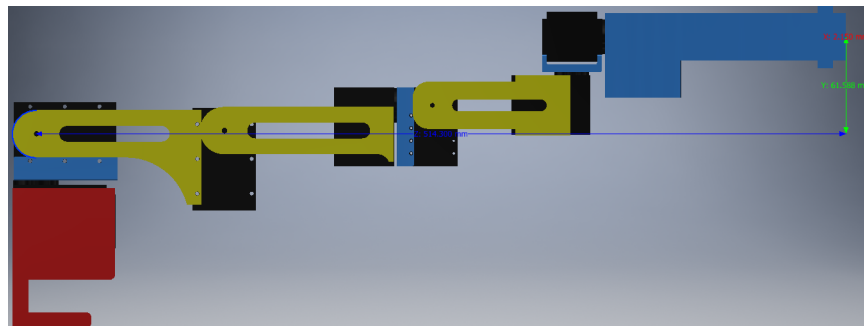


Figura 66: Longitud a trabajar para medir el torque crítico que soporta el servomotor base del cuarto prototipo cuando está completamente horizontal.

Se asume que el peso que soporta el servomotor base se aplica sobre un punto, para un análisis conservador el foco de la fuerza se aplica sobre la mitad de la longitud medida en las figuras 63 a 66.

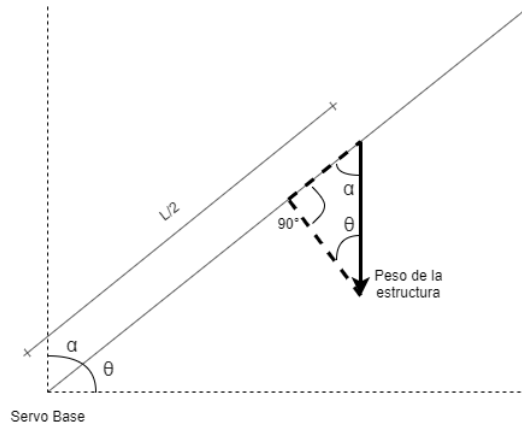


Figura 67: Diagrama para el análisis del ángulo de trabajo de la estructura, donde 'L' representa la longitud total medida desde el servomotor base y  $\alpha$  representa el ángulo de trabajo.

Utilizando como base la ecuación 1 se despeja el ángulo  $\alpha$  observado en la Figura 67 de la forma:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}\left(\frac{T_{rec}}{T_{max}}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

Donde:

' $\alpha$ ' es el ángulo de trabajo dado en grados.

' $T_{rec}$ ' es el torque recomendado.

' $T_{max}$ ' es el torque máximo que se encuentra horizontalmente sobre la distancia donde se realiza el cálculo.

Prototipos	L (m)	Torque en posición horizontal (Nm)	Ángulo de trabajo (°)
1	0.6688	1.43	±12.15
2	0.582	1.55	±11.17
3	0.5793	1.95	±55.01
4	0.5143	1.73	±67.34

Cuadro 24: Análisis de torques máximos que soportan los servomotores en la base y los ángulos recomendados donde se cumple un quinto del torque máximo de los mismos

En el Cuadro 25 se observa el análisis de masa de cuanto representa en porcentaje a la masa de las piezas en la estructura en relación al total observado en el Cuadro 23. En este cuadro se observa la masa total de los servomotores en cada prototipo, tomando en cuenta las cantidades utilizadas vistas en el Cuadro 20; se tiene también la masa de solo las piezas y el cálculo en porcentaje de esto mismo.

Prototipos	Servomotores (Kg)	Piezas (Kg)	Piezas (%)
1	0.44	0.23	34.13
2	0.44	0.35	44.09
3	0.734	0.39	34.87
4	0.734	0.41	35.61

Cuadro 25: Análisis de peso de las piezas sobre el total que pesa la estructura en conjunto con los servomotores

Se observa en el Cuadro 24 que el ángulo de trabajo  $\alpha$  que representa el ángulo desde la vertical (ver Figura 67) es de aproximadamente  $\pm 12^\circ$  y que el torque desde la posición completamente horizontal es ligeramente mayor al máximo en el segundo prototipo y muy cercano en el primero, lo cual justifica el porqué se sustituyeron esos servomotores en los siguientes prototipos, dado que fuerzan completamente el torque de los mismos y ni aún así se logra un área de trabajo amplia. En los prototipos 3 y 4 se observa que el torque máximo cuando la estructura está completamente horizontal es 24.41 % y 21.67 % del torque máximo que puede soportar el servomotor MX-106T, el cual valida que no puede haber problema aún cuando se llega a esa posición crítica, sin embargo se aleja del torque recomendado por el proveedor, por lo que se calculó a qué ángulos el prototipo no se aleja de esta magnitud y se encontró que para eso  $\alpha$  debe mantenerse entre  $\pm 55.01^\circ$  y  $\pm 67.34^\circ$  respectivamente, donde se observa que el diseño para el último prototipo tiene más área de trabajo que el primer eslabón puede recorrer sin salir del torque recomendado por el proveedor. Se observa en el Cuadro 25 que el diseño si es ligero, dado que lo que aporta más masa a la estructura son los servomotores, siendo el porcentaje del prototipo final de 35.61 % lo cual indica que el diseño simplista ayudó mucho a este resultado final.

Dando una simulación fiable en cuanto a las etapas de ajuste del brazo en Matlab con el análisis cinemático de juntas, como un análisis de esfuerzos de von Mises para el proceso de diseño en inventor, se tiene una solidez teórica y práctica en cuanto al desempeño de la estructura en el ensamblaje físico. Se logró realizar una adaptación robótica que sigue la estructura del brazo mecánico que posee HUMANA, el cual se puede apreciar los tipos de movimientos que simula en la Figura 14 y la estructura final, basada en esta última, en la Figura 48, la cual puede seguir la secuencia del brazo mecánico original. La simpleza del diseño final se puede apreciar también en las figuras 47 y 48, reduciendo el material dentro de los eslabones procurando mantener la rigidez, se trató de diseñar la forma de los eslabones para un movimiento lo más libre posible del brazo sin que la estructura interrumpa el mismo. A lo largo de los prototipos se observó una mejora notable en cuanto a su desempeño en sus simulaciones y en la estructura física, lo cual se observa en los cuadros 16 y 18. La estructura final en la Figura 48 no logró ser tan robusta para la aplicación, puesto que el material no lo permitía, y eso se observa en el Cuadro 17, donde aún se observan desplazamientos significativos debido a los esfuerzos a los que se está sometiendo la misma, esto también se observó en las pruebas físicas, donde ciertas vibraciones internas (aunque mínimas) llegan a entorpecer el movimiento del brazo en su conjunto, únicamente a velocidades altas, cuando el brazo se movía lentamente no se observaban tan evidentes estas perturbaciones. Aún así se obtuvo un coeficiente de seguridad mínimo de 2.38 en el último prototipo, lo cual asegura que la estructura no fallará durante el funcionamiento con la única fuerza aplicada a este mismo siendo el peso de sus piezas. Se observó cómo mejoró con las iteraciones el ángulo de trabajo de los prototipos con relación al primer eslabón, siendo el cuarto prototipo el mejor de todos con un  $\pm 67.34^\circ$  con relación a la vertical y aunque se coloque completamente horizontal el torque que soporta es tan solo de un 21.63 % del máximo que puede aguantar dicho servomotor con datos dados por el proveedor, por lo que se considera un diseño ligero tomando en cuenta que la mayor parte del peso la proveen los mismos servomotores, más que la propia estructura. Se debe tomar en cuenta que esto es tan solo un prototipo, en el cual, aunque la exactitud no puede ser viable para operaciones en la vida real, el diseño del sistema puede ser tomado como base para mejorar ese aspecto en futuras fases.



### 9.1. Material

- Para obtener una simulación en inventor más acorde a la realidad con piezas de PLA impreso, se recomienda realizar un estudio puramente del comportamiento de dicho material con al menos 10 probetas para cada porcentaje de relleno, para poder hacer un análisis estadístico de cada uno de los datos para luego utilizarlos en la simulación.
- Elegir un material más rígido para ensamblar el brazo y así lograr una mayor robustez. Entre esos pueden ser SLA para ingeniería, ABS o fibra de carbono, dado que estos son de alta rigidez y excelentes contra la resistencia a cargas cíclicas, son los materiales ideales para el prototipado y si los resultados son buenos incluso podrían servir para la estructura final.

### 9.2. Direcciones alternativas en el diseño

- Colocar resortes sobre el eslabón 1, 2 y 3, estos conectan los servos 2-3; 3-4; y 5-6 respectivamente, para lograr que el brazo se detenga en el aire si se va la energía con que está siendo utilizado el mismo, ayudando así a su propia robustez interna y seguridad del paciente.
- Diseñar acoples físicos que se ajusten entre los eslabones del brazo, para fijar una secuencia de movimiento del mismo luego de llegar a la posición con el joystick, y así no dejar bloqueado externamente el brazo si se va la energía, para su robustez y seguridad del paciente en la sala de operaciones.
- Reducir la altura del diseño completo para disminuir los esfuerzos y el torque que deben ejercer los servos a la hora del movimiento.
- Optimizar el vaciado de las piezas de la estructura internamente para reducir el peso y aumentar la rigidez en la misma.

- Reemplazar los motores actuales por los MKS HBL388. El cual tiene un precio de \$ 248.74; un torque a 8.2V de 6.67 Nm, aceptable para la aplicación; masa de 0.0933 Kg; resolución de 0.088°, lo mismo que los motores MX-106T utilizados en el actual prototipado; y cuenta con un encapsulado de metal, con un diseño enfocado a una refrigeración eficiente, lo cual estaría muy bien ya que estos durante las operaciones deben estar siendo utilizados durante un tiempo prolongado.



Figura 68: Servomotor MKS HBL388 [29].

- 
- [1] S. C. Health, *La tecnología ROSA™ reduce el tiempo de anestesia y da mayor precisión y seguridad*, <https://www.stanfordchildrens.org/es/service/neurosurgery/rosa>, En línea; accedido el 1 de junio del 2019, 2019.
- [2] J. Gonzalez-Martinez, S. Vadera, J. Mullin, R. Enatsu, A. V. Alexopoulos, P. Patwardhan, W. Bingaman e I. Najm, “Robot-Assisted Stereotactic Laser Ablation in Medically Intractable Epilepsy: Operative Technique”, *Operative Neurosurgery*, vol. 10, págs. 167-173, 2014.
- [3] Renishaw, *neuromate® robotic system for stereotactic neurosurgery*, <https://www.renishaw.com/en/neuromate-robotic-system-for-stereotactic-neurosurgery--10712>, En línea; accedido el 1 de junio del 2019, 2019.
- [4] T. R. K. Varma y P. Eldridge, “Use of the NeuroMate stereotactic robot in a frameless mode for functional neurosurgery”, *The international journal of medical robotics and computer assisted surgery*, vol. 2, págs. 107-113, 2006.
- [5] M. S. Eljamel, “Robotic application in epilepsy surgery”, *The international journal of medical robotics and computer assisted surgery*, vol. 2, págs. 233-237, 2006.
- [6] H. J. Marcus, A. Hughes-Hallett, T. P. Cundy, G. Z. Yang, A. Darzi y D. Nandi, “Da Vinci robot-assisted keyhole neurosurgery: a cadaver study on feasibility and safety”, *Neurosurgical Review*, vol. 38, págs. 367-371, 2015.
- [7] NIH, *Las epilepsias y las crisis: Esperanza en la investigación*, National Institute of Neurological Disorders y Stroke, 2017. dirección: [https://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/crisis\\_epilepticas.htm#toc](https://espanol.ninds.nih.gov/trastornos/crisis_epilepticas.htm#toc).
- [8] K. Garganis, “Intracranial Electrode Investigations in the Presurgical Evaluation of Drug-Resistant Epilepsy”, en *Epilepsy Surgery and Intrinsic Brain Tumor Surgery: A Practical Atlas*. Springer International Publishing, 2019, cap. 8, págs. 107-114.
- [9] F. J. A. Andrew Mcevoy, “Stereotactic Surgery for Epilepsy”, en *The Treatment of Epilepsy*. Wiley-Blackwell, 2009, cap. 78, págs. 975-992.
- [10] RAE, *Robótica*, <https://dle.rae.es/?id=WYTm4uf>, En línea; accedido el 19 de julio del 2019, 2019.

- [11] J. Craig, “Introduction”, en *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall, 2005, cap. 1, págs. 1-18.
- [12] F. P. Kevin Lynch, “Degrees of Freedom of a Robot”, en *Modern Robotics Mechanics Planning and Control*. Cambridge University Press, 2017, cap. 2.2, págs. 15-17.
- [13] K. Ramirez, *Cinemática Directa del Robot*, <http://www.kramirez.net/Robotica/Material/Presentaciones/CinematicaDirectaRobot.pdf>, En línea; accedido el 1 de junio del 2019, 2019.
- [14] M. J. y J. Trapero, *PUMA 560*, [http://ceres.ugr.es/~angel/docencia/robin/Apuntes/Trabajo\\_Robot\\_Puma4.pdf](http://ceres.ugr.es/~angel/docencia/robin/Apuntes/Trabajo_Robot_Puma4.pdf), En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2008.
- [15] F. Beer, E. Johnston, D. Mazurek y E. Eisenberg, *Mecánica vectorial para ingenieros*, 9.<sup>a</sup> ed. Mexico, DF: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2011.
- [16] P. Rodriguez, *Esfuerzos y deformaciones*, [https://www.academia.edu/23735064/ESFUERZOS\\_Y\\_DEFORMACIONES](https://www.academia.edu/23735064/ESFUERZOS_Y_DEFORMACIONES), En línea; accedido el 1 de junio del 2019, 2019.
- [17] F. R.W., *Mechanics of materials*, 2.<sup>a</sup> ed. Estados Unidos, Massachusetts: Addison-Wesley, 1996.
- [18] R. Budynas y J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9.<sup>a</sup> ed. Mexico, DF: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA, 2011.
- [19] INSTRON, *ASTM D638: THE DEFINITIVE GUIDE TO PLASTIC TENSILE TESTING*, <https://www.instron.es/testing-solutions/by-standard/astm/multiple-testing-solutions/astm-d638>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2019.
- [20] —, *The Definitive Guide to ASTM D790 Flexure Testing of Plastics*, <https://www.instron.es/testing-solutions/by-test-type/flexure/the-definitive-guide-to-astm-d790>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2019.
- [21] Brainlab, *Craneal Navigation Application*, <https://www.brainlab.com/surgery-products/overview-neurosurgery-products/cranial-navigation/>, En línea; accedido el 1 de junio del 2019, 2019.
- [22] P. Corke, *Robotics, Vision and Control Fundamental Algorithms in MATLAB*, 2.<sup>a</sup> ed. Basel, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [23] COMA, *Propiedades del PLA*, <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poliácido-láctico/propiedades-del-pla?authuser=0>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2019.
- [24] Ultimaker, *Ultimaker PLA*, <https://ultimaker.com/materials/pla>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2017.
- [25] HXX, *Materiales de impresión 3D (I): PLA (ácido poliláctico)*, <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2015.
- [26] D. Kopeliovich, *Flexural strength tests of ceramics*, [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural\\_strength\\_tests\\_of\\_ceramics](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics), En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2012.

- [27] T. Robotics, *Dynamixel AX-12A Robot Actuator*, <https://www.trossenrobotics.com/dynamixel-ax-12-robot-actuator.aspx>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2019.
- [28] —, *Dynamixel MX-106T Robot Actuator*, <https://www.trossenrobotics.com/p/mx-106t-dynamixel-robot-servo.aspx>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2019.
- [29] MKS, *HBL388*, <http://mks-servo.com/Industrial/Standard-Servo/HBL388>, En línea; accedido el 25 de noviembre del 2019, 2019.



### 11.1. Tablas de datos sobre los ensayos de esfuerzos

$\Delta a$ (mm)			
Probetas	Antes	Despues	Deformación
10 %	5.2	5.15	0.05
20 %	5.12	5.08	0.04
30 %	5.17	5.12	0.05
40 %	5.02	4.98	0.04
50 %	5.27	5.23	0.04
60 %	5.39	5.34	0.05
70 %	5.38	5.33	0.05
80 %	5.47	5.43	0.04
90 %	5.46	5.4	0.06
100 %	5.12	5.05	0.07

Cuadro 26: Tabla de deformación lateral de las probetas durante el ensayo de tensión.

Datos	$\Delta l$ (% infill)(mm)				
	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %
0	0	0	0	0	0
50	1	1	0	1	0
100	1	1	0	1	0
150	1	1	0	1	1
200	1	1	1	2	1
250	1	2	1	2	1
300	1	2	1	2	2
345	1	2	1	2	2
350	1	2	1	2	2
367	1	2	1	2	2
375	1	2	1	2	2
400	1	2	1	3	2
450	2	2	2	3	3
500	2	3	2	3	3
550	2	3	2	4	4
572	2	3	2	4	4
600	2	3	3	4	4
603	2	3	3	4	5
650	2	3	3	5	
676	2	4	3	5	
700	2		3	5	
720	2		3	5	
750	2		4		
800	2		4		
824	2		4		
850	3				
900	3				
950	3				
1000	3				
1050	3				
1090	4				

Cuadro 27: Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 100 % a 60 % para ensayos de tensión.

Datos	$\Delta l$ (% infill)(mm)				
	50 %	40 %	30 %	20 %	10 %
<b>0</b>	0	0	0	0	0
<b>50</b>	1	1	0	1	0
<b>100</b>	1	2	1	2	1
<b>150</b>	1	2	1	2	1
<b>200</b>	2	3	1	2	2
<b>250</b>	2	3	2	3	3
<b>300</b>	2	3	2	3	4
<b>345</b>	2	3	2	4	
<b>350</b>	3	4	3		
<b>367</b>	3	4	3		
<b>375</b>	3	5			
<b>400</b>	3				
<b>450</b>	3				
<b>500</b>	4				
<b>550</b>	4				
<b>572</b>	4				

Cuadro 28: Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 50% a 10% para ensayos de tensión.

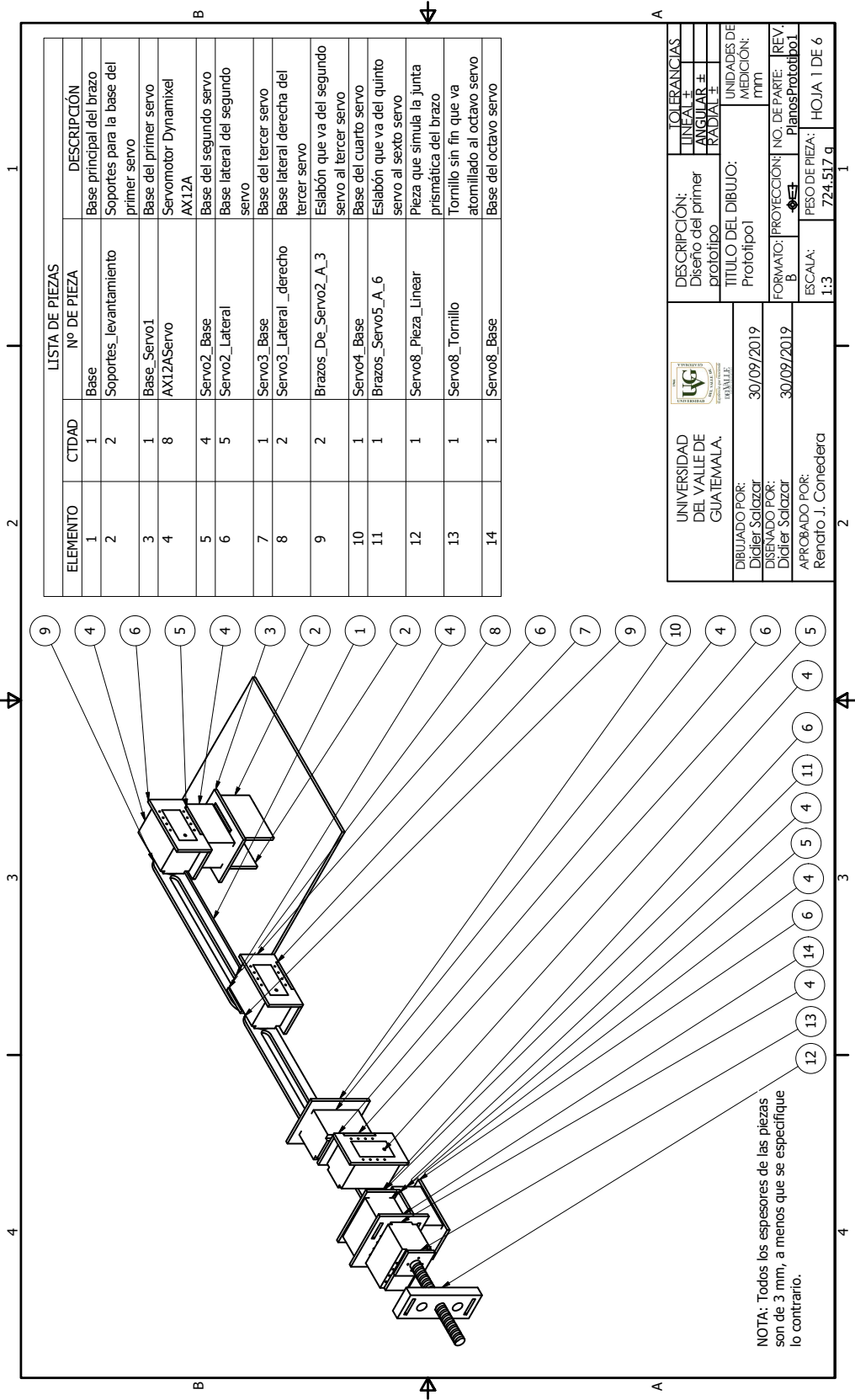
Datos carga-deformación (lbs y mm)									
F (lbs)	100 %	F (lbs)	90 %	F (lbs)	80 %	F (lbs)	70 %	F (lbs)	60 %
0.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	2	5	6	6	2.5	4	4.5	3
3	6	4	9	10	8	3	6	6	4
4	7	10	11	12	9	5	7	7.5	5
5	8	15	14	15	10	8	8	9	6
5.5	9	20	20	18	13	9	12	9.5	8
8.5	9	23.5	22	20	15	12	13	10.5	23
9.5	12			23	16	14	14		
11	13			24	24	14.5	17		
12	14					17	19		
13.5	16					19.5	21		
18	17								
20	25								

Cuadro 29: Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 100% a 60% para ensayos de flexión.

Datos Carga-Deformación (lbs y mm)									
F (lbs)	50 %	F (lbs)	40 %	F (lbs)	30 %	F (lbs)	20 %	F (lbs)	10 %
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	3	1	1.5	2	2	2	5	4
2	7	6.5	3	2.5	5	3	3	6.5	6
3.5	8	7.5	5	3.5	6	5	4	7.5	7
4.5	10	8.5	6	7.5	8	7	5	9	9
5.5	11	12	7	10	9	8	6	10.5	11
7	12	13.5	9	13.5	13	11	7	13.5	13
9.5	13	15	13	16	18	12	8	15	24
10	14	17.5	17	16.5	21	13.5	9		
10.5	16	18	19			14.5	10		
11.5	17	19	20			16.5	11		
12	18	20	21			17.5	13		
12.5	20	21	23			18	15		
13	26					19	16		
						20	17		
						20.5	18		
						23	23		

Cuadro 30: Tabla de carga/deformación de las probetas con relleno de 50 % a 10 % para ensayos de flexión.

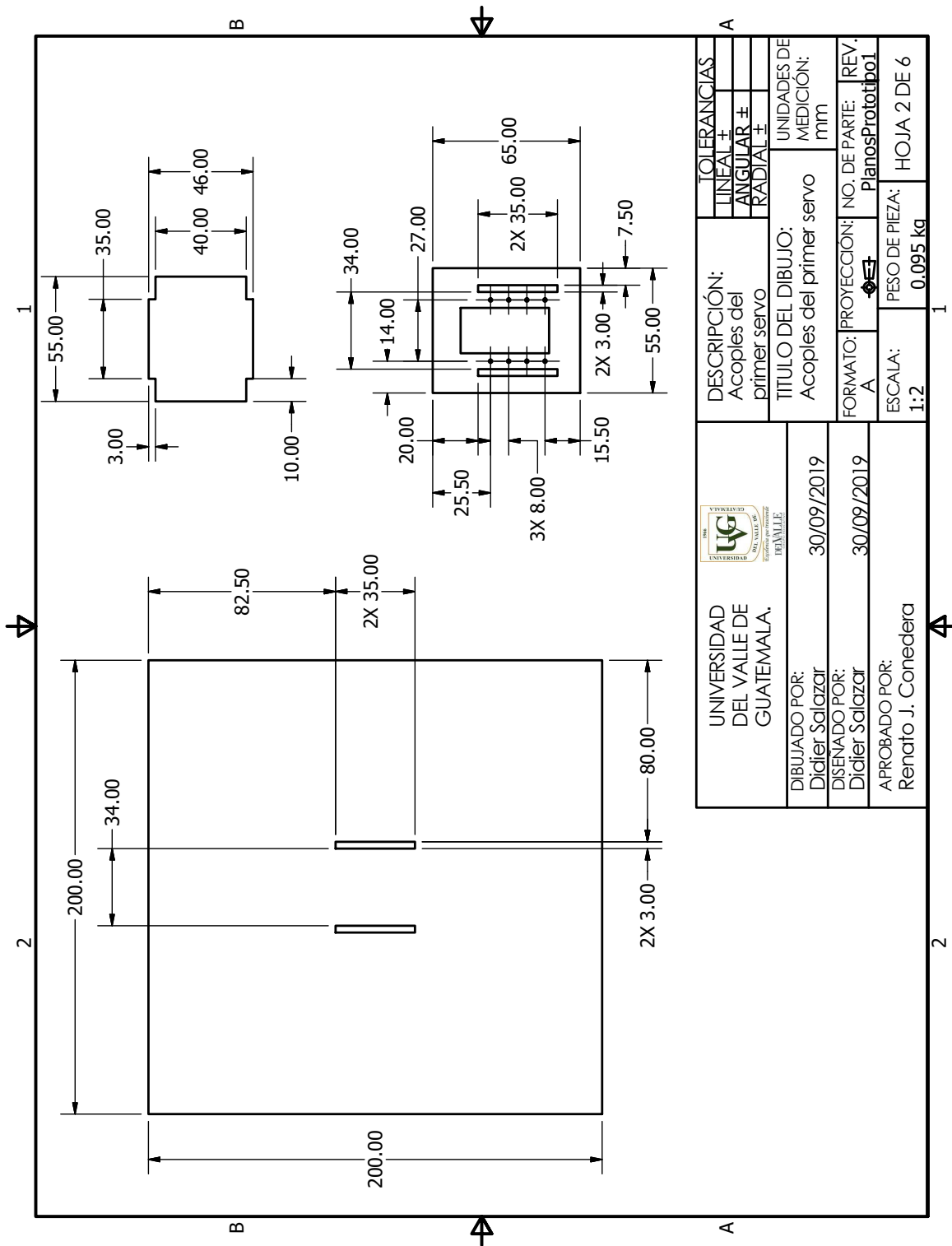
## 11.2. Planos de construcción

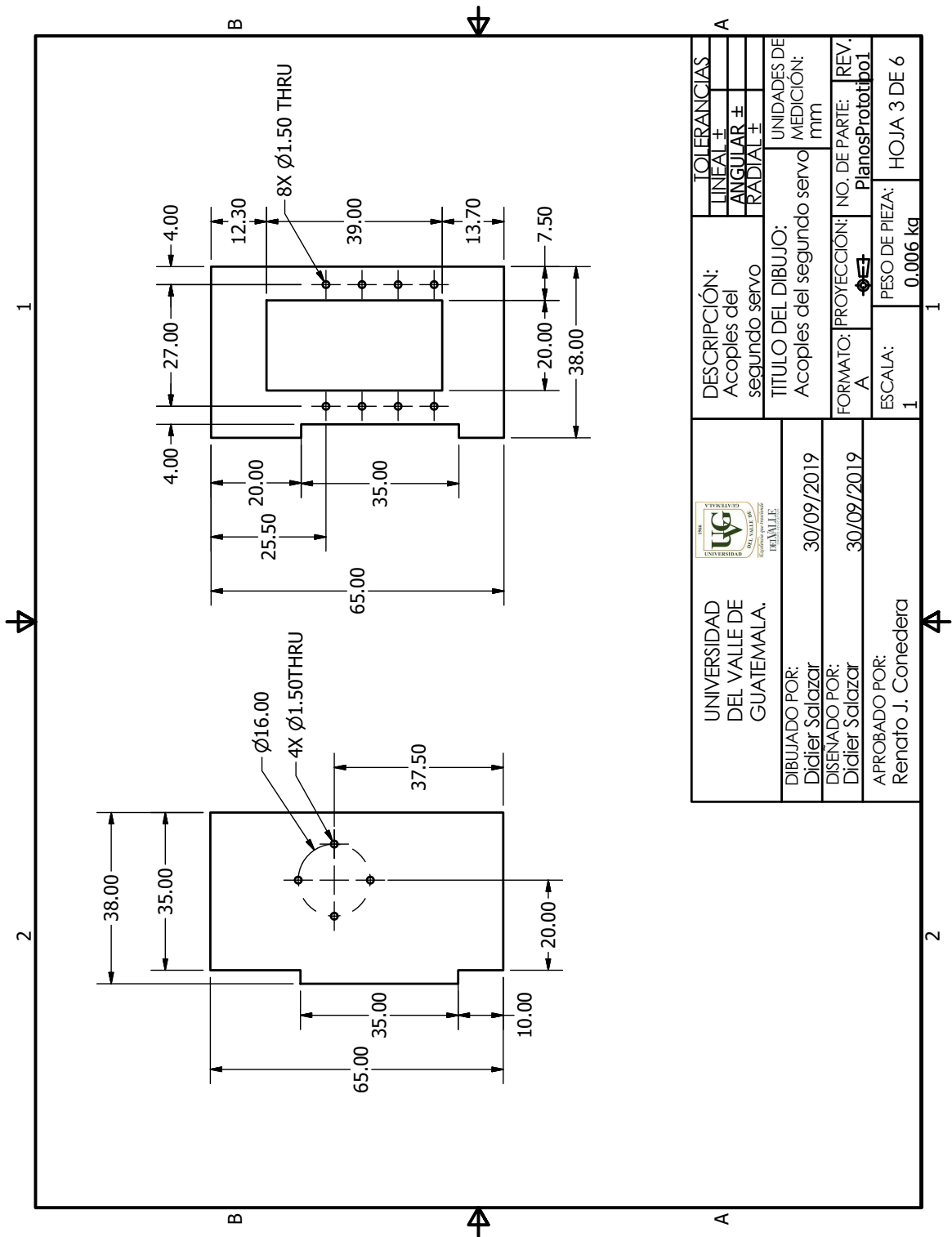


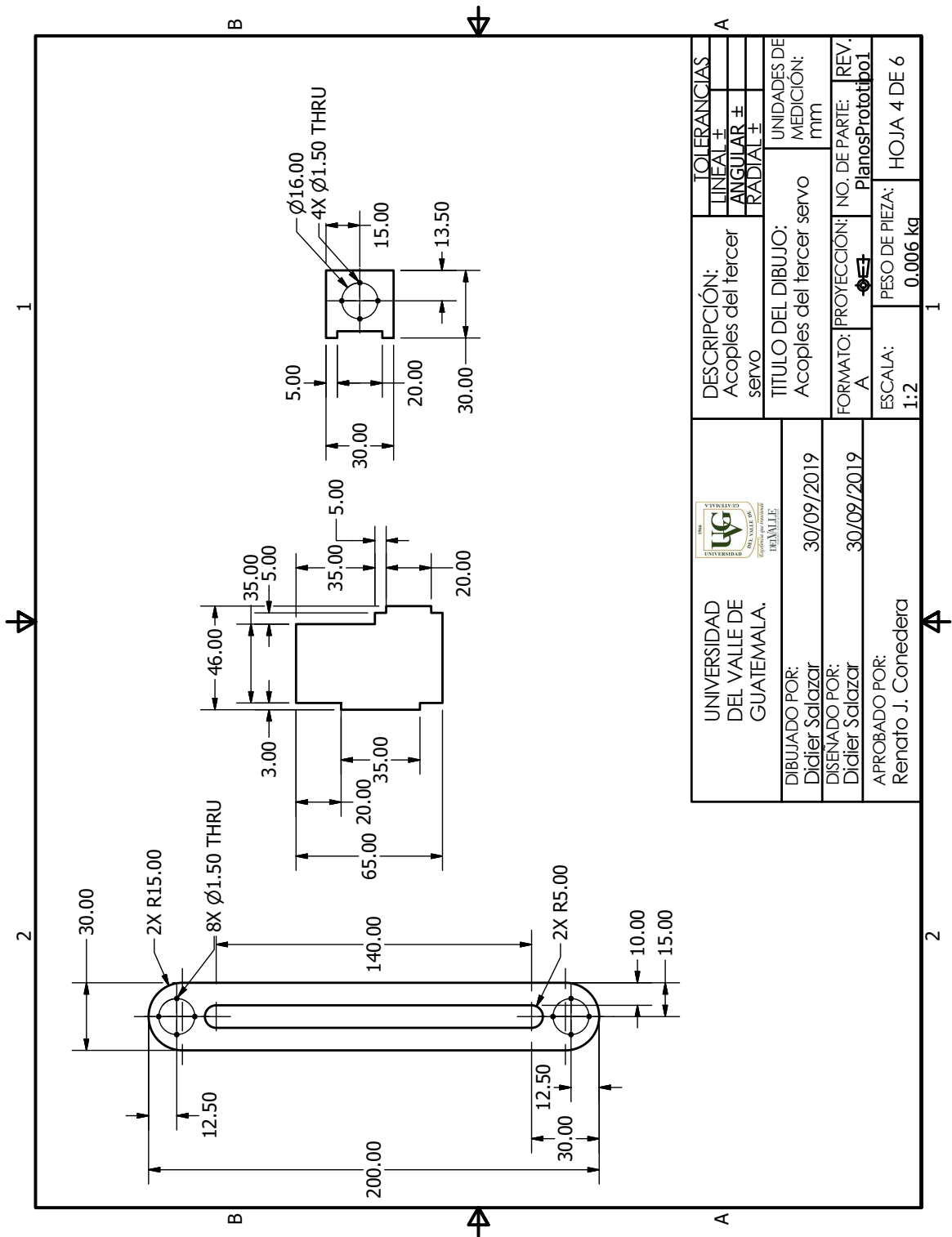
LISTA DE PIEZAS			DESCRIPCIÓN
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	
1	1	Base	Base principal del brazo
2	2	Soportes_levantamiento	Soportes para la base del primer servo
3	1	Base_Servo1	Base del primer servo
4	8	AX12AServo	Servomotor Dynamixel AX12A
5	4	Servo2_Base	Base del segundo servo
6	5	Servo2_Lateral	Base lateral del segundo servo
7	1	Servo3_Base	Base del tercer servo
8	2	Servo3_Lateral_derecho	Base lateral derecha del tercer servo
9	2	Brazos_De_Servo2_A_3	Eslabón que va del segundo servo al tercer servo
10	1	Servo4_Base	Base del cuarto servo
11	1	Brazos_Servo5_A_6	Eslabón que va del quinto servo al sexto servo
12	1	Servo8_Pieza_Linear	Pieza que simula la junta prismática del brazo
13	1	Servo8_Tornillo	Tornillo sin fin que va atomillado al octavo servo
14	1	Servo8_Base	Base del octavo servo


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.		DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS
		Diseño del primer prototipo	LINEAL ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Diciel Salazar	30/09/2019	TÍTULO DEL DIBUJO:	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISENADO POR: Diciel Salazar	30/09/2019	Prototipo	mm
APROBADO POR: Renato J. Conedera		FORMATO:	NO. DE PARTE:
		B	PlanosPrototipo
		ESCALA:	PESO DE PIEZA:
		1:3	724.517 g
			HOJA 1 DE 6

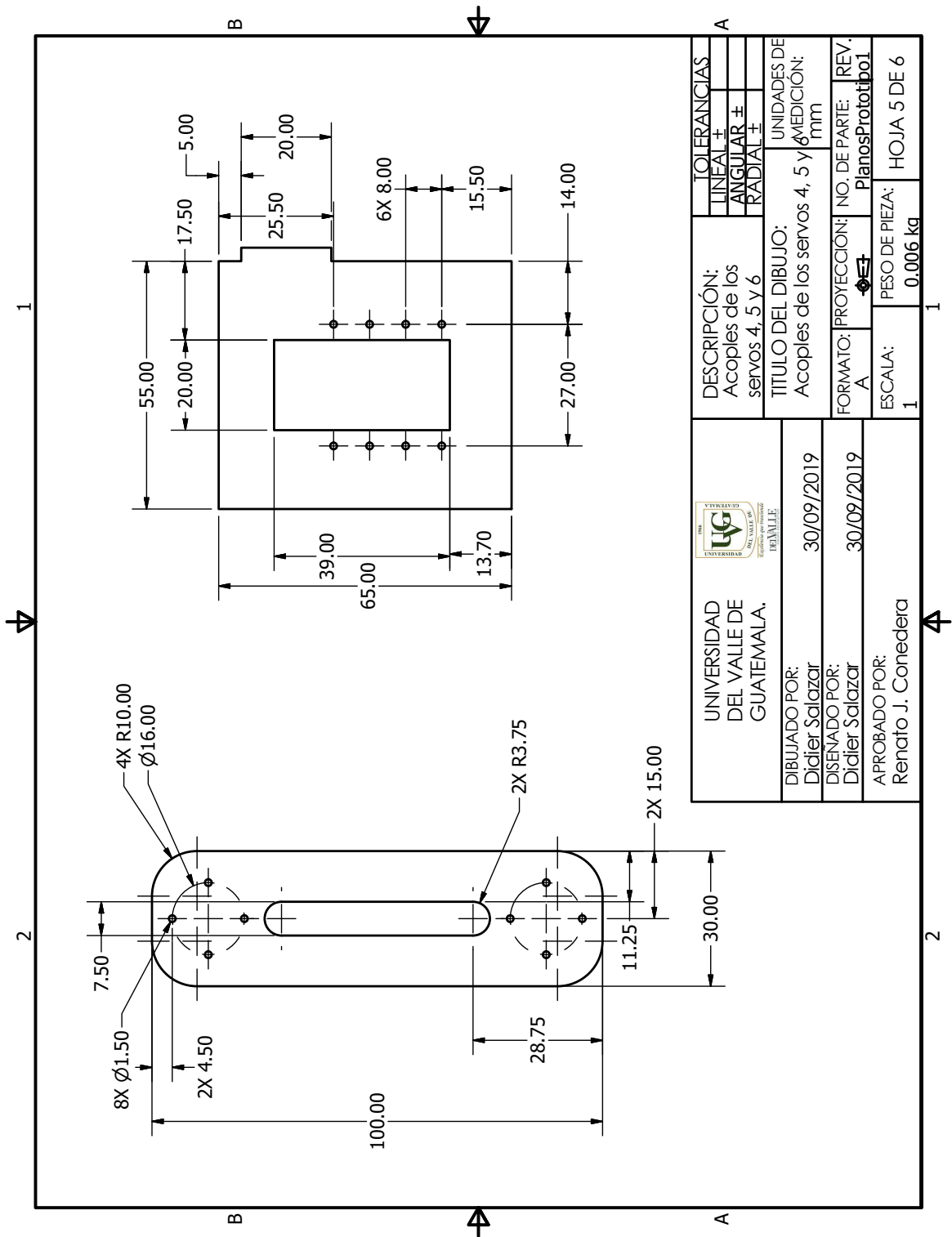
NOTA: Todos los espesores de las piezas son de 3 mm, a menos que se especifique lo contrario.

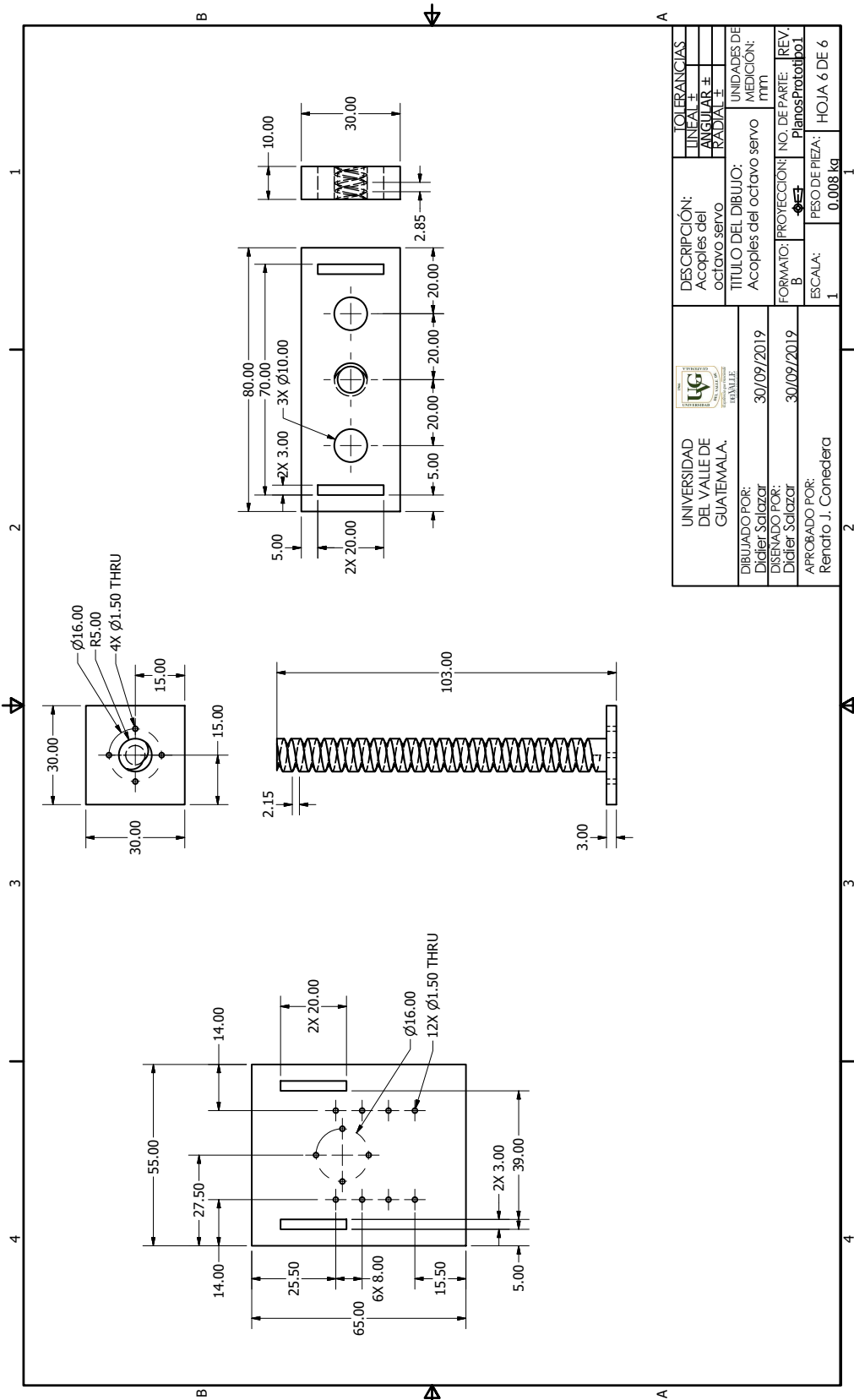





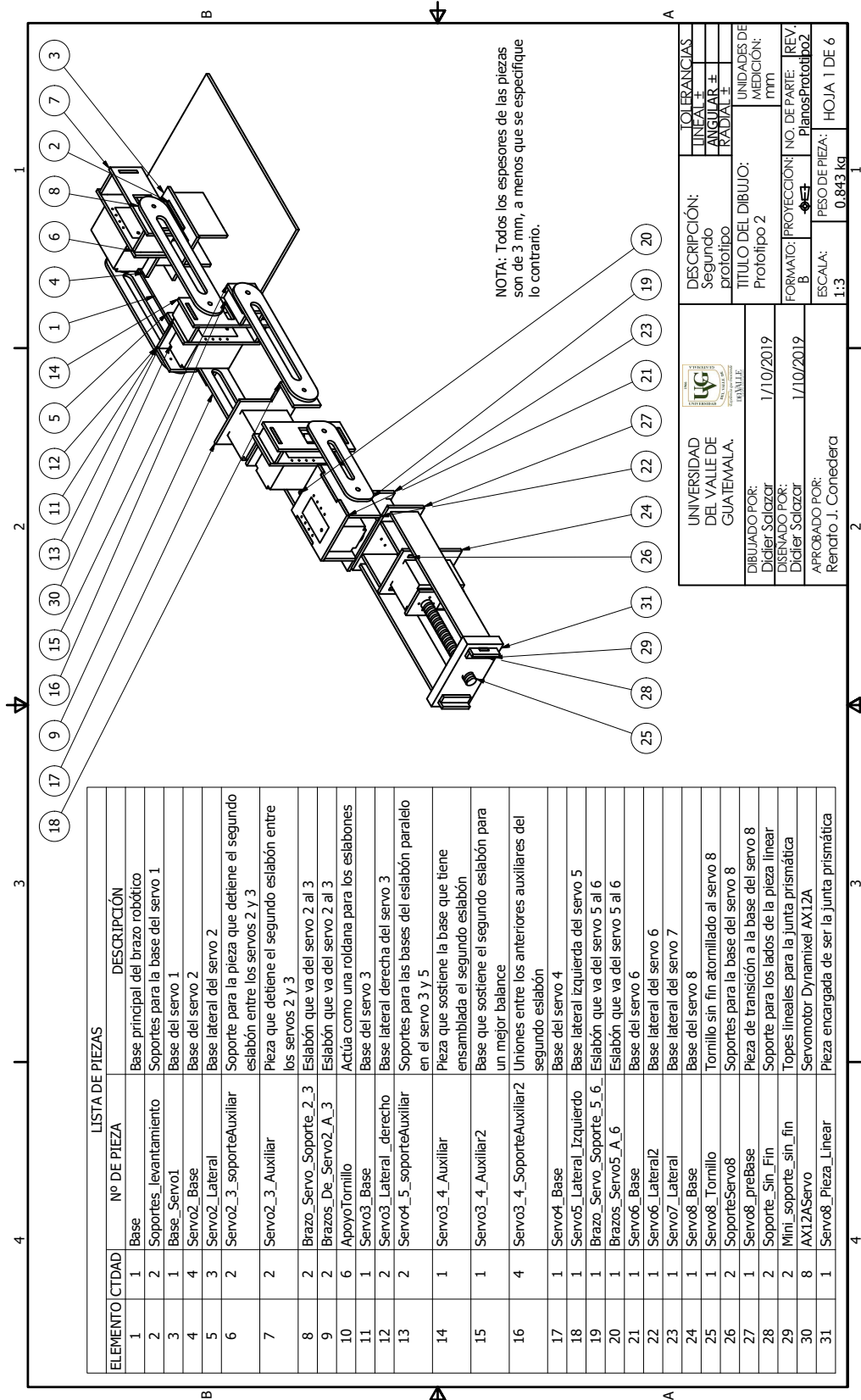


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.		DESCRIPCIÓN:		TOLERANCIAS	
		Acoples del tercer servo		LINEAL ±	
				ANGULAR ±	
TÍTULO DEL DIBUJO:		UNIDADES DE MEDICIÓN:		mm	
Acoples del tercer servo					
FORMATO:	PROYECCIÓN:	NO. DE PARTE:	REV.:		
A	1	PlanosPrototipo1	1		
ESCALA:	PESO DE PIEZA:	HOJA 4 DE 6			
1:2	0.006 kg				





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.		DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS
		Acoples del octavo servo	LINIAL ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Dígitel Salazar	30/09/2019	TÍTULO DEL DIBUJO:	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISEÑADO POR: Dígitel Salazar	30/09/2019	Acoples del octavo servo	mm
APROBADO POR: Renfro J. Conedera		FORMATO:	PROTECCIÓN: NO. DE PARTE:
		B	PlenosProtobol
		ESCALA:	PESO DE PIEZA:
		1	0.008 kg
			HOJA 6 DE 6



NOTA: Todos los espesores de las piezas son de 3 mm, a menos que se especifique lo contrario.

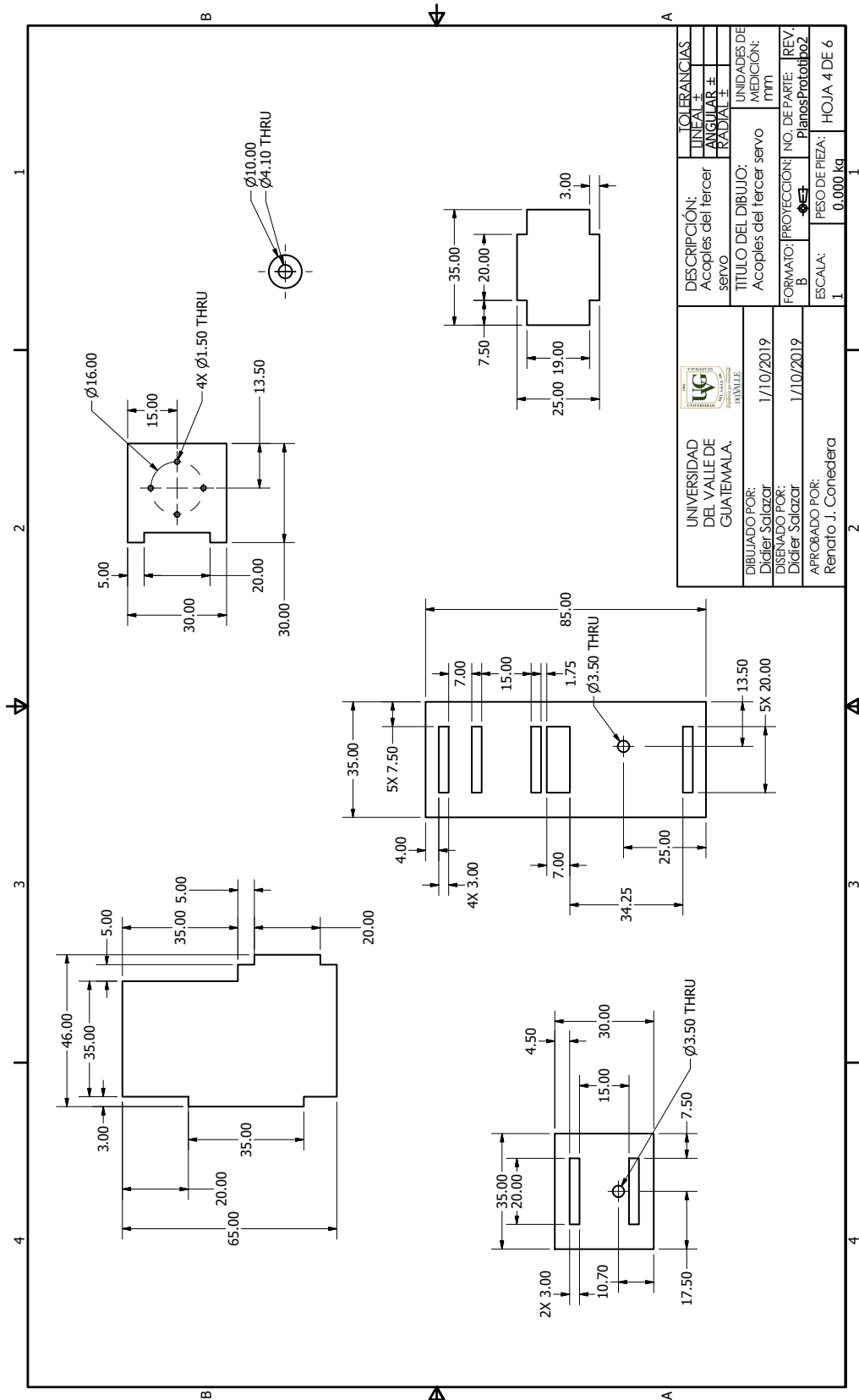
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base	Base principal del brazo robótico
2	2	Soportes_levantamiento	Soportes para la base del servo 1
3	1	Base_Servo1	Base del servo 1
4	4	Servo2_Base	Base del servo 2
5	3	Servo2_Lateral	Base lateral del servo 2
6	2	Servo2_3_soporteAuxiliar	Soporte para la pieza que detiene el segundo eslabón entre los servos 2 y 3
7	2	Servo2_3_Auxiliar	Pieza que detiene el segundo eslabón entre los servos 2 y 3
8	2	Brazo_Servo_Soporte_2_3	Eslabón que va del servo 2 al 3
9	2	Brazos_De_Servo2_A_3	Eslabón que va del servo 2 al 3
10	6	ApoyoTornillo	Actúa como una roldana para los eslabones
11	1	Servo3_Base	Base del servo 3
12	2	Servo3_Lateral_derecho	Base lateral derecha del servo 3
13	2	Servo4_5_soporteAuxiliar	Soportes para las bases del eslabón paralelo en el servo 3 y 5
14	1	Servo3_4_Auxiliar	Pieza que sostiene la base que tiene ensamblada el segundo eslabón
15	1	Servo3_4_Auxiliar2	Base que sostiene el segundo eslabón para un mejor balance
16	4	Servo3_4_SoporteAuxiliar2	Uniones entre los anteriores auxiliares del segundo eslabón
17	1	Servo4_Base	Base del servo 4
18	1	Servo5_Lateral_Izquierdo	Base lateral izquierda del servo 5
19	1	Brazo_Servo_Soporte_5_6	Eslabón que va del servo 5 al 6
20	1	Brazos_Servo5_A_6	Eslabón que va del servo 5 al 6
21	1	Servo6_Base	Base del servo 6
22	1	Servo6_Lateral2	Base lateral del servo 6
23	1	Servo7_Lateral	Base lateral del servo 7
24	1	Servo8_Base	Base del servo 8
25	1	Servo8_Tornillo	Tornillo sin fin atomillado al servo 8
26	2	SoporteServo8	Soportes para la base del servo 8
27	1	Servo8_preBase	Pieza de transición a la base del servo 8
28	2	Soporte_Sin_Fin	Soporte para los lados de la pieza linear
29	2	Mini_soporte_sin_fin	Topes lineales para la junta prismática
30	8	AX12AServo	Servomotor Dynamixel AX12A
31	1	Servo8_Pieza_Linear	Pieza encargada de ser la junta prismática

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.	DESCRIPCIÓN:	Segundo prototipo
	TÍTULO DEL DIBUJO:	Prototipo 2
DIBUJADO POR:	Dicler Salazar	1/10/2019
DISERVAO POR:	Dicler Salazar	1/10/2019
APROBADO POR:	Renfro J. Conedera	
ESCALA:	1:3	
FORMATO:	B	
PROYECCIÓN:	1 <sup>o</sup>	
NO. DE PARTE:	Plenos	Prototipo 2
PESO DE PIEZA:	0.843 kg	
REV.:	HOJA 1 DE 6	

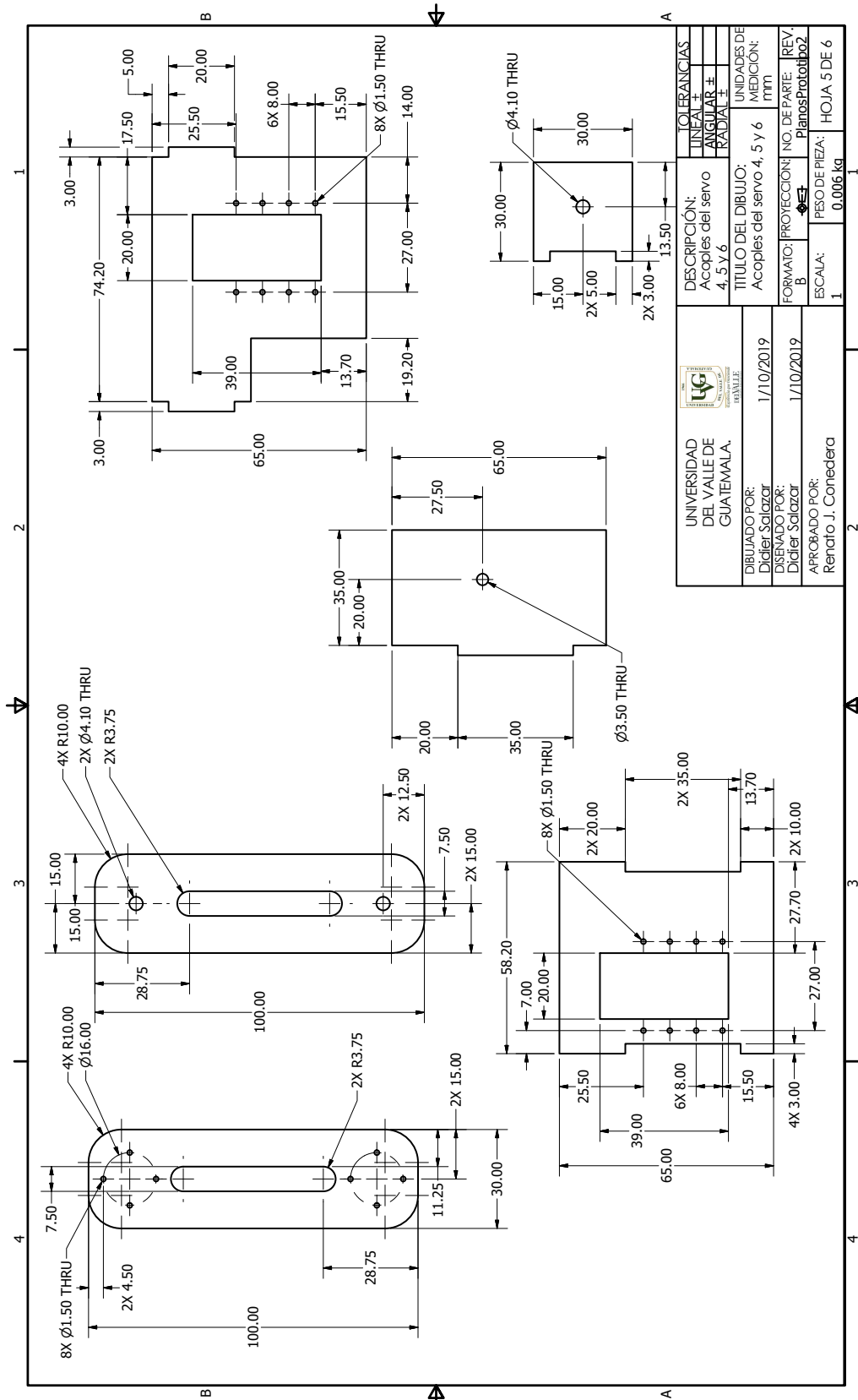
TOLERANCIAS	LINEAL ±	
	ANGULAR ±	
	RADIAL ±	
UNIDADES DE MEDICIÓN:		mm



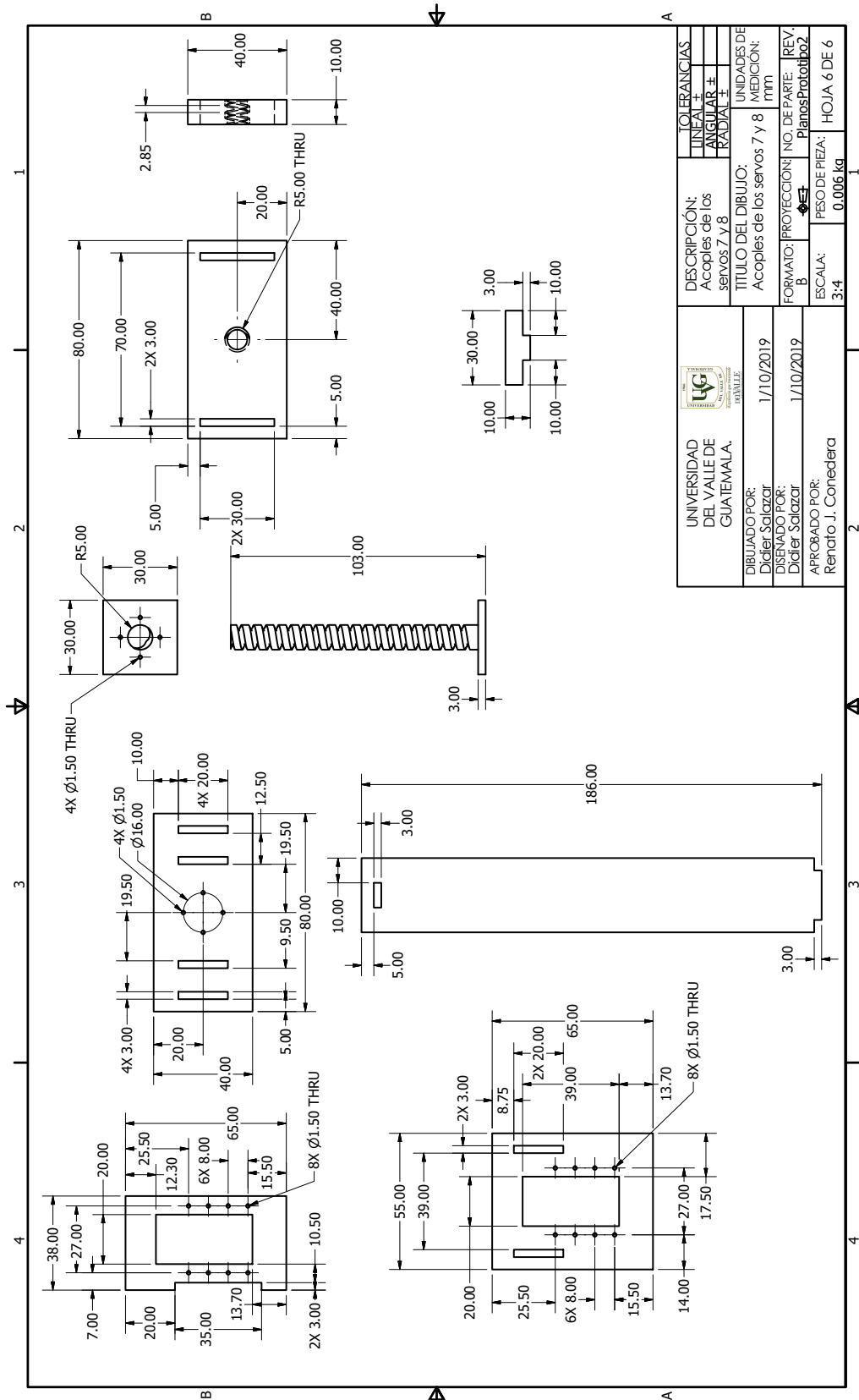




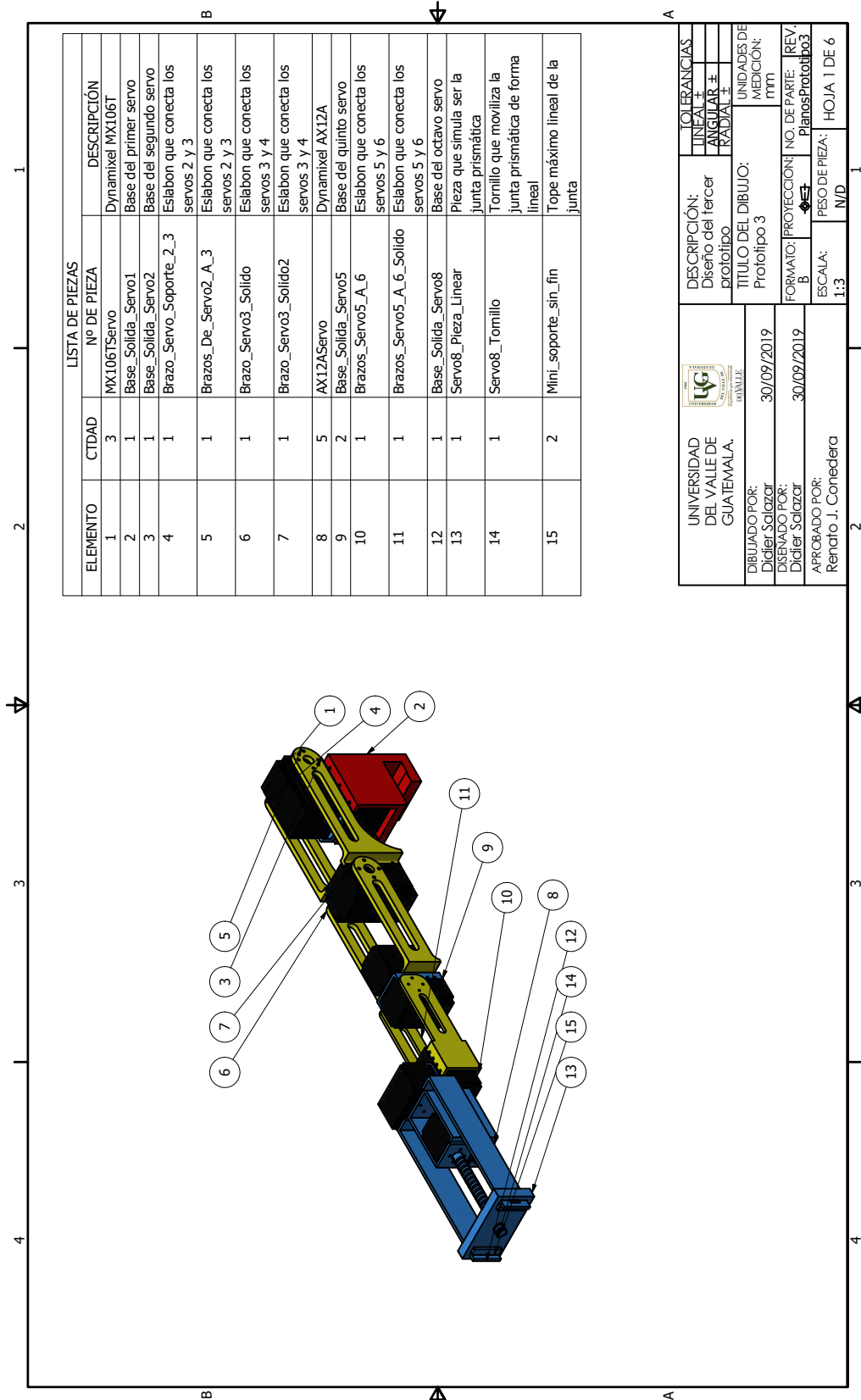
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.	DESCRIPCIÓN:	Acoples del tercer servo	TOLERANCIAS:
	TÍTULO DEL DIBUJO:	Acoples del tercer servo	LÍNEA ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Diciel Salazar	UNIDADES DE MEDICIÓN:	mm	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISENADO POR: Diciel Salazar	FORMATO:	B	NO. DE PARTE:
APROBADO POR: Renfro J. Conedera	PROYECCIÓN:	1/10/2019	PesosProtob2
	ESCALA:	1	PESO DE PIEZA:
			0.000 kg
			HOJA 4 DE 6



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.		DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS
		Acoples del servo 4, 5 y 6	LINIAL ±
DIBUJADO POR:	1/10/2019	TÍTULO DEL DIBUJO:	ANGULAR ±
DESIGNADO POR:	1/10/2019	Acoples del servo 4, 5 y 6	RADIAL ±
APROBADO POR:	1/10/2019	FORMA TO:	UNIDADES DE MEDICIÓN: mm
Renfro J. Conedera		PROYECCIÓN:	NO. DE PARTE: PlanosProtob02
		ESCALA:	PESO DE PIEZA: 0.006 kg
			HOJA 5 DE 6



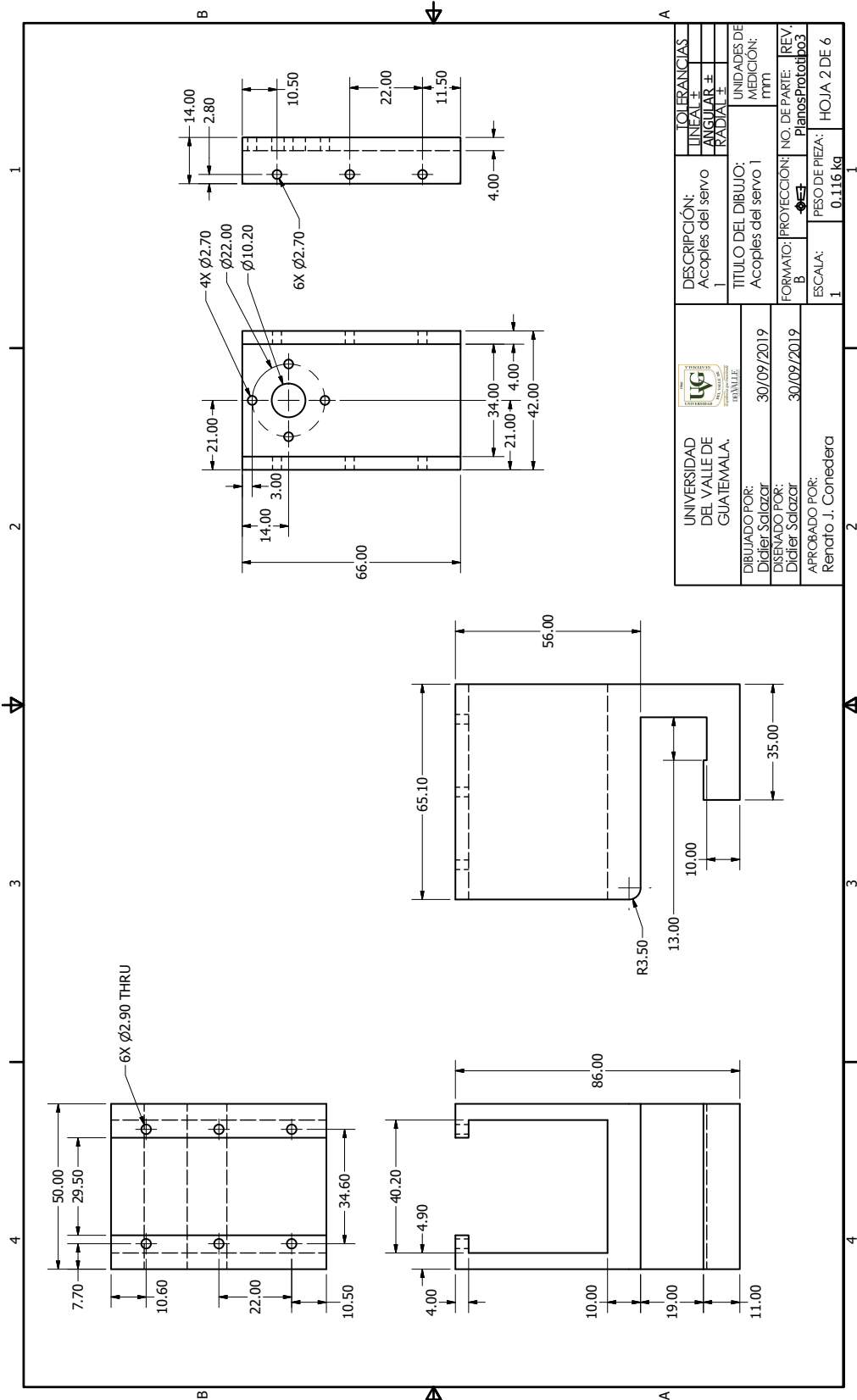
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	DESCRIPCIÓN: Acoples de los servos 7 y 8	TOLERANCIAS	
		LINEAL ±	ANGULAR ±
DIBUJADO POR: Dígitel Salazar	TÍTULO DEL DIBUJO: Acoples de los servos 7 y 8	UNIDADES DE MEDICIÓN: mm	
DISENADO POR: Dígitel Salazar	FORMATO: B	PROTECCIÓN: B	NO. DE PARTE: PlenosPrototipo2
APROBADO POR: Renato J. Conedera	ESCALA: 3:4	PESO DE PIEZA: 0.006 kg	REV. DE HOJA 6 DE 6



LISTA DE PIEZAS

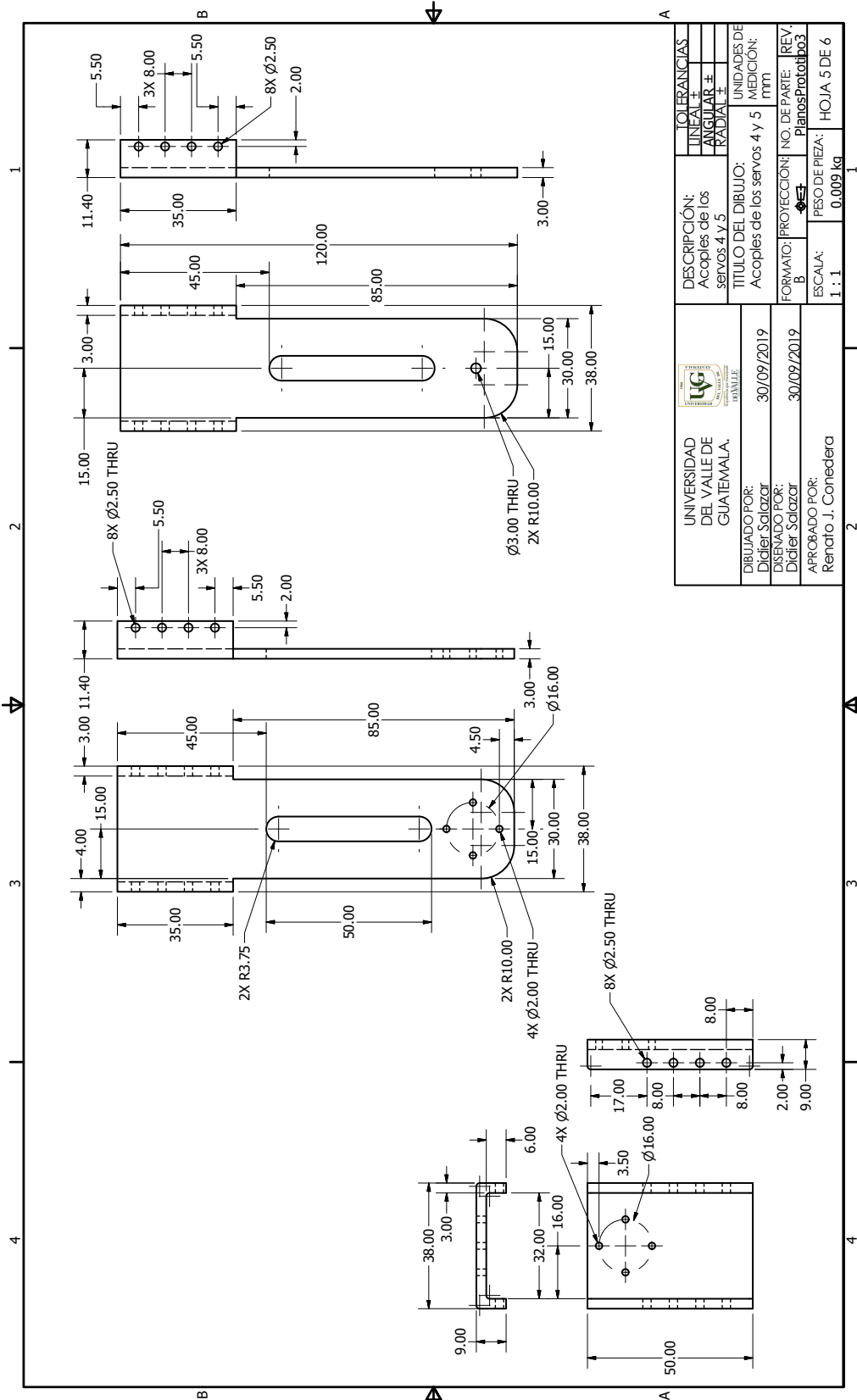
ELEMENTO	CTIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	3	MX106TServo	Dynamixel MX106T
2	1	Base_Solida_Servo1	Base del primer servo
3	1	Base_Solida_Servo2	Base del segundo servo
4	1	Brazo_Servo_Soporte_2_3	Eslabon que conecta los servos 2 y 3
5	1	Brazos_De_Servo2_A_3	Eslabon que conecta los servos 2 y 3
6	1	Brazo_Servo3_Solido	Eslabon que conecta los servos 3 y 4
7	1	Brazo_Servo3_Solido2	Eslabon que conecta los servos 3 y 4
8	5	AX12AServo	Dynamixel AX12A
9	2	Base_Solida_Servo5	Base del quinto servo
10	1	Brazos_Servo5_A_6	Eslabon que conecta los servos 5 y 6
11	1	Brazos_Servo5_A_6_Solido	Eslabon que conecta los servos 5 y 6
12	1	Base_Solida_Servo8	Base del octavo servo
13	1	Servo8_Pieza_Linear	Pieza que simula ser la junta prismática
14	1	Servo8_Tornillo	Tornillo que moviliza la junta prismática de forma lineal
15	2	Mini_soporte_sin_fin	Tope máximo lineal de la junta

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.		DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS:
		Diseño del tercer prototipo	LINEAL ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Diciel Salazar	30/09/2019	TÍTULO DEL DIBUJO:	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISEÑADO POR: Diciel Salazar	30/09/2019	Prototipo 3	mm
APROBADO POR: Renato J. Conedera		FORMATO: PROYECCIÓN: NO. DE PARTE: REV.	PlanosPrototipo3
		ESCALA: PESO DE PIEZA: HOJA 1 DE 6	1:3 N/D

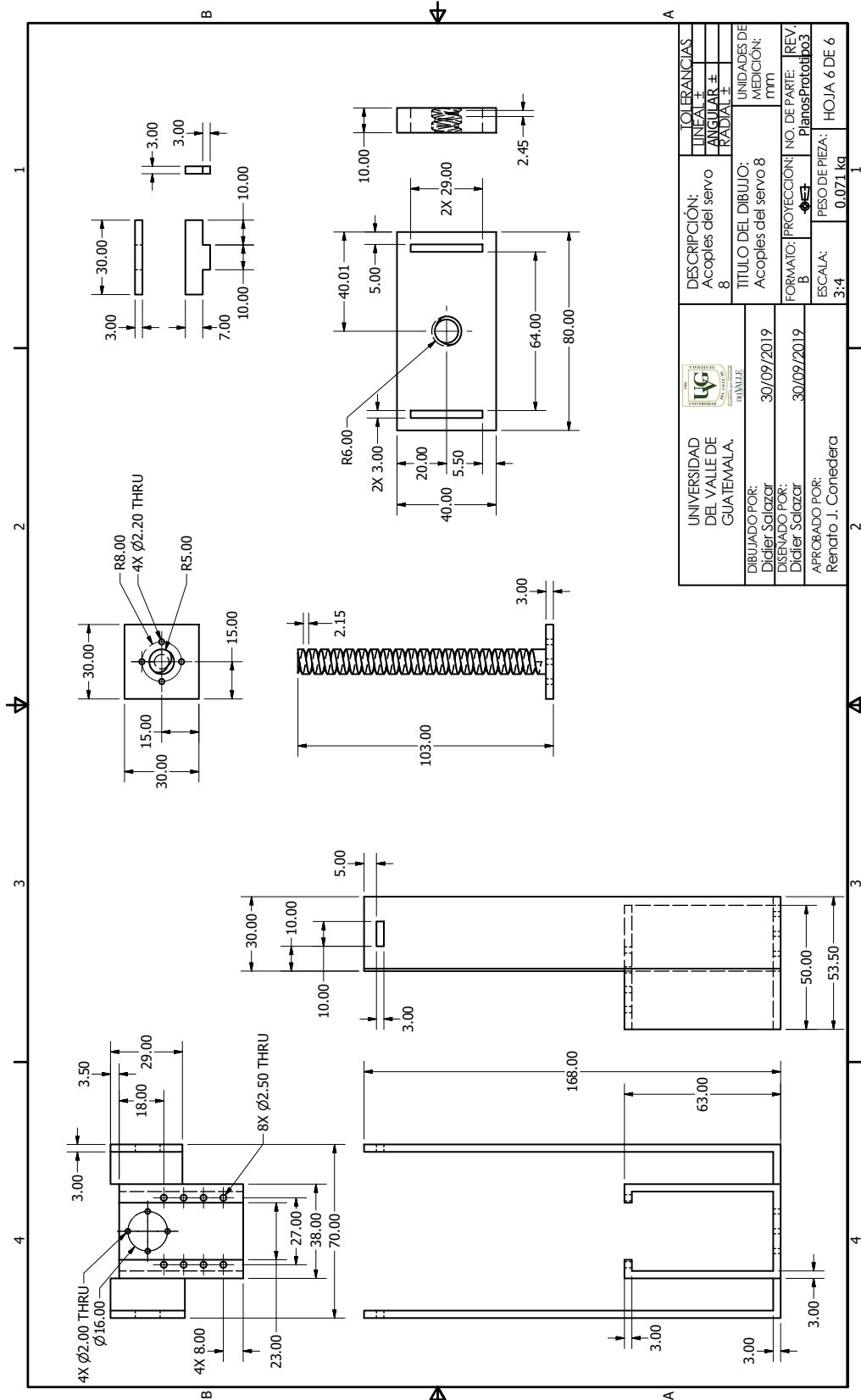




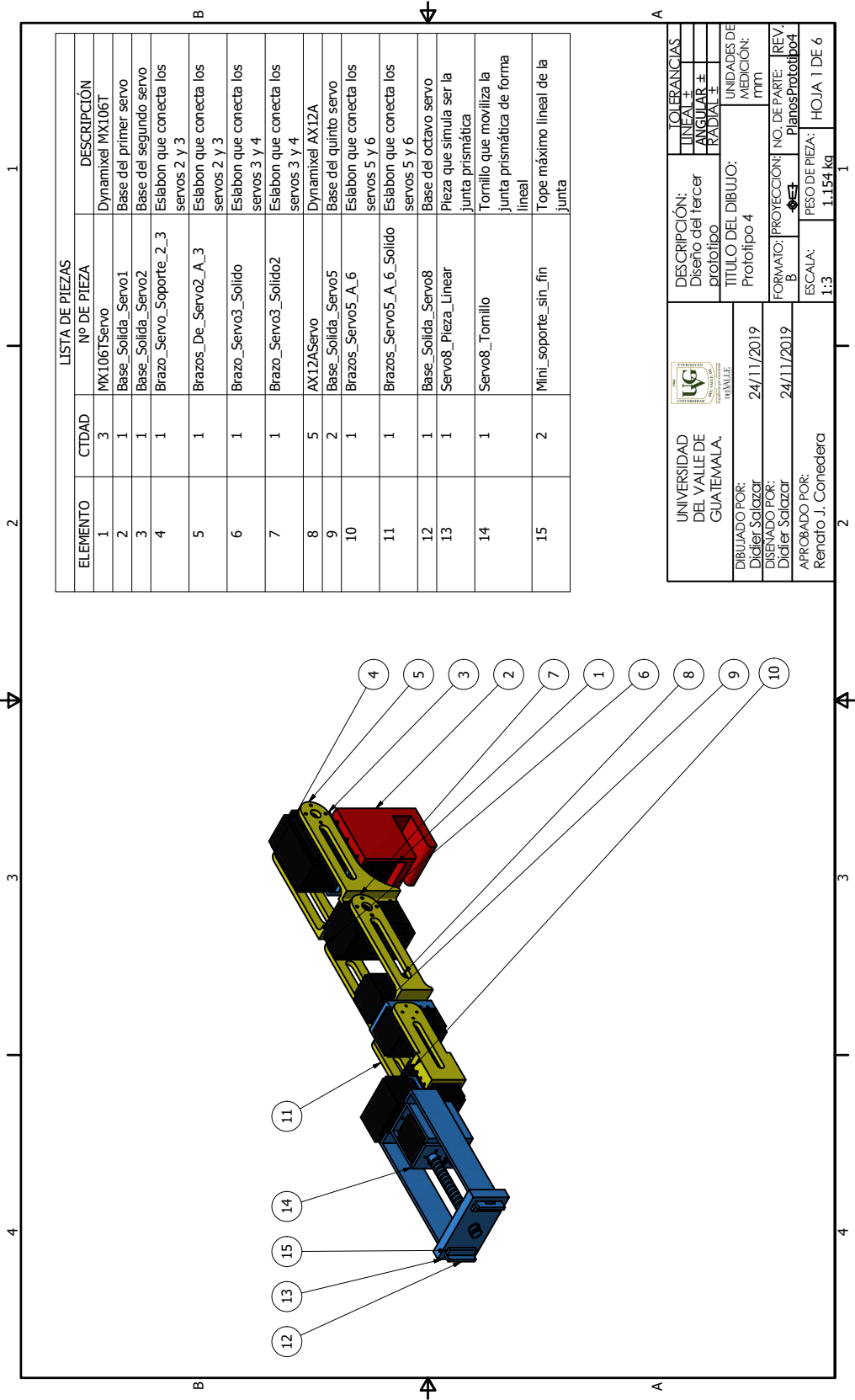




UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.	DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS
	Acoples de los servos 4 y 5	LINEAL ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Dígitel Salazar	TÍTULO DEL DIBUJO: Acoples de los servos 4 y 5	UNIDADES DE MEDICIÓN: mm
DISENADO POR: Dígitel Salazar	FORMATO:	NO. DE PARTE: B
APROBADO POR: Renato J. Conedera	PROYECCIÓN:	REV.:
	ESCALA:	HOJA 5 DE 6
	1 : 1	0.009 kg




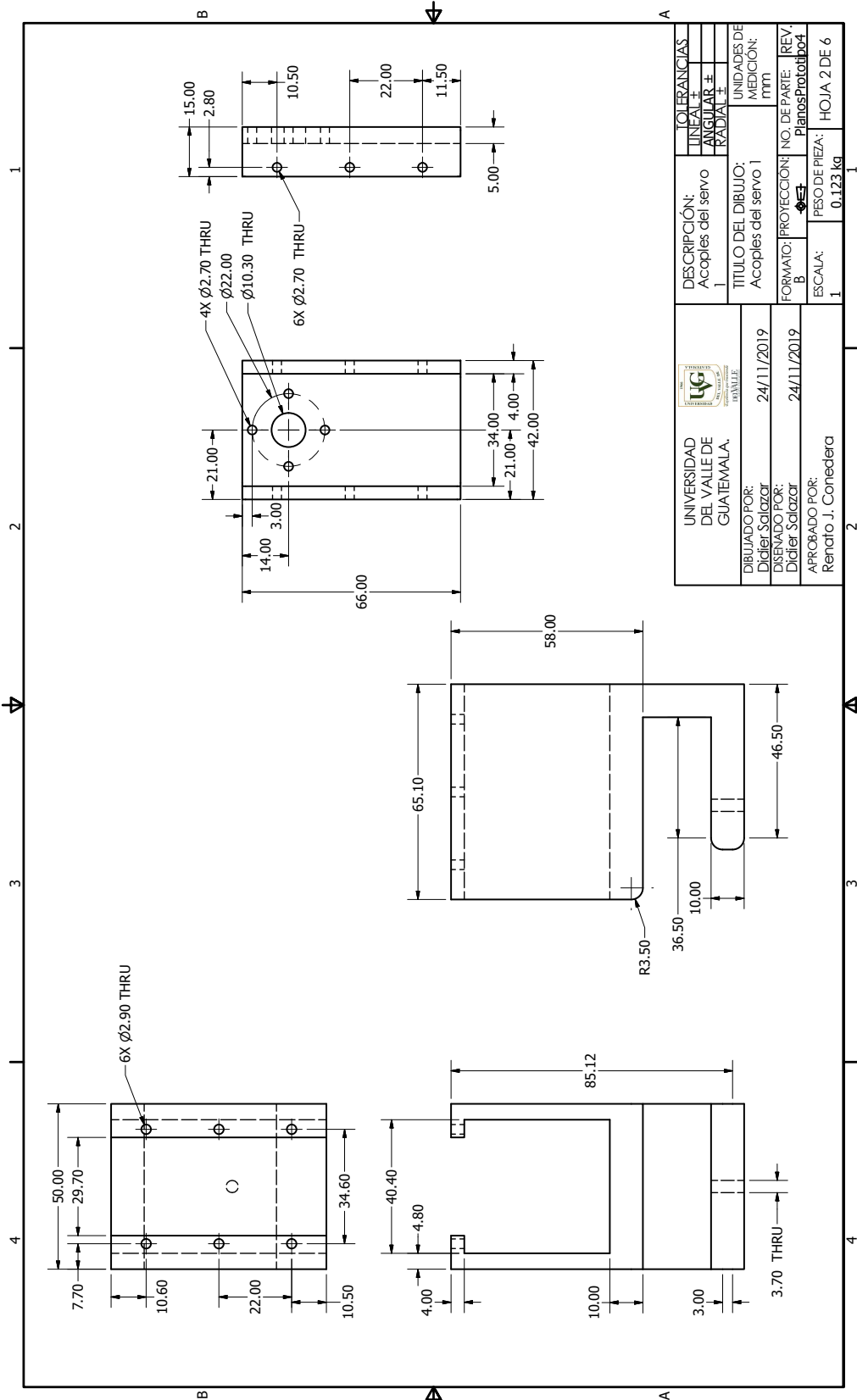
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.	DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS
	Acoples del servo 8	LINIA ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Digler Salazar	TÍTULO DEL DIBUJO:	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISENADO POR: Digler Salazar	Acoples del servo 8	mm
APROBADO POR: Renfro J. Conedera	FORMATO:	NO. DE PARTE:
	B	PlenosProtob03
	ESCALA:	PESO DE PIEZA:
	3:4	0.071 kg
		HOJA 6 DE 6

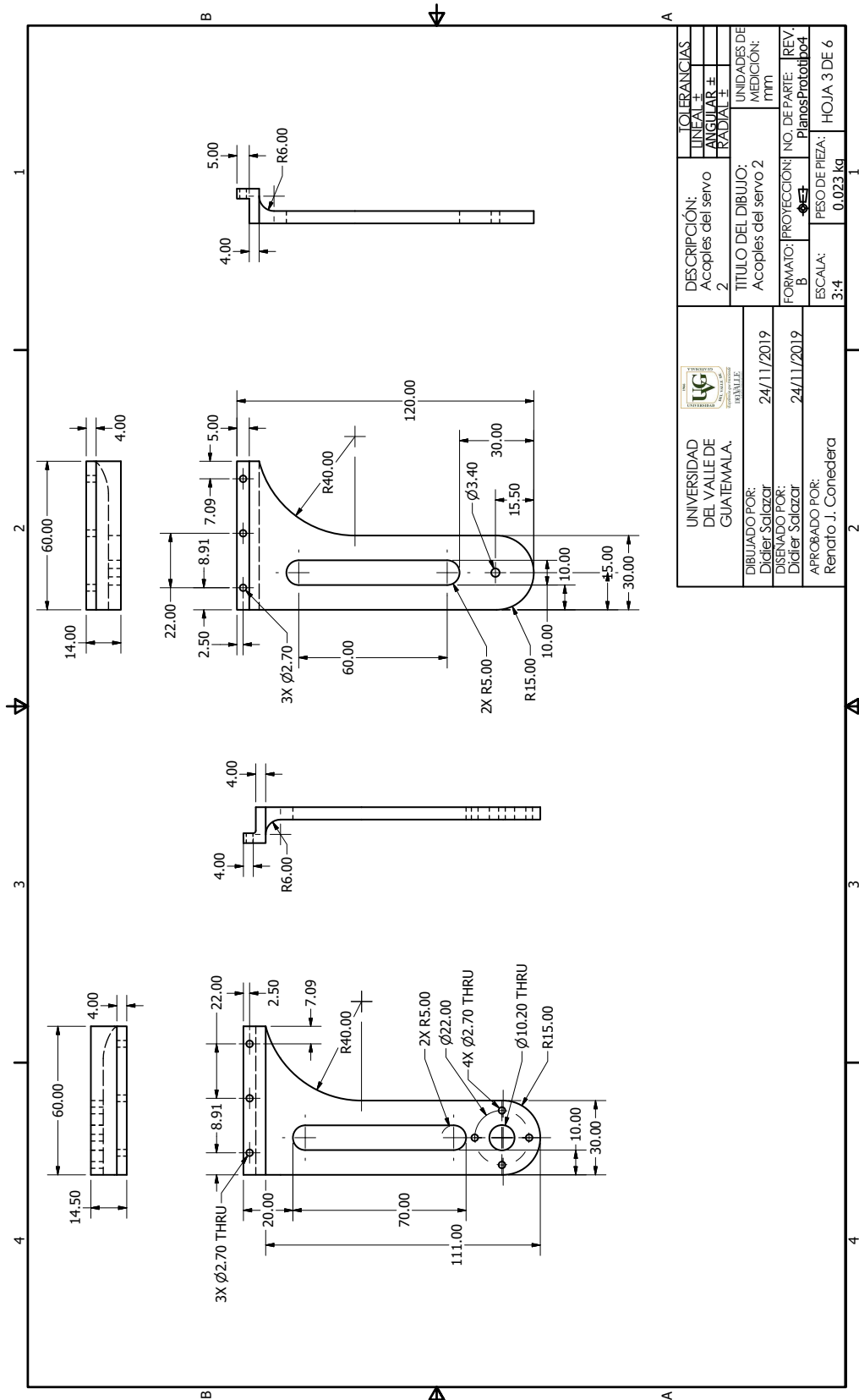


LISTA DE PIEZAS

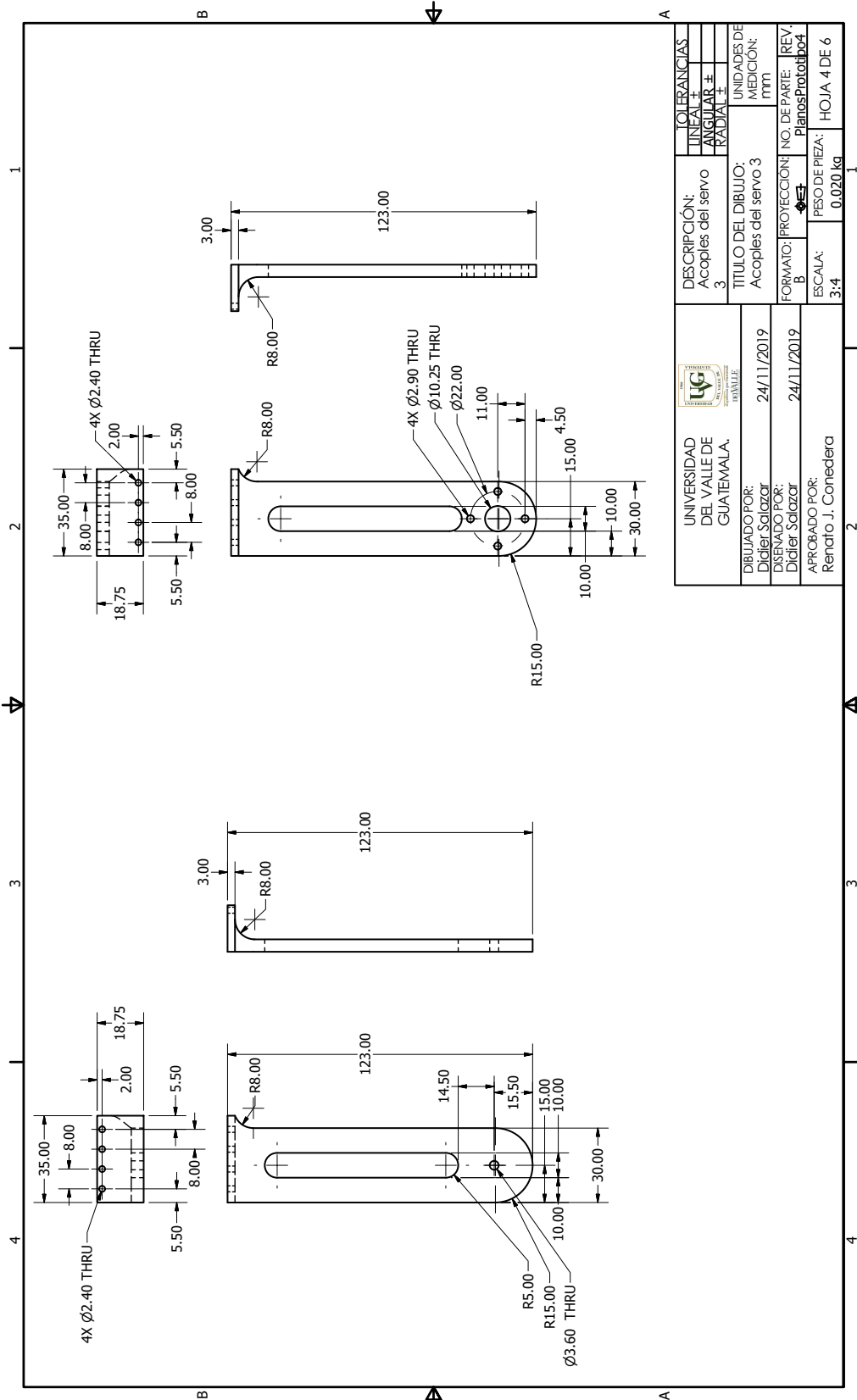
ELEMENTO	CTIDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	3	MX106TServo	Dynamixel MX106T
2	1	Base_Solida_Servo1	Base del primer servo
3	1	Base_Solida_Servo2	Base del segundo servo
4	1	Brazo_Servo_Soporte_2_3	Eslabon que conecta los servos 2 y 3
5	1	Brazos_De_Servo2_A_3	Eslabon que conecta los servos 2 y 3
6	1	Brazo_Servo3_Solido	Eslabon que conecta los servos 3 y 4
7	1	Brazo_Servo3_Solido2	Eslabon que conecta los servos 3 y 4
8	5	AX12AServo	Dynamixel AX12A
9	2	Base_Solida_Servo5	Base del quinto servo
10	1	Brazos_Servo5_A_6	Eslabon que conecta los servos 5 y 6
11	1	Brazos_Servo5_A_6_Solido	Eslabon que conecta los servos 5 y 6
12	1	Base_Solida_Servo8	Base del octavo servo
13	1	Servo8_Pieza_Linear	Pieza que simula ser la junta prismática
14	1	Servo8_Tornillo	Tornillo que moviliza la junta prismática de forma lineal
15	2	Mini_soporte_sin_fin	Tope máximo lineal de la junta

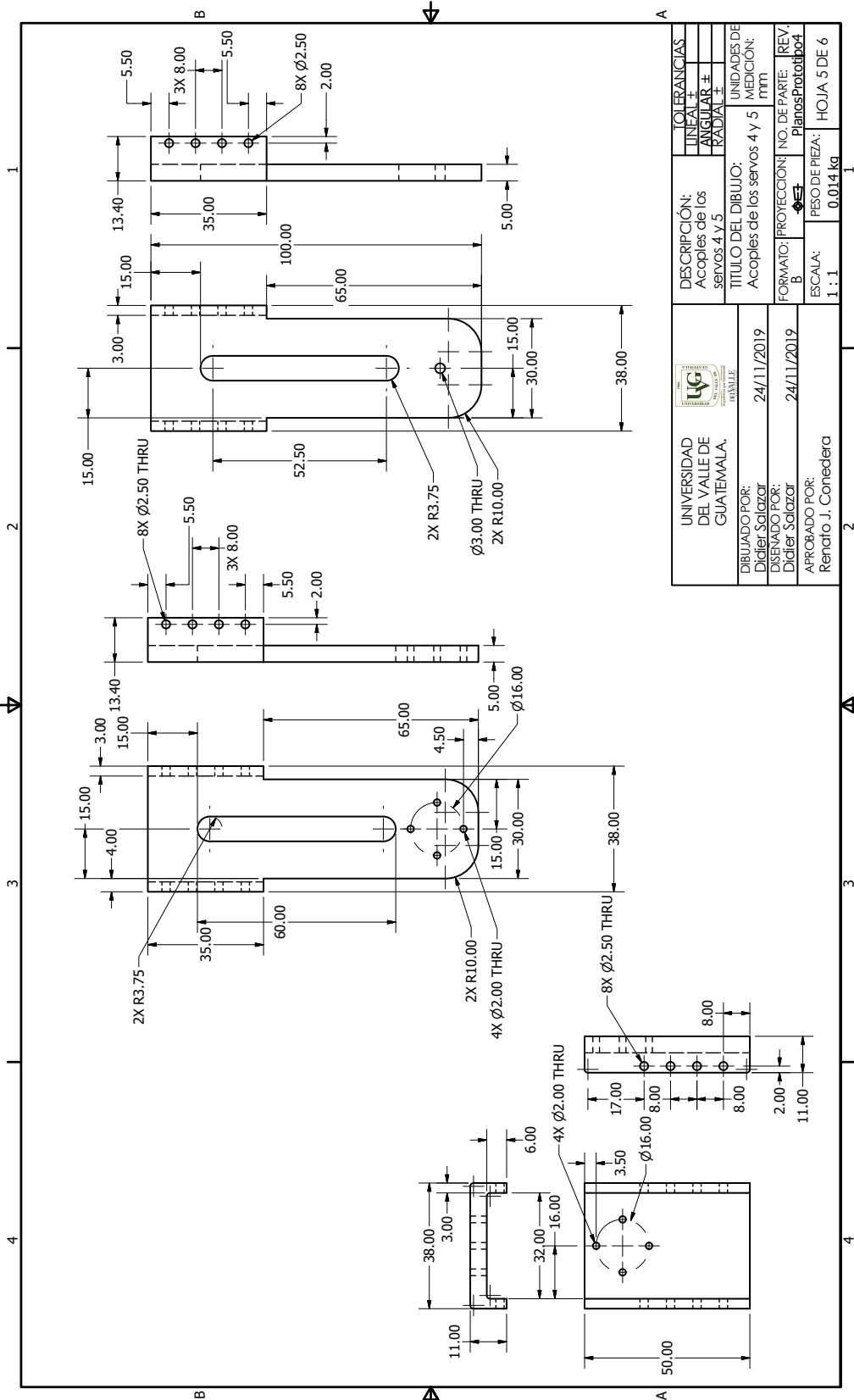
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA.		DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS:
		Diseño del tercer prototipo	LINEAL ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Diciel Salazar	24/11/2019	TÍTULO DEL DIBUJO:	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISEÑADO POR: Diciel Salazar	24/11/2019	Prototipo 4	mm
APROBADO POR: Renfro J. Conedera		FORMA TO: PROYECCIÓN:	NO. DE PARTE:
		B	PlanosPrototipo4
		ESCALA:	PESO DE PIEZA:
		1:3	1.154 kg
			HOJA 1 DE 6





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	DESCRIPCIÓN:	TOLERANCIAS
	Acoples del servo 2	LINEAL ± ANGULAR ± RADIAL ±
DIBUJADO POR: Diciel Salazar	TÍTULO DEL DIBUJO:	UNIDADES DE MEDICIÓN:
DISEÑADO POR: Diciel Salazar	Acoples del servo 2	mm
APROBADO POR: Renato J. Conedera	FORMATO:	NO. DE PARTE:
	B	PlenosProtob04
	ESCALA:	PESO DE PIEZA:
	3:4	0.023 kg
		HOJA 3 DE 6







### 11.3. Análisis de esfuerzos en Inventor

# Análisis de esfuerzos con gravedad en el lado superior y lateral del diseño



## Información de proyecto (iProperties)

### Proyecto

Part Number	Prototipo1_Analisis
Designer	sal15487

## Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	16/09/2019, 8:11 p. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

### Material(es)

Nombre	MDF Tablero de fibras de densidad media	
General	Densidad de masa	0.8 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	7.72 MPa
	Resistencia máxima a tracción	7.72 MPa

Tensión	Módulo de Young	2.4 GPa
	Coeficiente de Poisson	0.25 su
	Módulo cortante	0.96 GPa
Nombre(s) de pieza	Base Soportes_levantamiento Soportes_levantamiento Base_Servo1 Servo2_Base Servo2_Lateral Servo2_Lateral Servo3_Base Servo3_Lateral_derecho Brazos_De_Servo2_A_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Servo3_Lateral_derecho Servo4_Base Servo2_Base Servo2_Lateral Servo2_Base Servo2_Lateral Brazos_Servo5_A_6 Servo2_Base Servo2_Lateral Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Servo8_Base	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coeficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

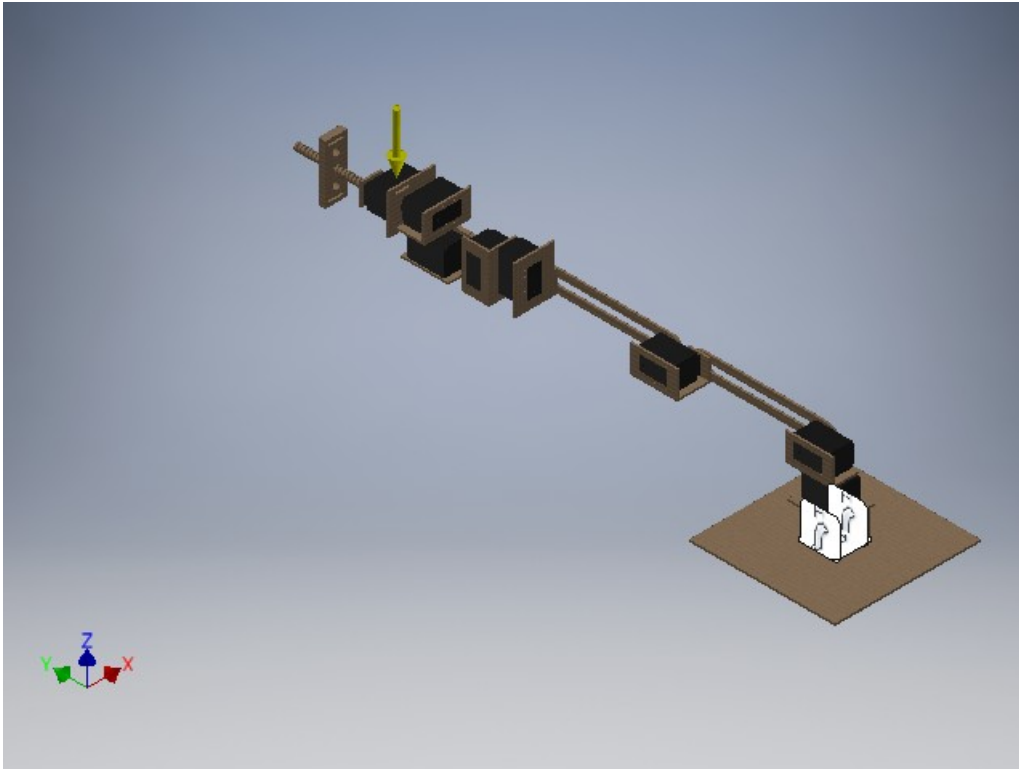
## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
---------------	----------

Magnitud	386.220 in/s <sup>2</sup>
Vector X	0.000 in/s <sup>2</sup>
Vector Y	-0.000 in/s <sup>2</sup>
Vector Z	-386.220 in/s <sup>2</sup>

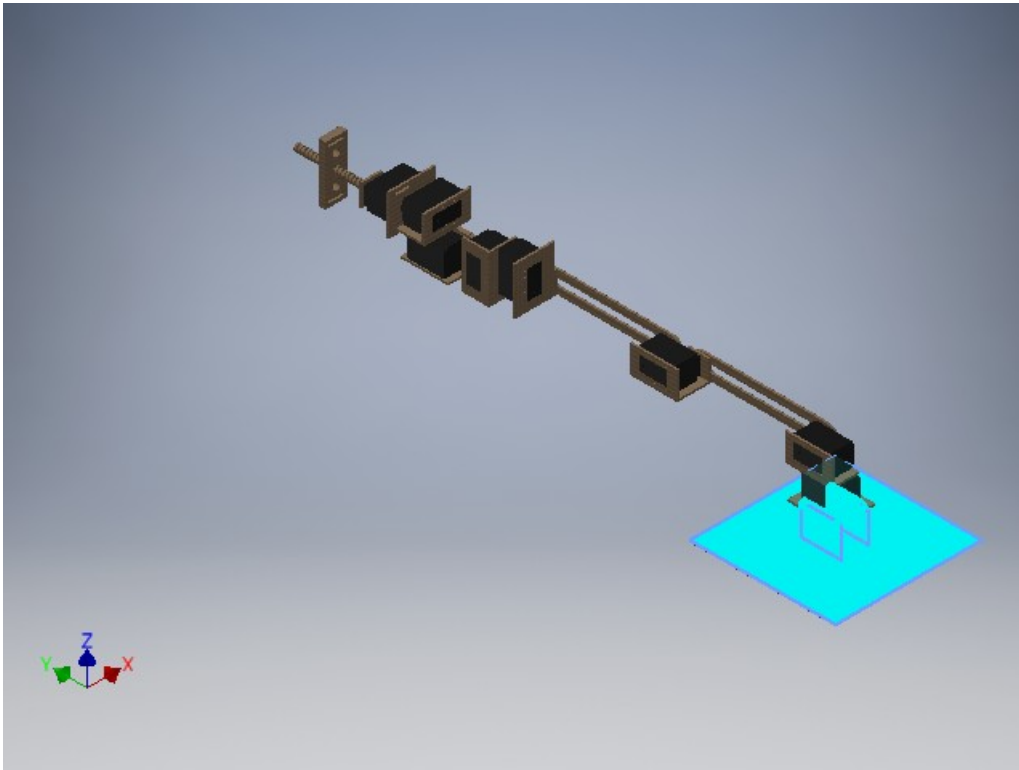
**Cara(s) seleccionada(s)**



**Restricción fija:1**

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

**Cara(s) seleccionada(s)**



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

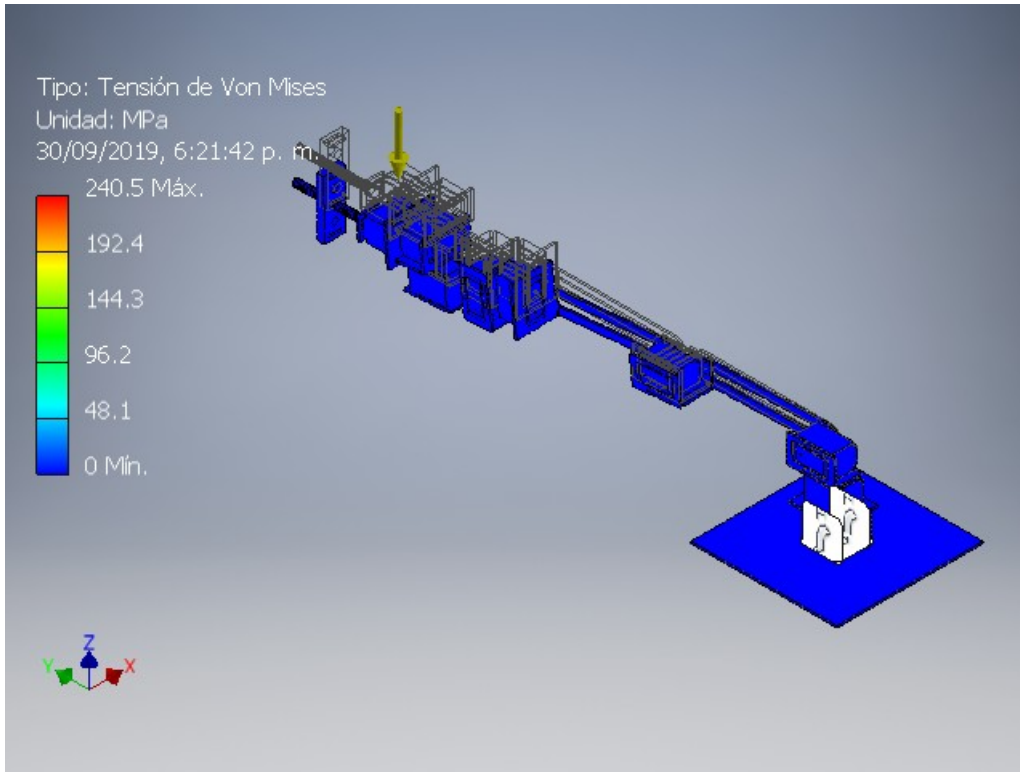
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	7.11076 N	0 N	1.57741 N m	1.57665 N m
		0 N		-0.0491004 N m
		7.11076 N		0 N m

### Resumen de resultados

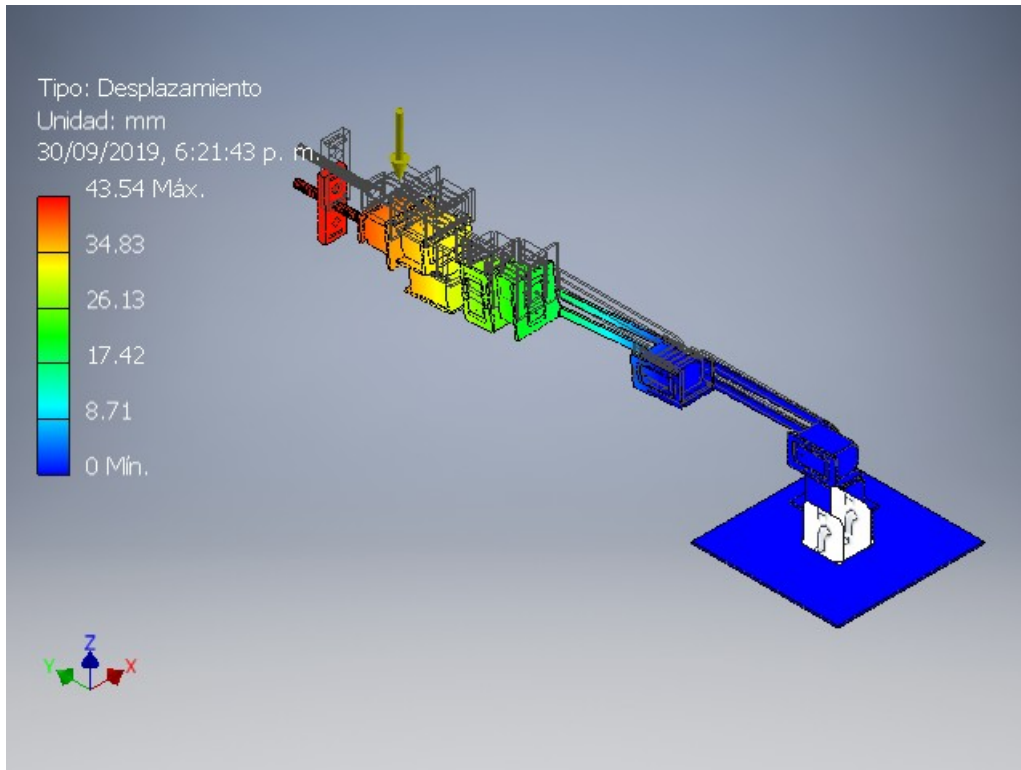
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	754248 mm <sup>3</sup>	
Masa	0.724514 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000000476044 MPa	240.497 MPa
Desplazamiento	0 mm	43.5428 mm
Coefficiente de seguridad	0.0321002 su	15 su
Deformación equivalente	0.00000000000171739 su	0.0903328 su
Presión de contacto	0 MPa	73.9087 MPa

## Figuras

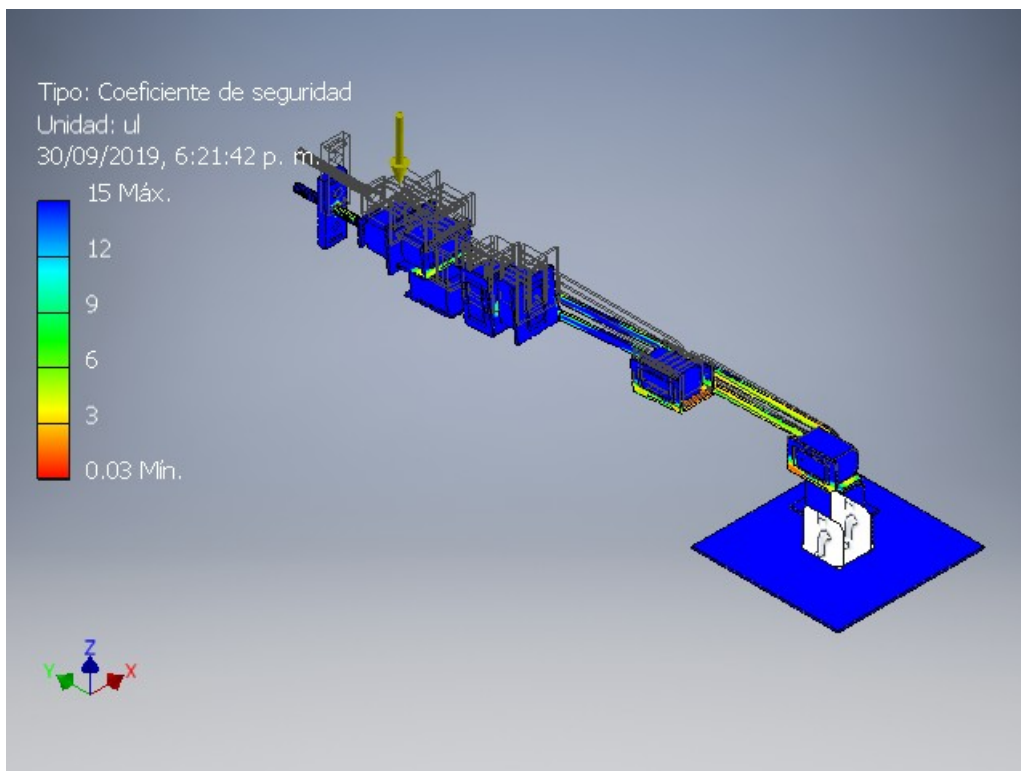
### Tensión de Von Mises



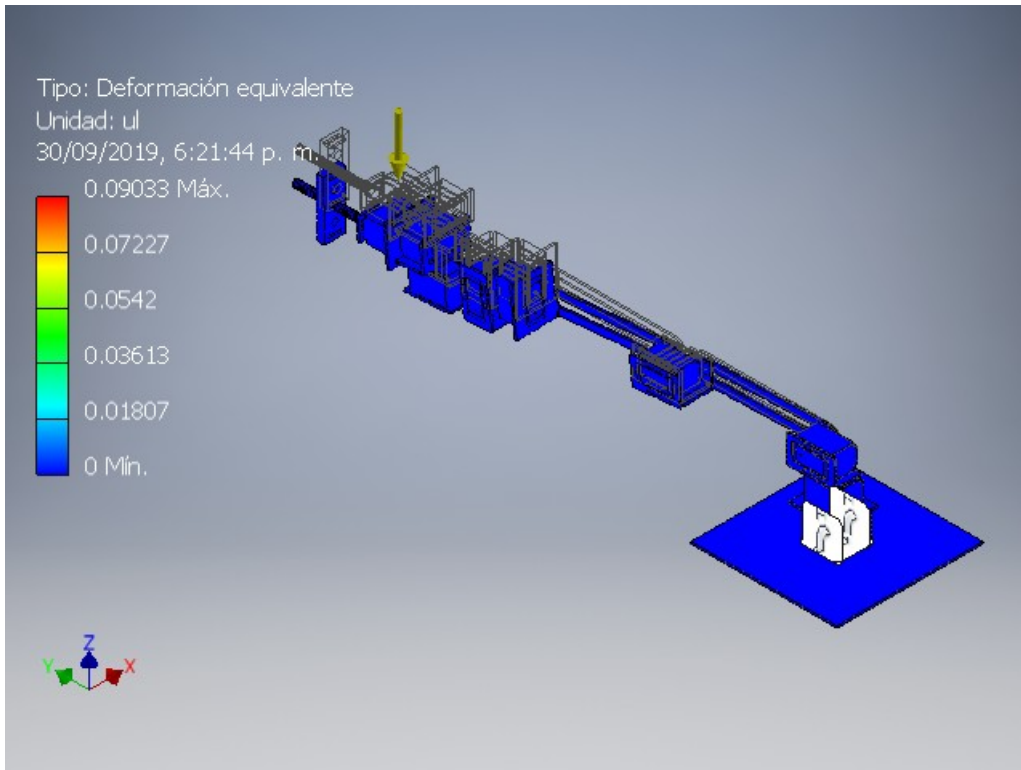
### Desplazamiento



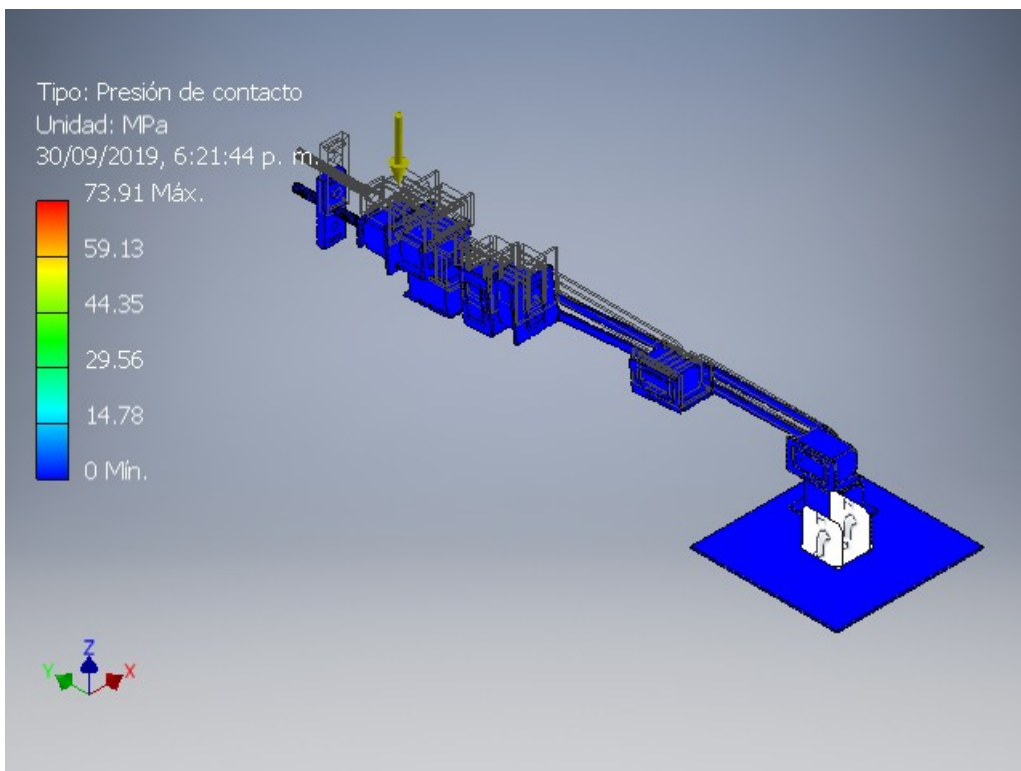
**Coefficiente de seguridad**



**Deformación equivalente**



### Presión de contacto



## Análisis estático:2

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	16/09/2019, 8:35 p. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

### Material(es)

Nombre	MDF Tablero de fibras de densidad media	
General	Densidad de masa	0.8 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	7.72 MPa
	Resistencia máxima a tracción	7.72 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.4 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.25 su
	Módulo cortante	0.96 GPa
Nombre(s) de pieza	Base Soportes_levantamiento Soportes_levantamiento Base_Servo1 Servo2_Base Servo2_Lateral Servo2_Lateral Servo3_Base Servo3_Lateral_derecho Brazos_De_Servo2_A_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Servo3_Lateral_derecho Servo4_Base Servo2_Base Servo2_Lateral Servo2_Base Servo2_Lateral	

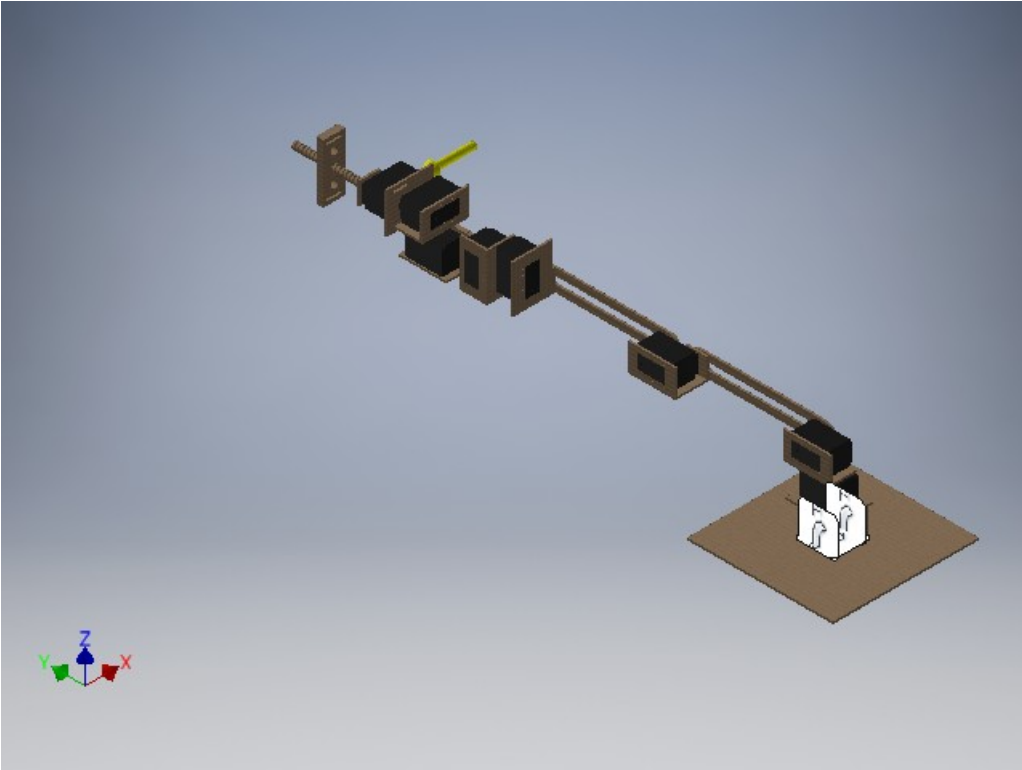
	Brazos_Servo5_A_6 Servo2_Base Servo2_Lateral Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Servo8_Base	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9809.988 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	-9809.988 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

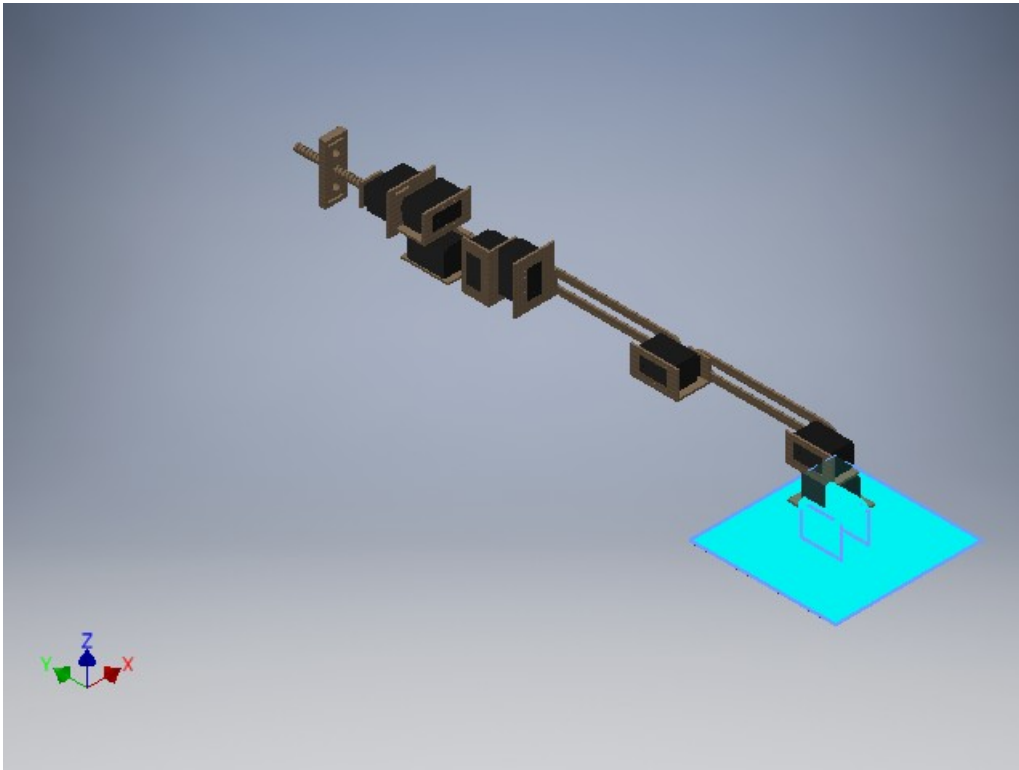
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

Cara(s) seleccionada(s)



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

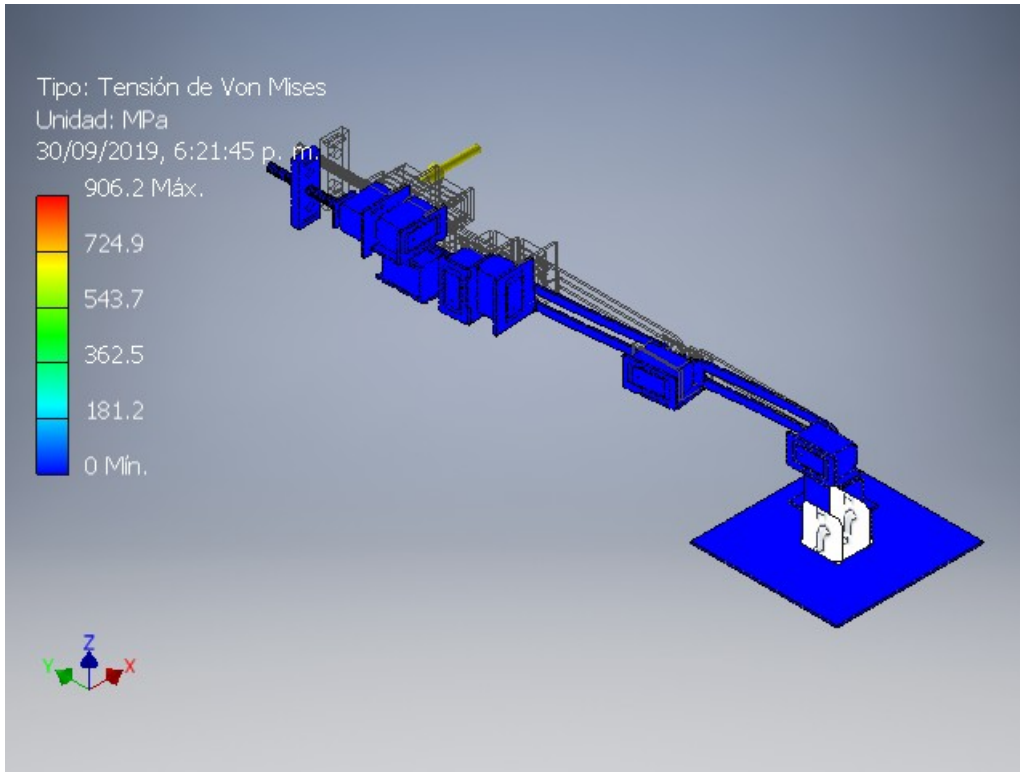
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	7.11076 N	7.11076 N	1.20854 N m	-0.011297 N m
		0 N		0.567357 N m
		0 N		-1.06703 N m

### Resumen de resultados

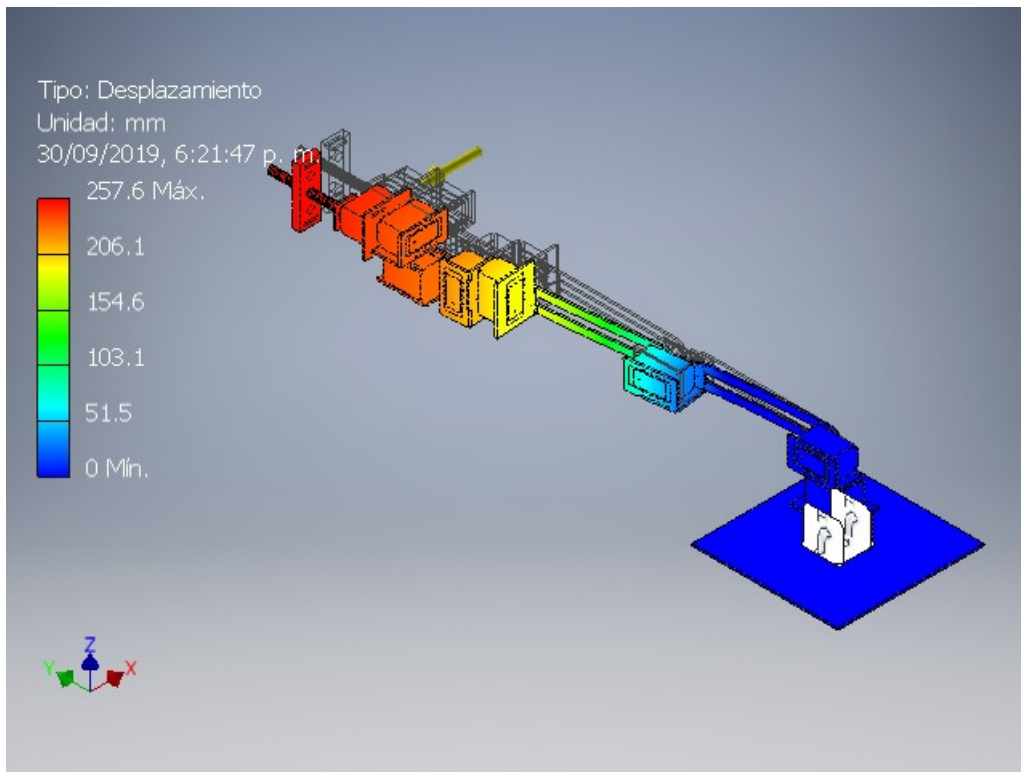
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	754248 mm <sup>3</sup>	
Masa	0.724514 kg	
Tensión de Von Mises	0.0000000369956 MPa	906.156 MPa
Desplazamiento	0 mm	257.646 mm
Coefficiente de seguridad	0.0085195 su	15 su
Deformación equivalente	0.0000000000130028 su	0.315531 su
Presión de contacto	0 MPa	110.086 MPa

## Figuras

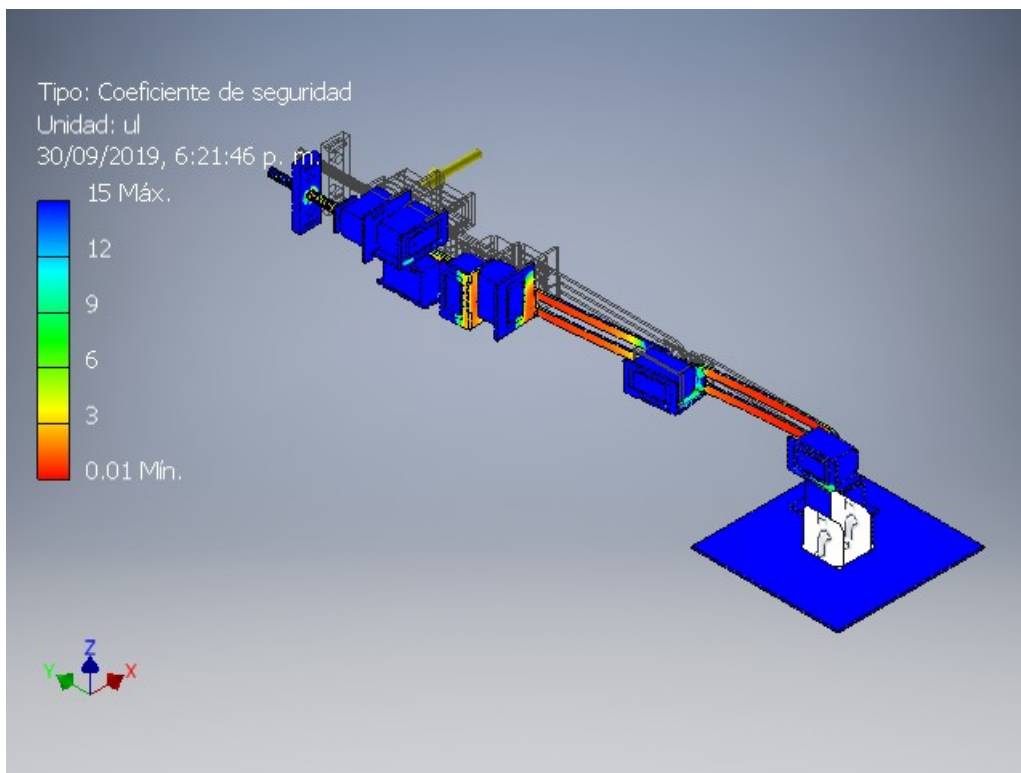
### Tensión de Von Mises



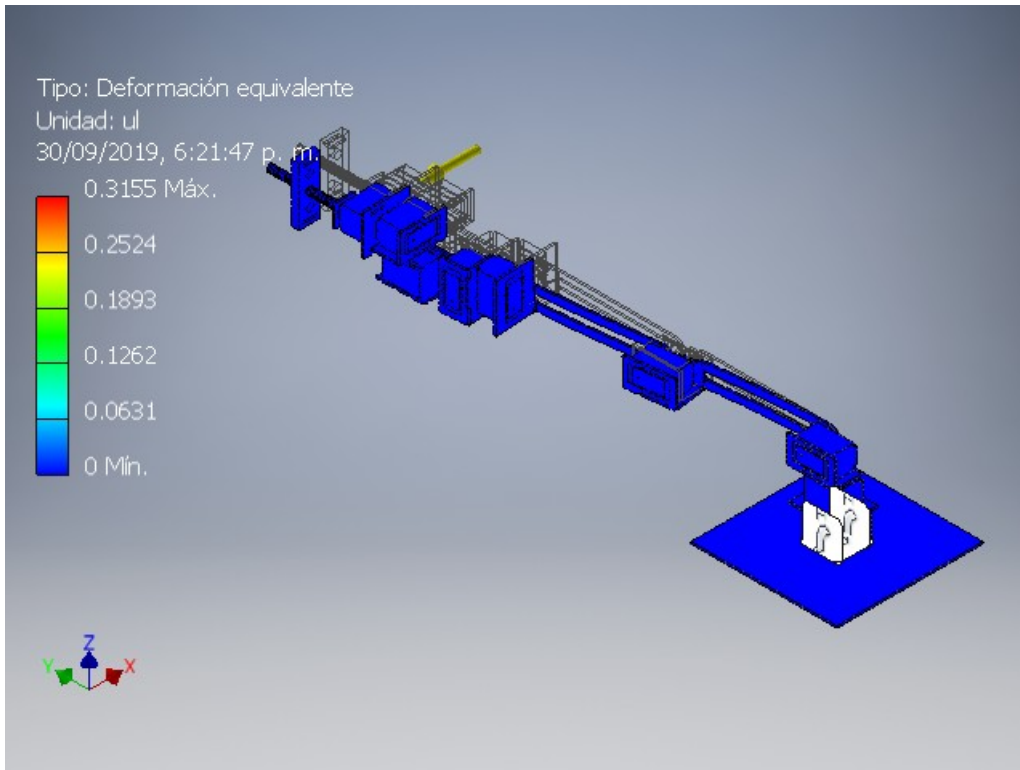
### Desplazamiento



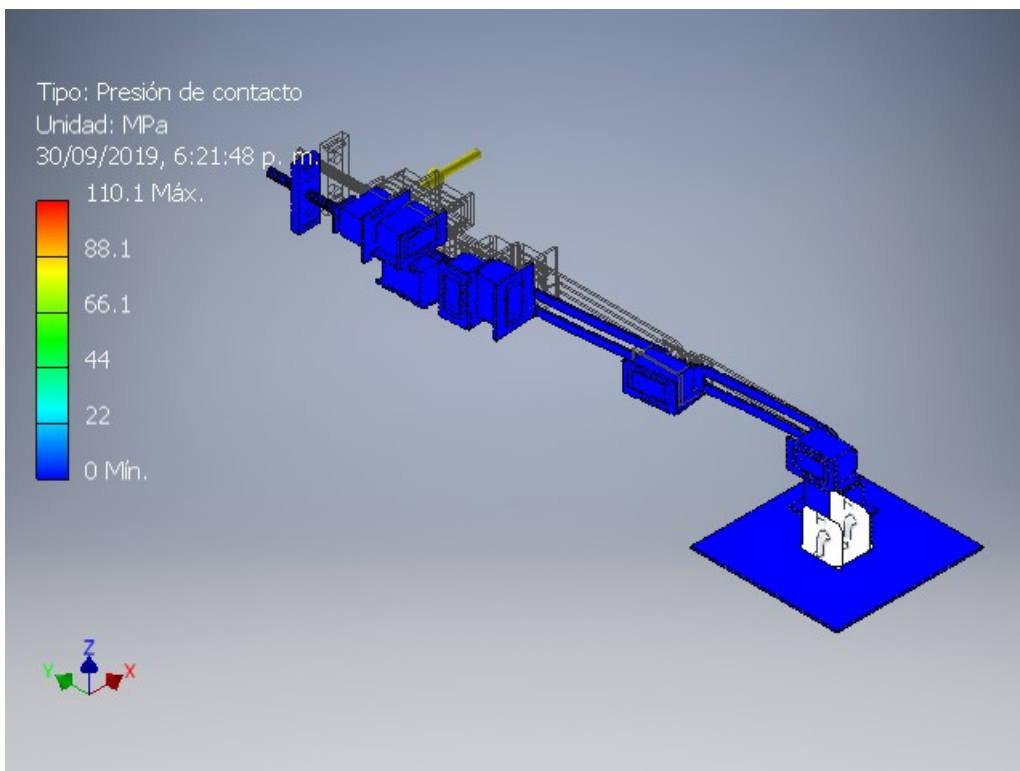
**Coefficiente de seguridad**



**Deformación equivalente**



### Presión de contacto



C:\Users\Didier\Desktop\Proyecto Humana - backup\Diseño\_Brazo\Prototipo1\_Analisis.iam

# Análisis de esfuerzos con gravedad en el lado superior y lateral del diseño del prototipo 2



## Información de proyecto (iProperties)

### Resumen

Autor	Didier
-------	--------

### Proyecto

Part Number	Prototipo2_Análisis
Designer	Didier

### Propiedades físicas

Masa	0.842973 kg
Área	411733 mm <sup>2</sup>
Volumen	902321 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=-11.3767 mm y=253.197 mm z=22.7384 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

## Análisis estático:2

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	16/09/2019, 8:05 p. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

**Configuración de malla:**

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

**Material(es)**

Nombre	MDF Tablero de fibras de densidad media	
General	Densidad de masa	0.8 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	7.72 MPa
	Resistencia máxima a tracción	7.72 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.4 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.25 su
	Módulo cortante	0.96 GPa
Nombre(s) de pieza	Base Soportes_levantamiento Soportes_levantamiento Base_Servo1 Servo2_Base Servo2_Lateral Servo2_3_soporteAuxiliar Servo2_3_soporteAuxiliar Servo2_3_Auxiliar Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 ApoyoTornillo Servo2_Lateral Servo3_Base Servo3_Lateral_derecho Servo4_5_soporteAuxiliar Servo4_5_soporteAuxiliar Servo3_4_Auxiliar ApoyoTornillo Servo3_4_Auxiliar2 Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Servo3_Lateral_derecho Servo4_Base Servo5_Lateral_Izquierdo ApoyoTornillo ApoyoTornillo Servo2_Base Servo2_Lateral	

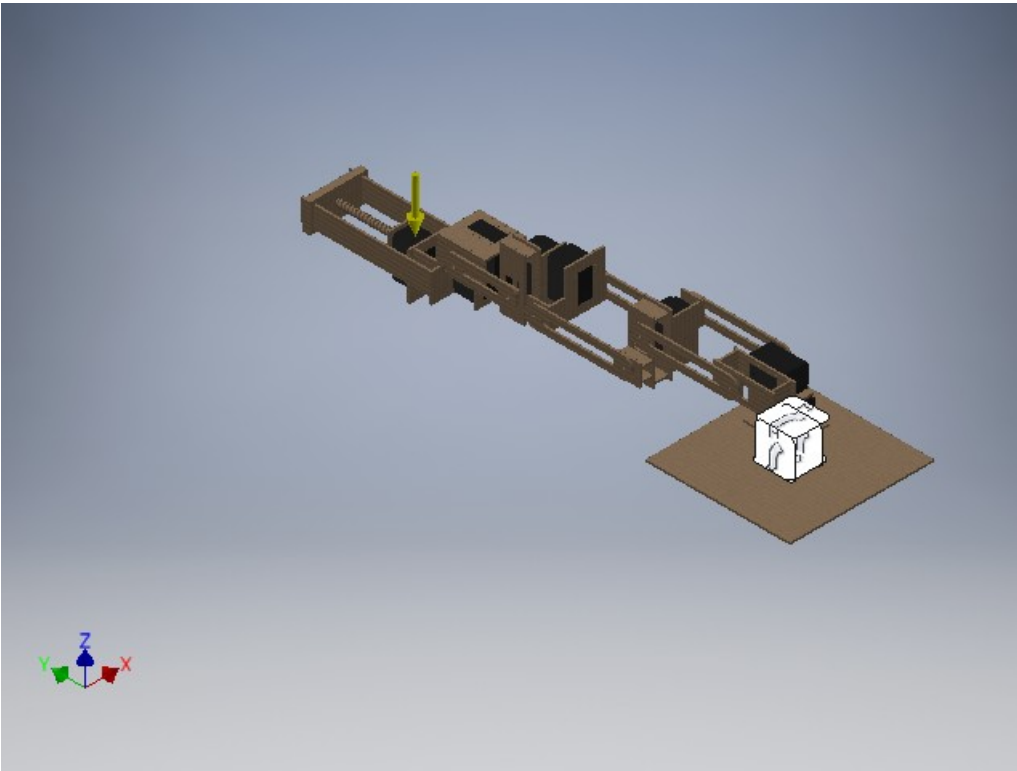
	Brazo_Servo_Soporte_5_6_ Brazos_Servo5_A_6 Servo2_3_Auxiliar Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Servo2_Base Servo6_Base Servo6_Lateral2 ApoyoTornillo ApoyoTornillo Servo2_Base Servo7_Lateral Servo8_Base Servo8_Tornillo SoporteServo8 SoporteServo8 Servo8_preBase Soporte_Sin_Fin Soporte_Sin_Fin Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin Servo8_Pieza_Linear	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>

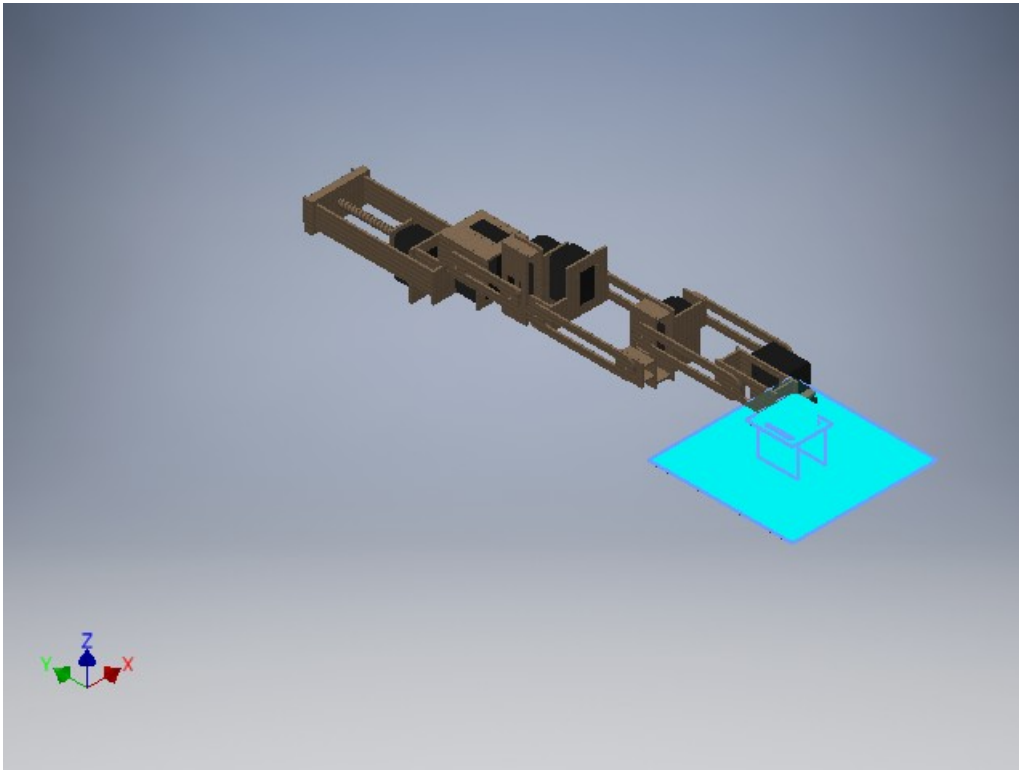
**Cara(s) seleccionada(s)**



**Restricción fija:1**

Tipo de restricción	Restricción fija

**Cara(s) seleccionada(s)**



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

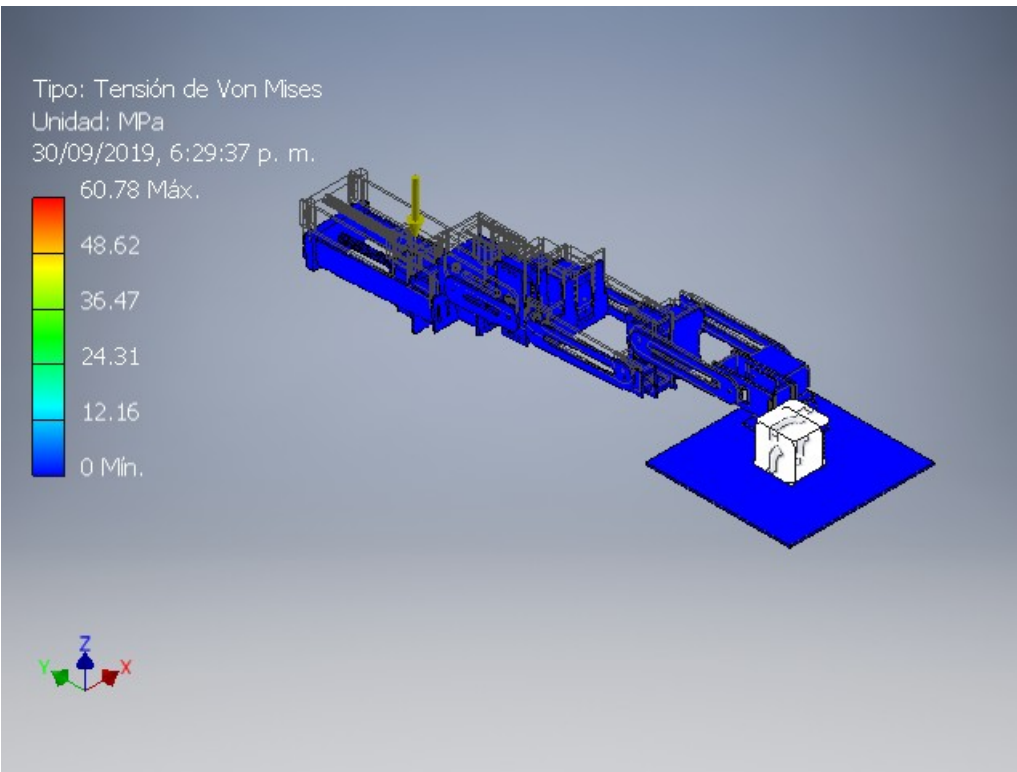
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	8.27188 N	0 N	1.61155 N m	1.60949 N m
		0 N		0.0800775 N m
		8.27188 N		0.015308 N m

### Resumen de resultados

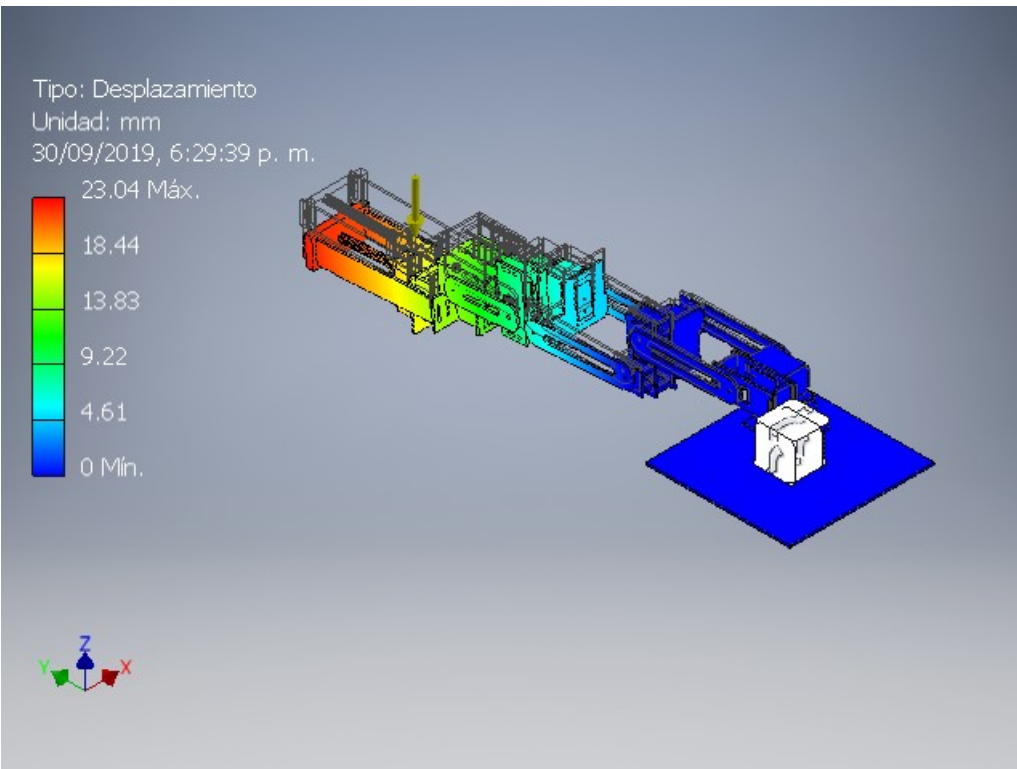
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	902318 mm <sup>3</sup>	
Masa	0.84297 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000000225353 MPa	60.7768 MPa
Desplazamiento	0 mm	23.0446 mm
Coefficiente de seguridad	0.127022 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000000782485 su	0.0211062 su
Presión de contacto	0 MPa	18.5325 MPa

## Figuras

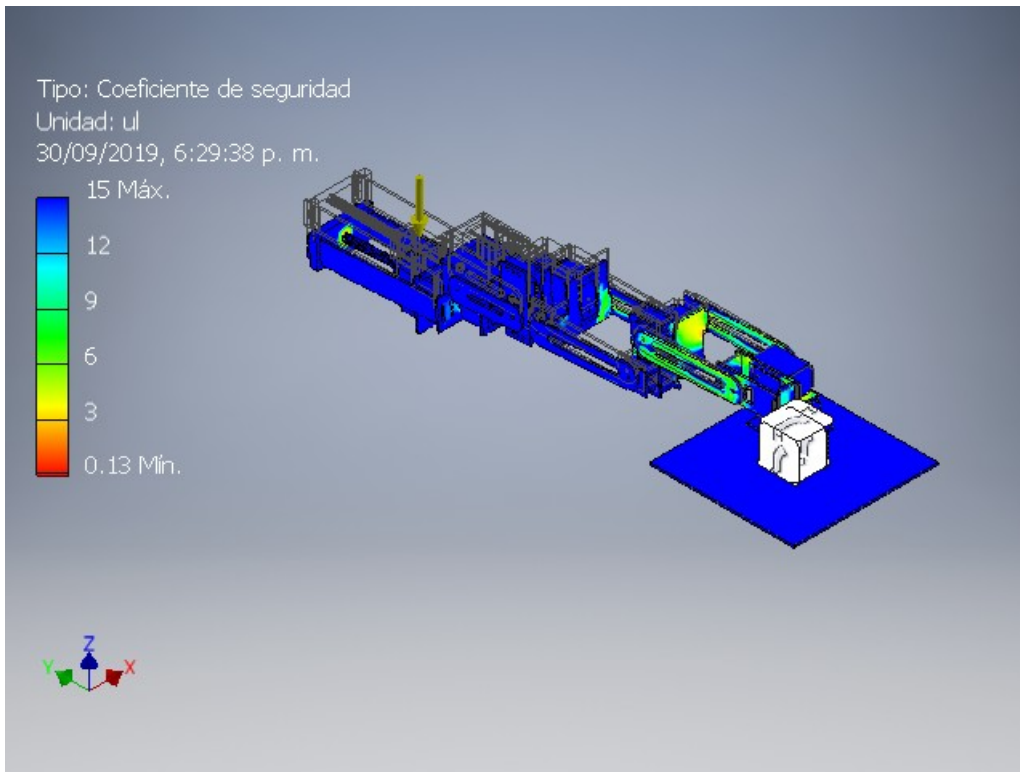
### Tensión de Von Mises



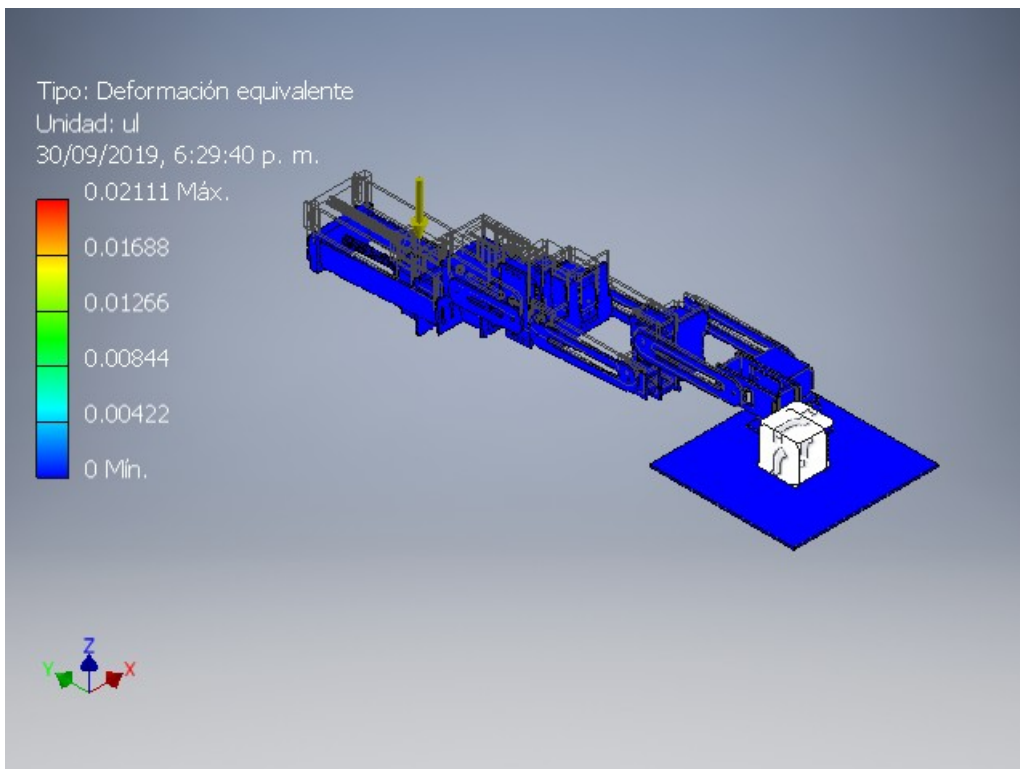
### Desplazamiento



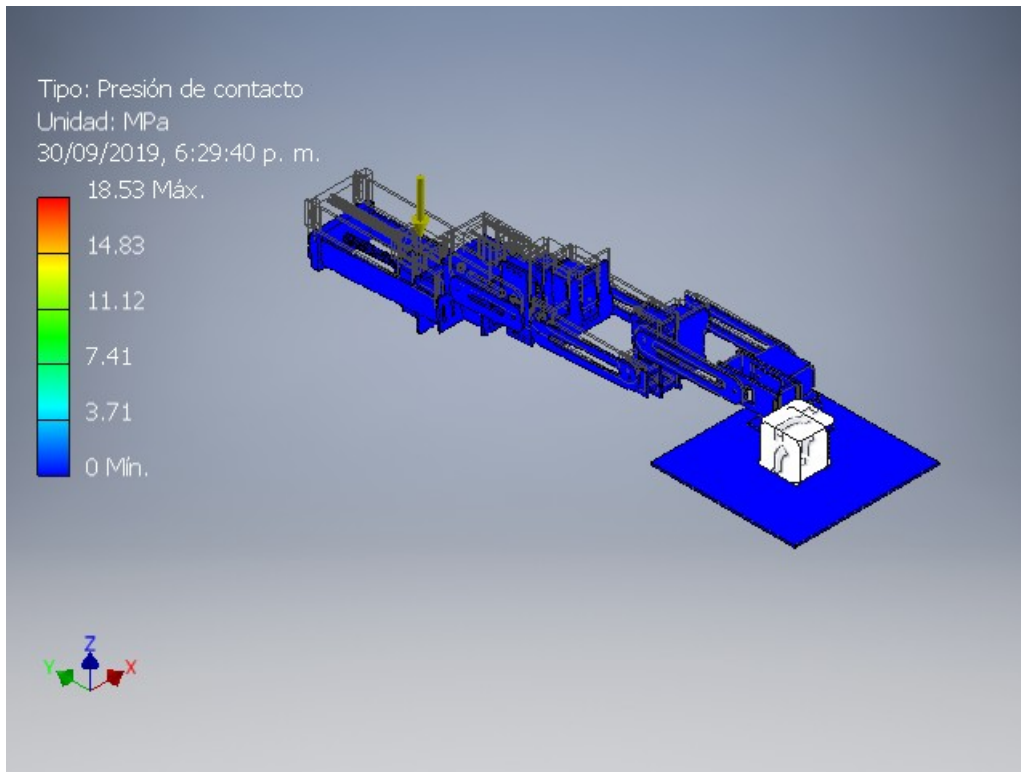
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



## Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	16/09/2019, 8:36 p. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## Material(es)

Nombre	MDF Tablero de fibras de densidad media	
General	Densidad de masa	0.8 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	7.72 MPa
	Resistencia máxima a tracción	7.72 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.4 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.25 su
	Módulo cortante	0.96 GPa
Nombre(s) de pieza	Base Soportes_levantamiento Soportes_levantamiento Base_Servo1 Servo2_Base Servo2_Lateral Servo2_3_soporteAuxiliar Servo2_3_soporteAuxiliar Servo2_3_Auxiliar Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 ApoyoTornillo Servo2_Lateral Servo3_Base Servo3_Lateral_derecho Servo4_5_soporteAuxiliar Servo4_5_soporteAuxiliar Servo3_4_Auxiliar ApoyoTornillo Servo3_4_Auxiliar2 Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Servo3_Lateral_derecho Servo4_Base Servo5_Lateral_Izquierdo ApoyoTornillo ApoyoTornillo Servo2_Base Servo2_Lateral Brazo_Servo_Soporte_5_6_ Brazos_Servo5_A_6 Servo2_3_Auxiliar Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Servo3_4_SoporteAuxiliar2 Servo2_Base Servo6_Base Servo6_Lateral2 ApoyoTornillo ApoyoTornillo Servo2_Base Servo7_Lateral Servo8_Base Servo8_Tornillo	

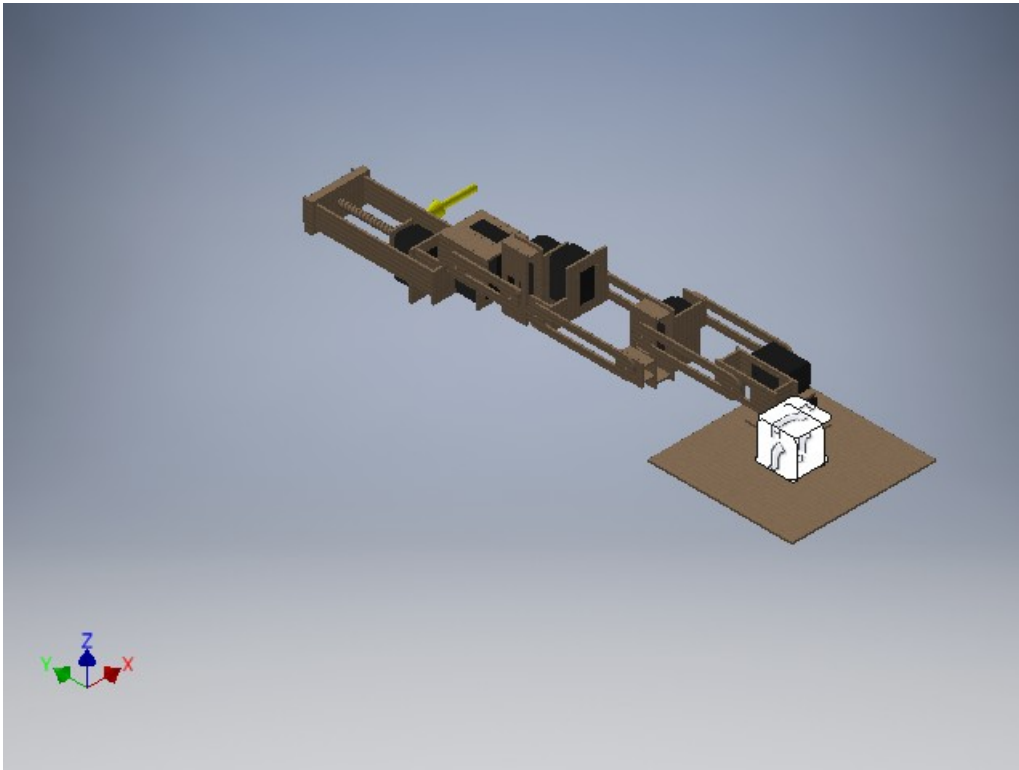
	SoporteServo8 SoporteServo8 Servo8_preBase Soporte_Sin_Fin Soporte_Sin_Fin Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin Servo8_Pieza_Linear	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

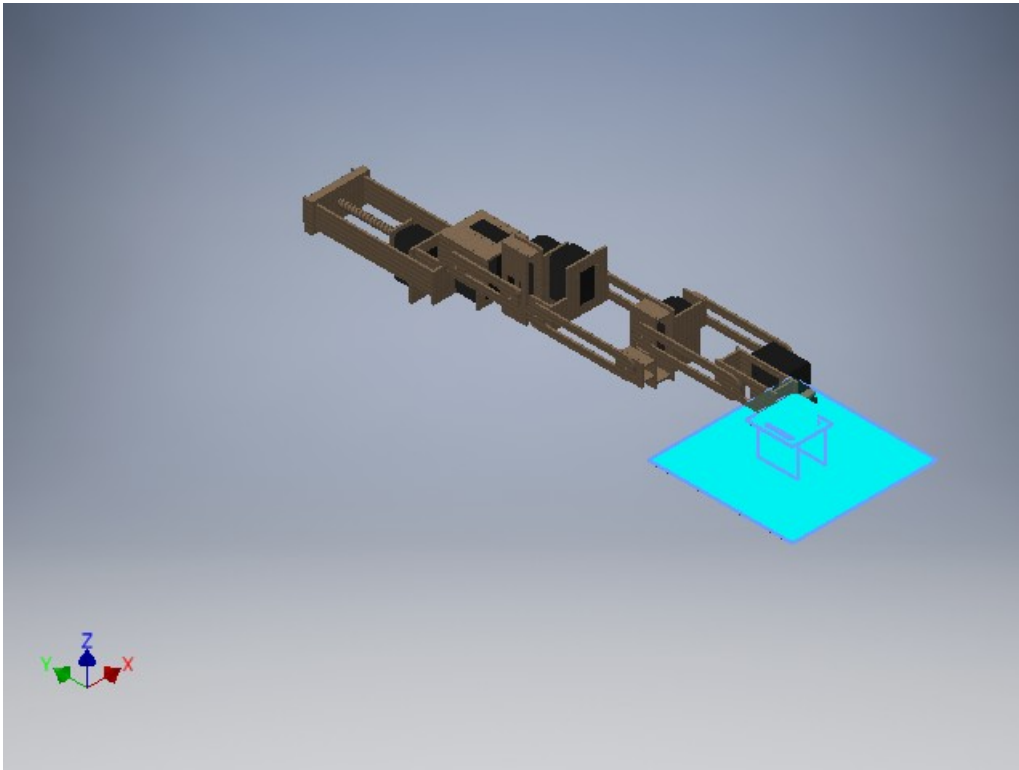
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

Cara(s) seleccionada(s)



## Resultados

### Fuerza y pares de reacción en restricciones

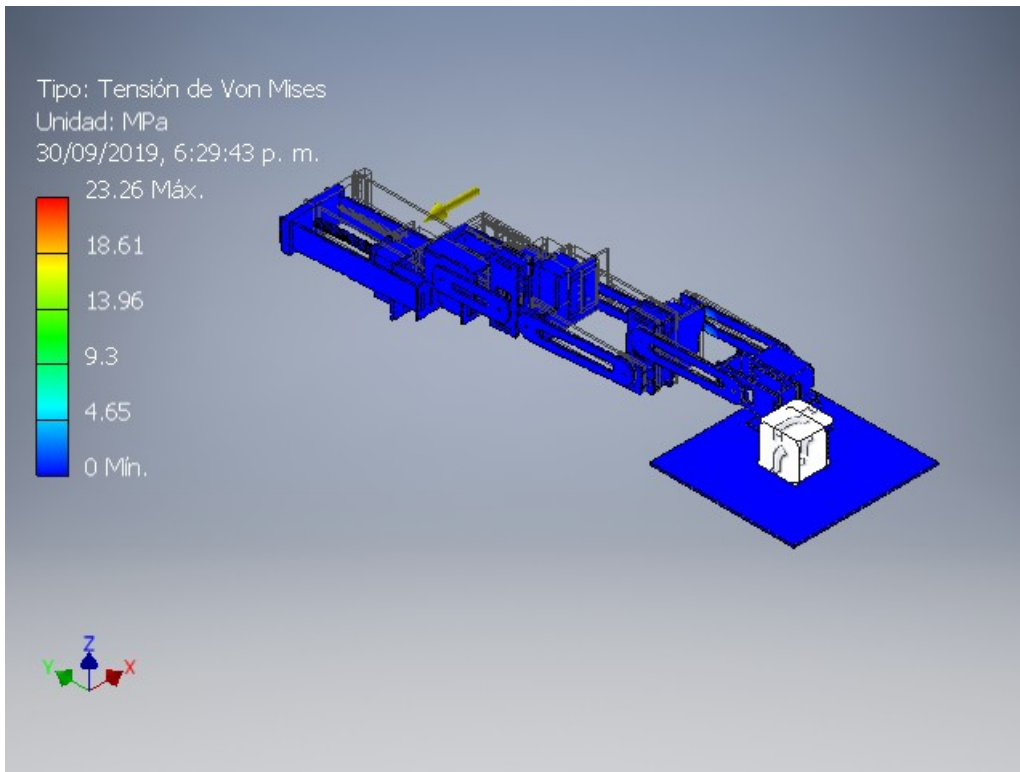
Nombre de la restricción	Fuerza de reacción		Pares de reacción	
	Magnitud	Componente (X, Y, Z)	Magnitud	Componente (X, Y, Z)
Restricción fija:1	8.27188 N	8.27188 N	1.77715 N m	-0.00842431 N m
		0 N		0.484494 N m
		0 N		-1.70981 N m

### Resumen de resultados

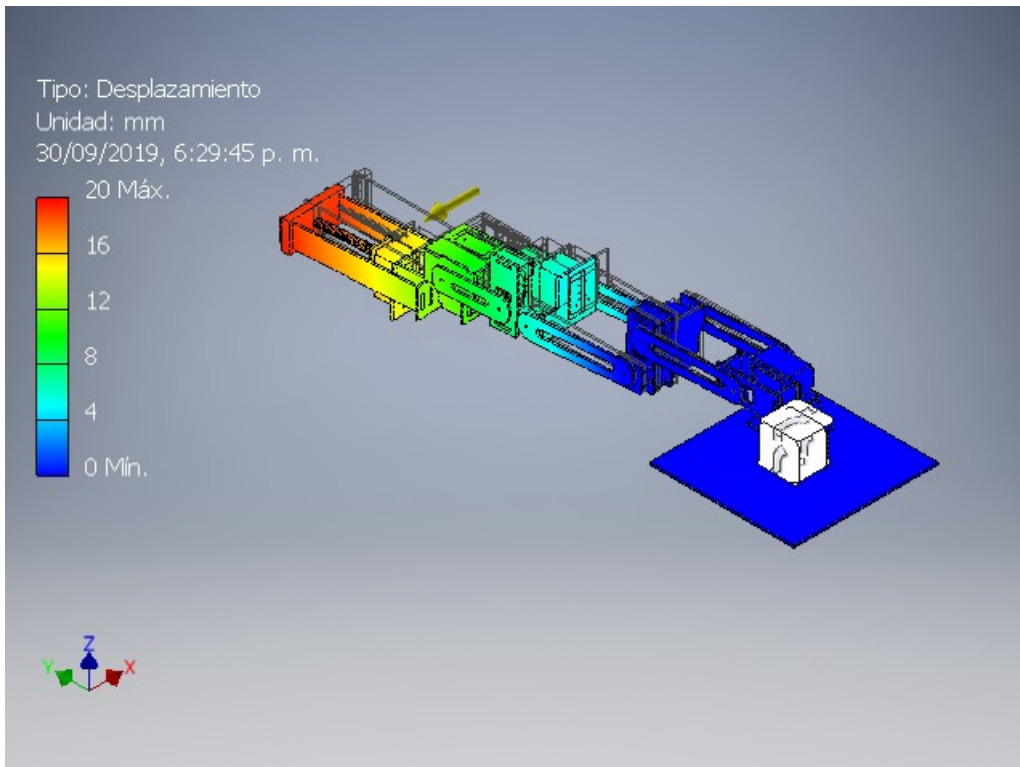
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	902318 mm <sup>3</sup>	
Masa	0.84297 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000000767318 MPa	23.2603 MPa
Desplazamiento	0 mm	19.9964 mm
Coefficiente de seguridad	0.331896 su	15 su
Deformación equivalente	0.00000000000273347 su	0.00897964 su
Presión de contacto	0 MPa	12.2918 MPa

## Figuras

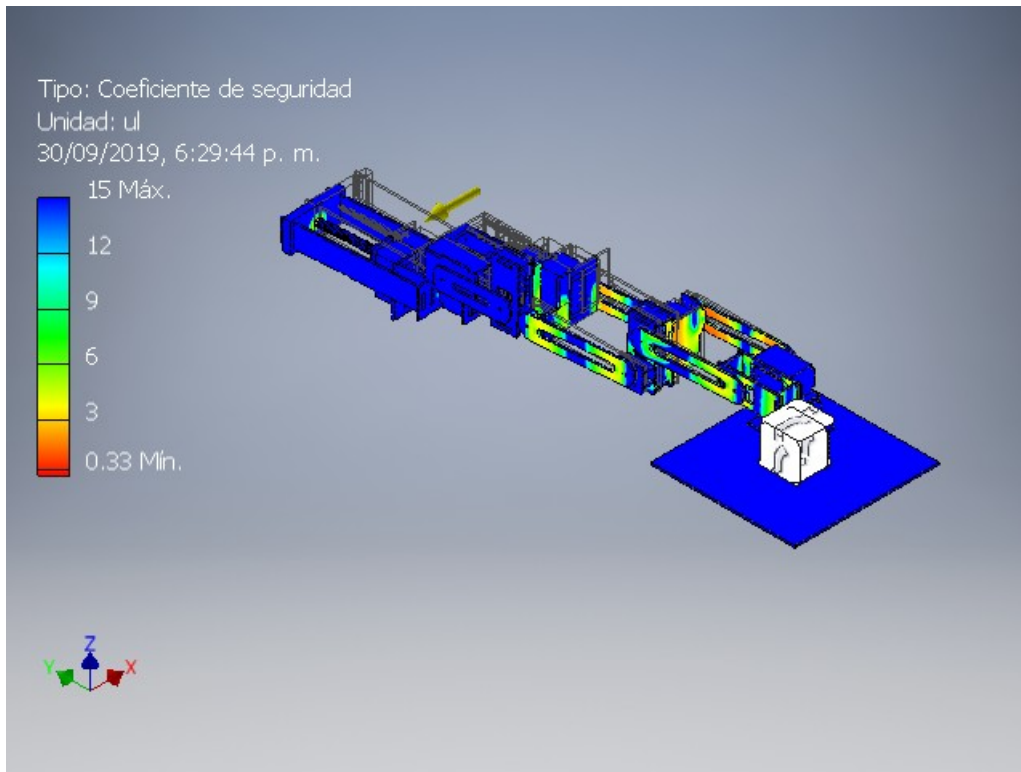
### Tensión de Von Mises



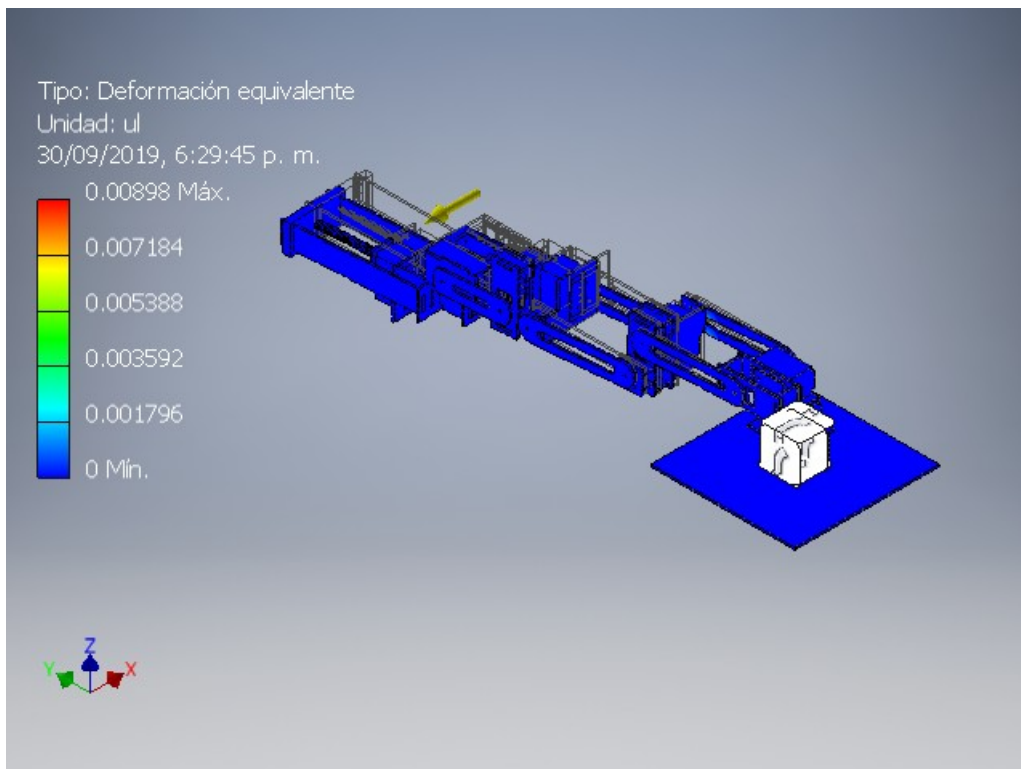
### Desplazamiento



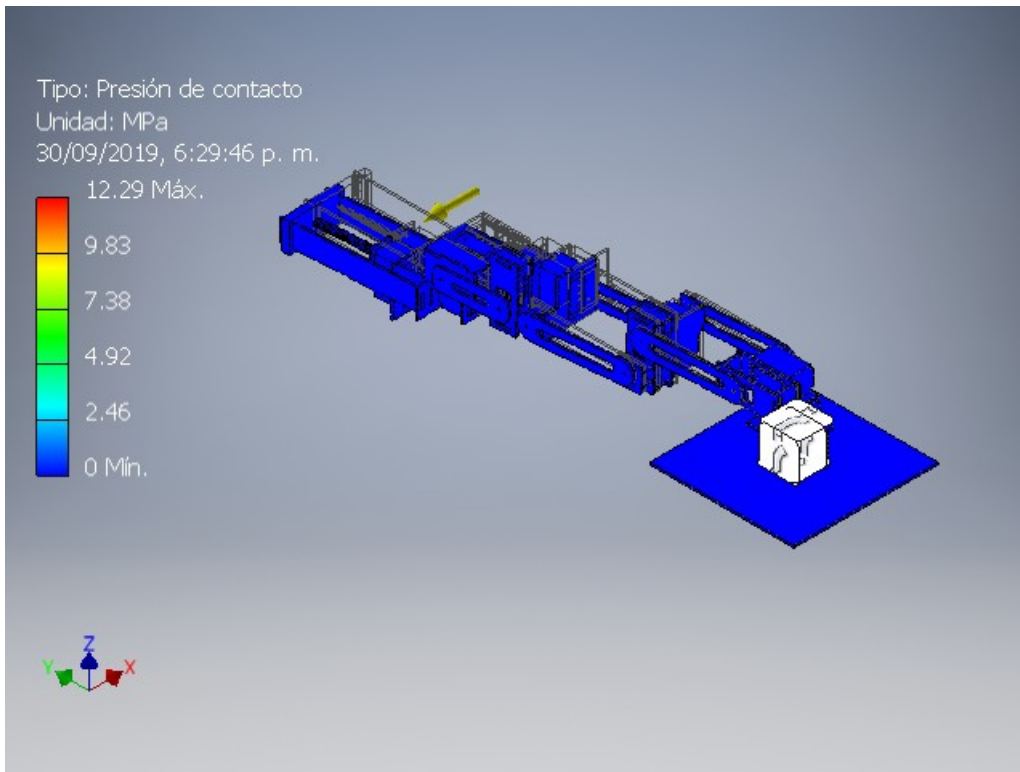
### Coeficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



C:\Users\Didier\Desktop\Proyecto Humana\Diseño\_Brazo\Prototipo2\_Analisis.iam

# Análisis de esfuerzos con gravedad en el lado superior y lateral del diseño del prototipo 3



Archivo analizado:	Prototipo3_Analisis.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Fecha de creación:	25/11/2019, 11:06 p. m.
Autor del estudio:	Didier Salazar

## Información de proyecto (iProperties)

### Proyecto

Part Number	Prototipo3_Analisis
Designer	Didier

### Propiedades físicas

Masa	1.1471 kg
Área	275984 mm <sup>2</sup>
Volumen	943316 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=62.5583 mm y=187.371 mm z=212.966 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

## Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	24/11/2019, 10:45 p. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

**Configuración de malla:**

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

**Material(es)**

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA	
General	Densidad de masa	1.24 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	49.5 MPa
	Resistencia máxima a tracción	45.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.3465 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.4 su
	Módulo cortante	0.838036 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	

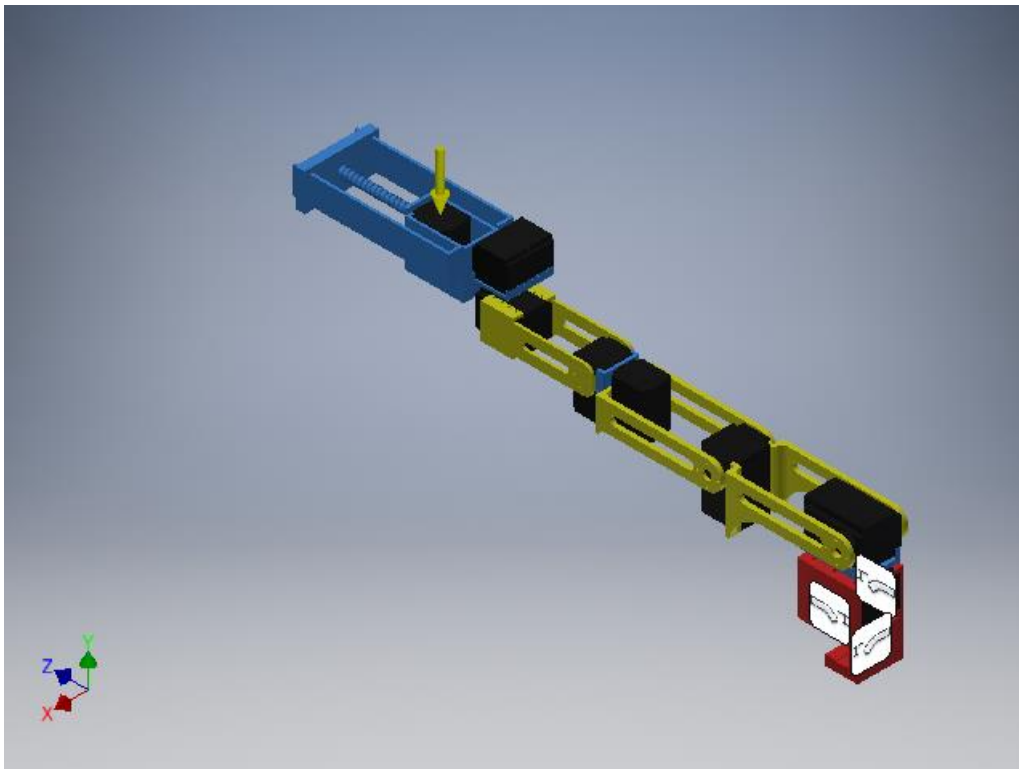
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

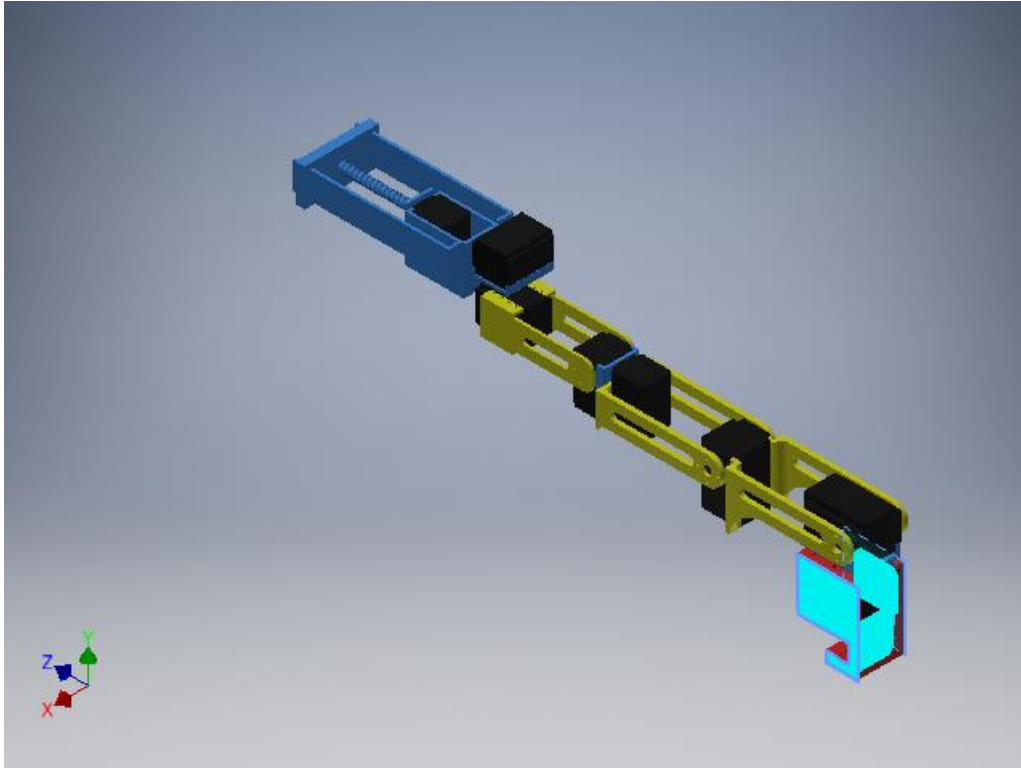
### Cara(s) seleccionada(s)



## Restricción fija:1

Tipo de restricción Restricción fija

### Cara(s) seleccionada(s)



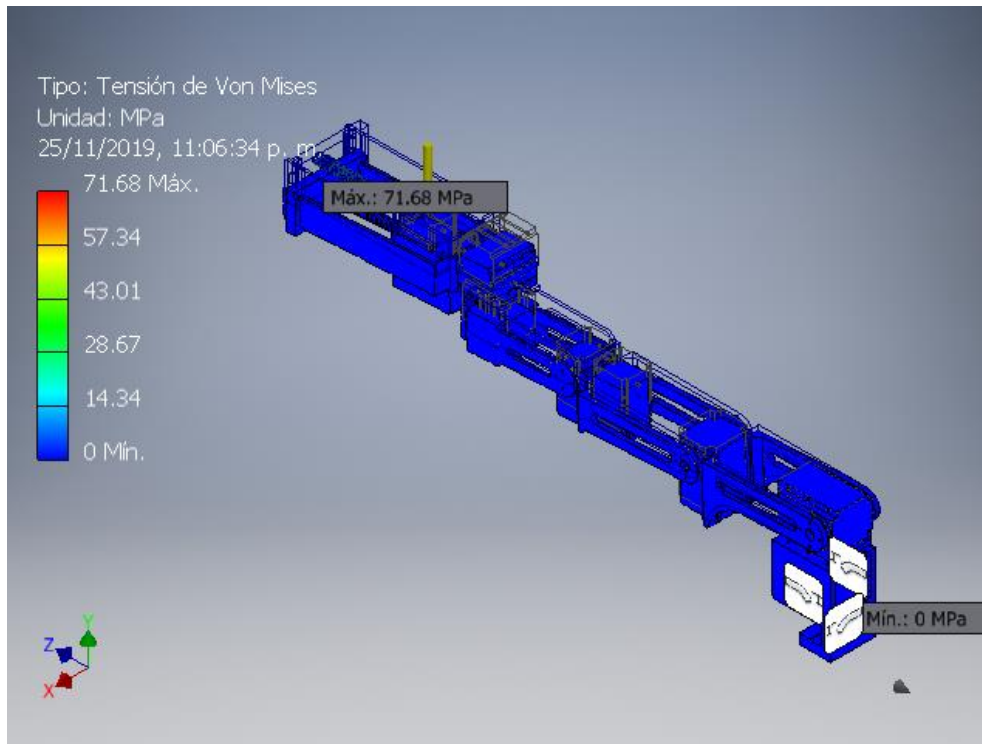
## Resultados

### Resumen de resultados

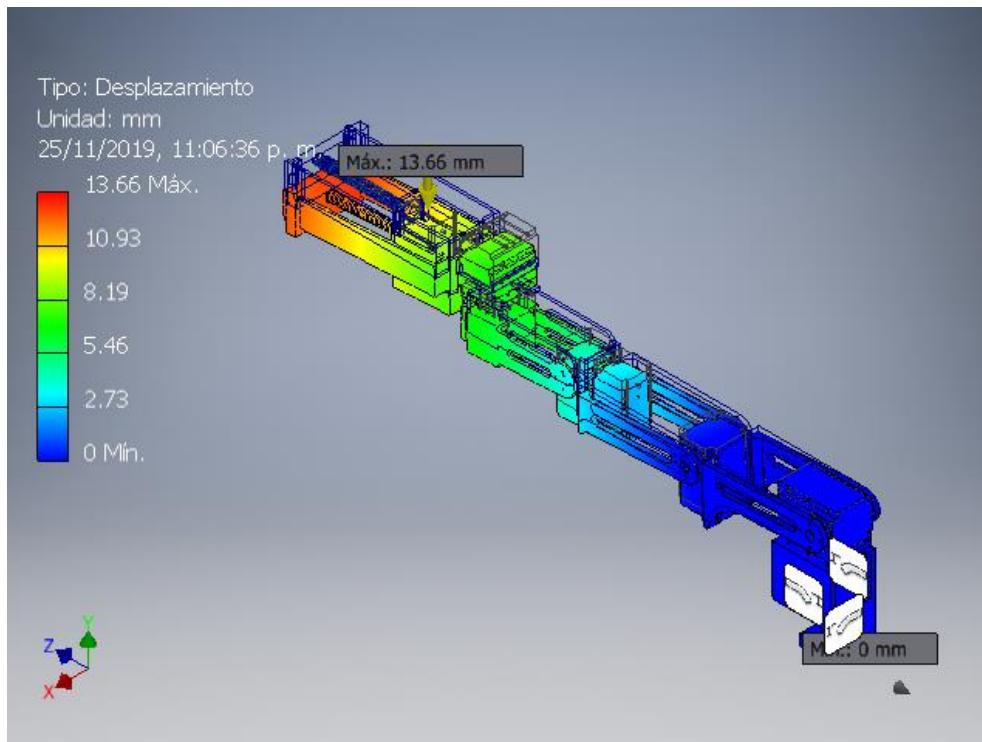
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	943314 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1439 kg	
Tensión de Von Mises	0.0000249074 MPa	71.6753 MPa
Desplazamiento	0 mm	13.6576 mm
Coefficiente de seguridad	0.690614 su	15 su
Deformación equivalente	0.0000000101861 su	0.028901 su
Presión de contacto	0 MPa	129.409 MPa

## Figuras

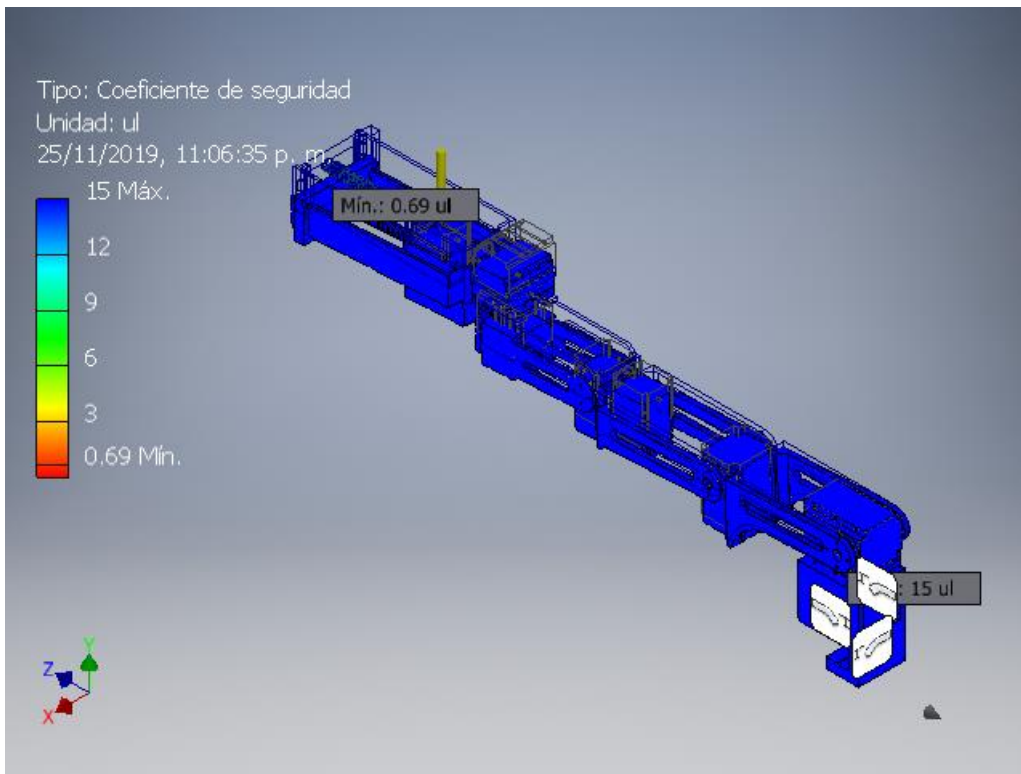
### Tensión de Von Mises



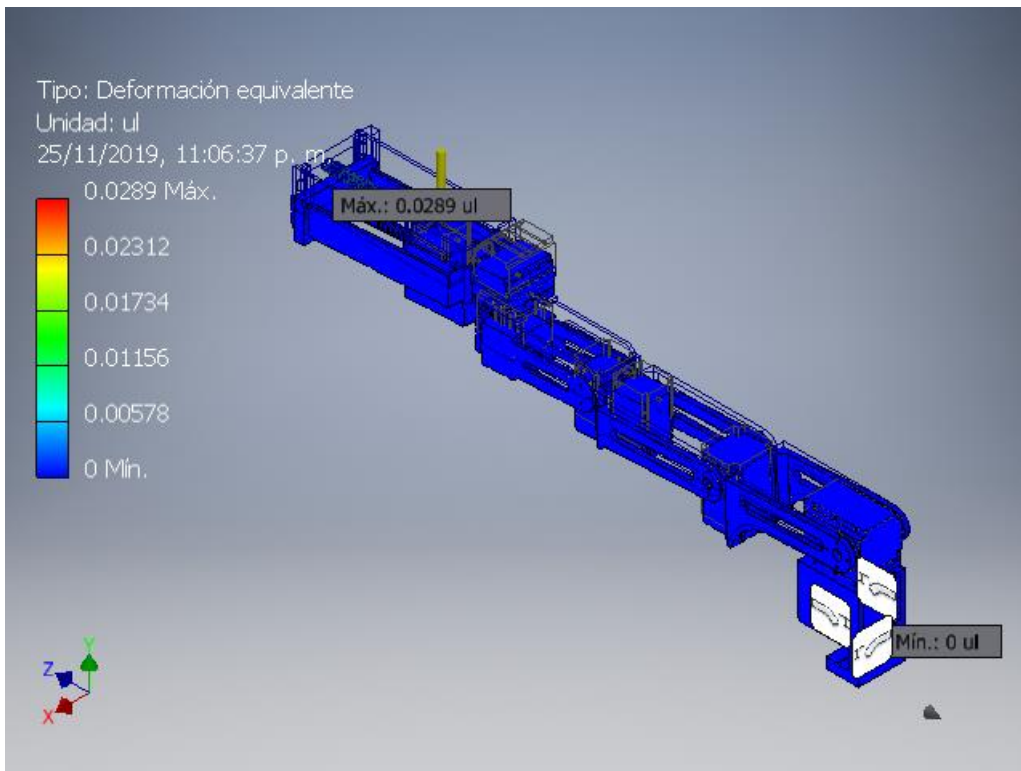
### Desplazamiento



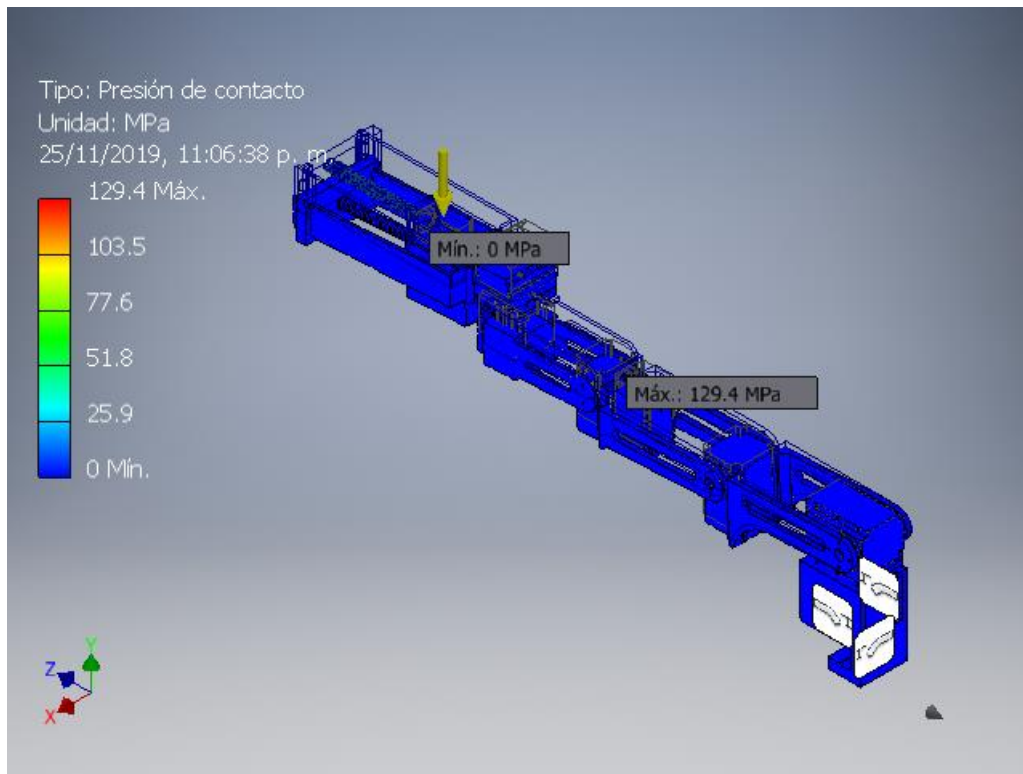
## Coefficiente de seguridad



## Deformación equivalente



## Presión de contacto



## Análisis estático:2

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	24/11/2019, 11:02 p. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## Material(es)

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA	
General	Densidad de masa	1.24 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	49.5 MPa
	Resistencia máxima a tracción	45.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.3465 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.4 su
	Módulo cortante	0.838036 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

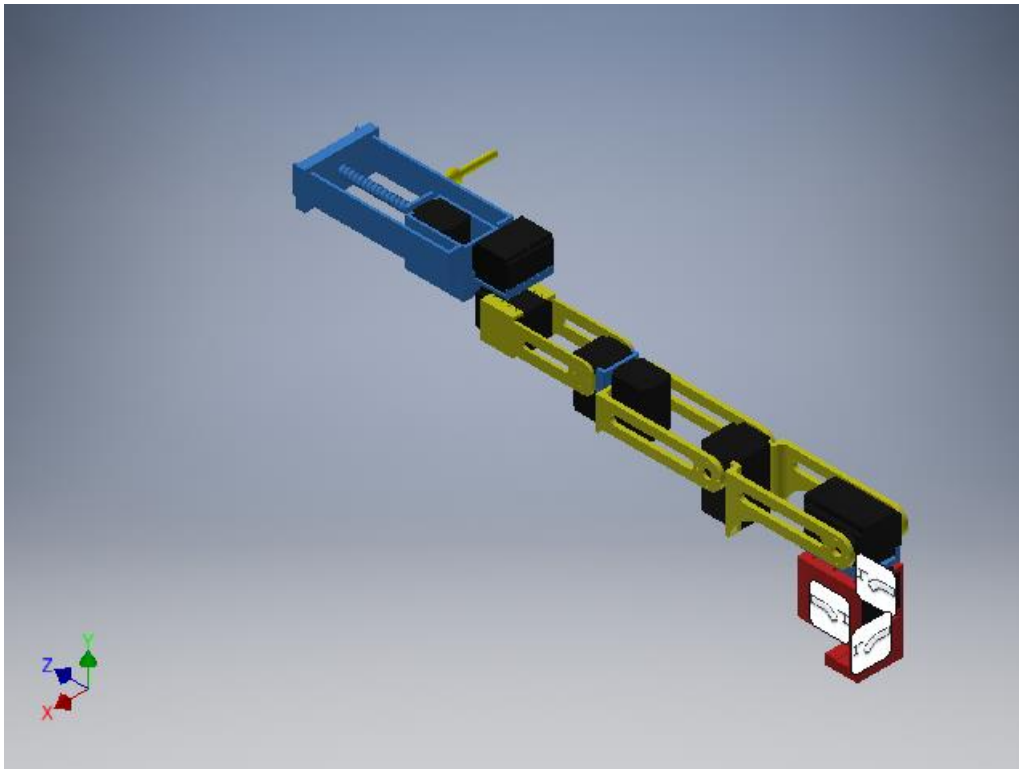
	AX12AServo AX12AServo
--	--------------------------

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

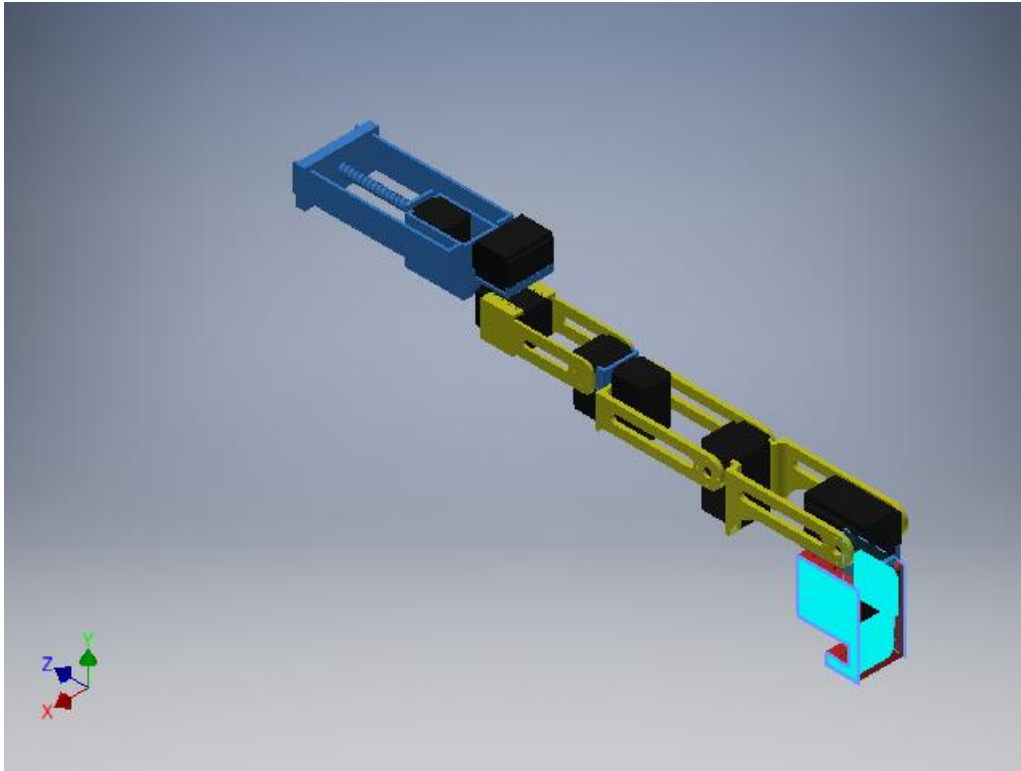
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

### Cara(s) seleccionada(s)



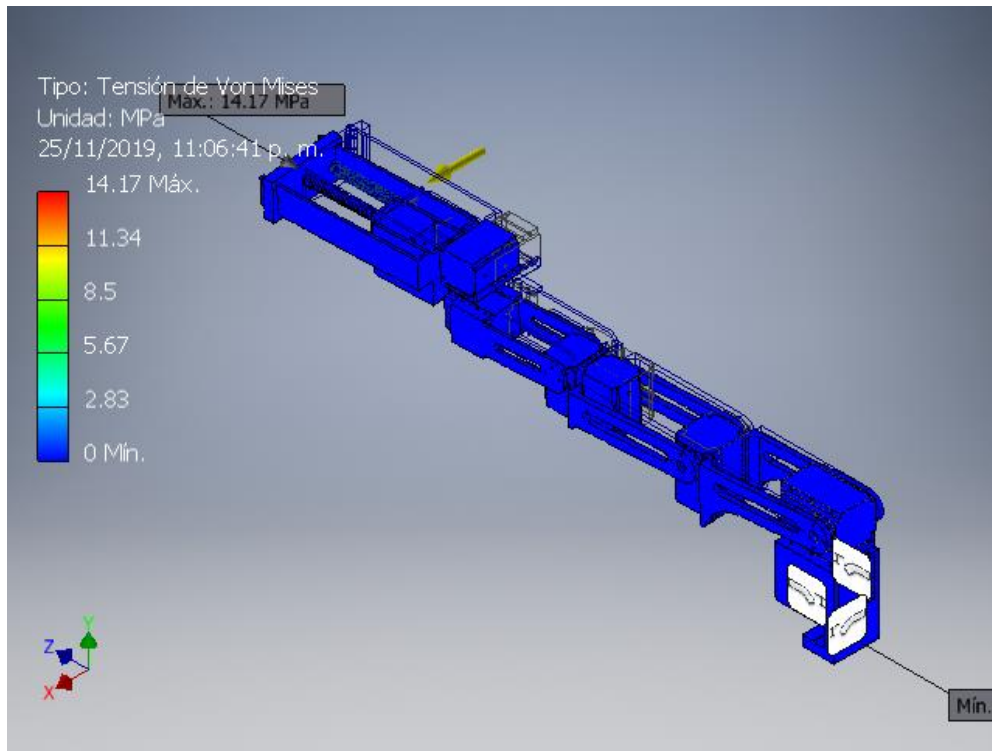
## Resultados

### Resumen de resultados

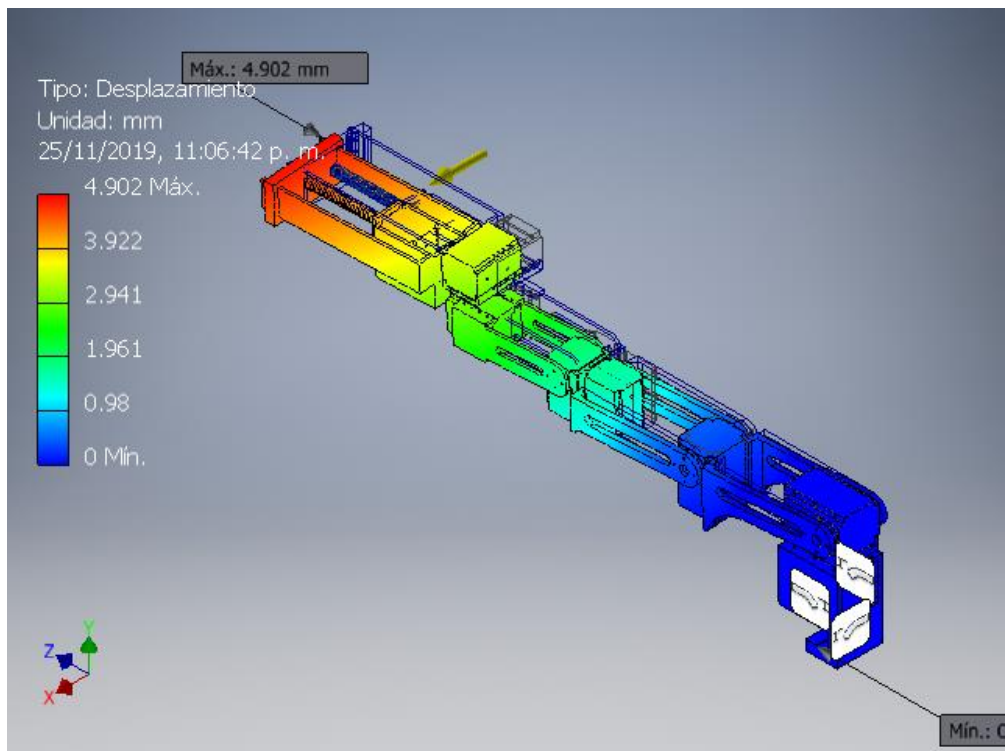
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	943314 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1439 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000131175 MPa	14.1731 MPa
Desplazamiento	0 mm	4.90188 mm
Coefficiente de seguridad	3.49252 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000530118 su	0.00845126 su
Presión de contacto	0 MPa	36.1064 MPa

## Figuras

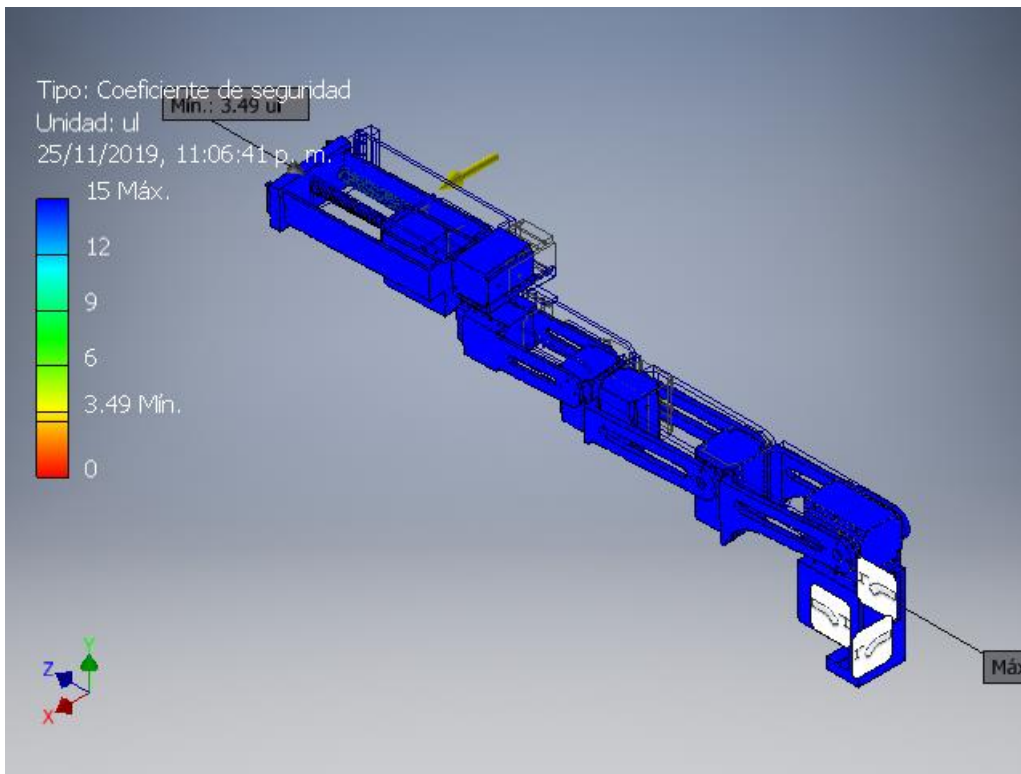
### Tensión de Von Mises



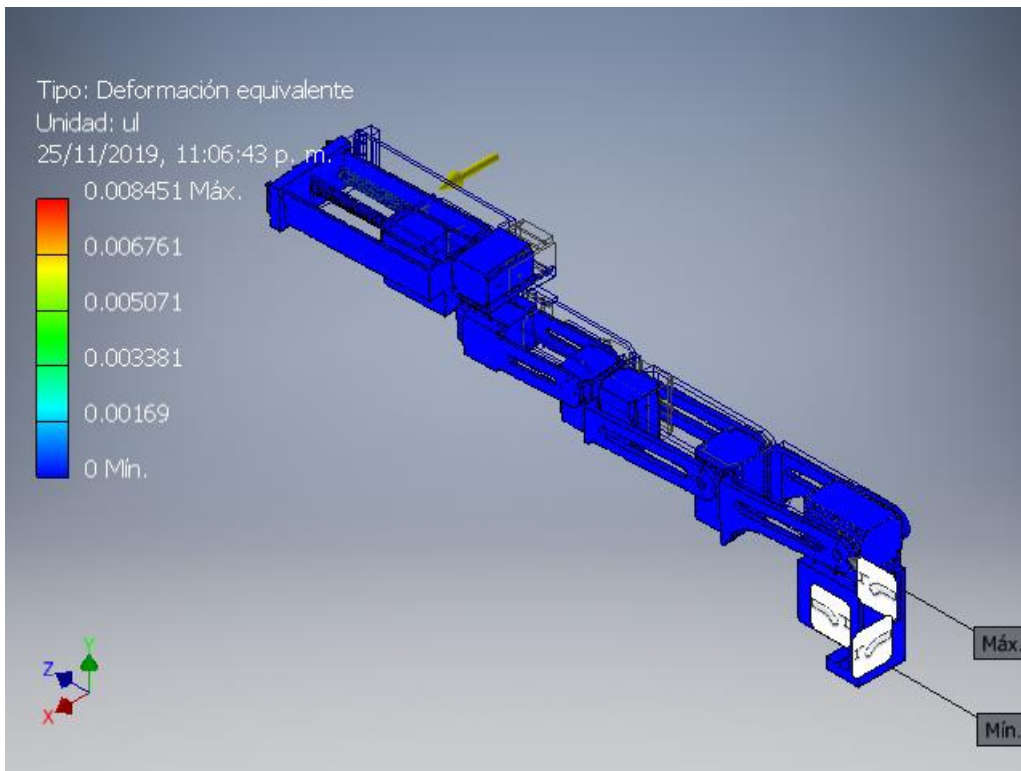
### Desplazamiento



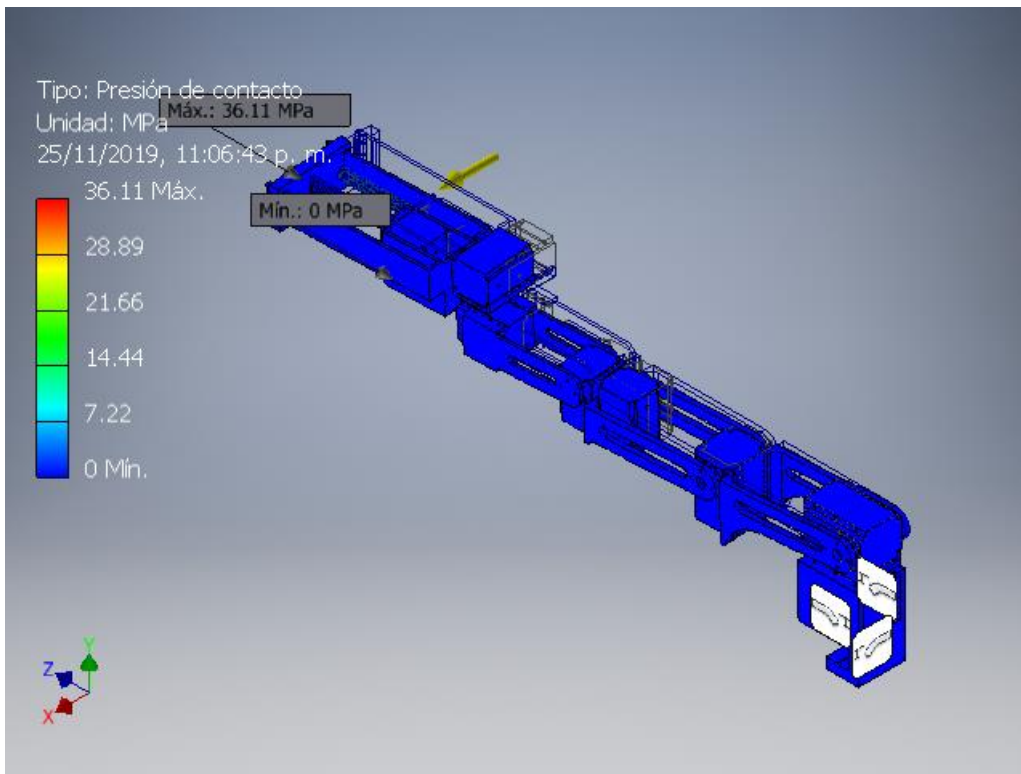
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



C:\Users\Didier\Desktop\Proyecto Humana - tercera iteracion\Diseño\_Brazo\Prototipo3\_Analisis.iam

# Análisis de esfuerzos (asumiendo PLA impreso con 100% de infill), con gravedad en el lado superior y lateral del diseño del prototipo 3



Archivo analizado:	Prototipo3_Analisis.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Fecha de creación:	26/11/2019, 1:35 a. m.
Autor del estudio:	Didier Salazar

## Información de proyecto (iProperties)

### Proyecto

Part Number	Prototipo3_Analisis
Designer	Didier

### Propiedades físicas

Masa	1.1407 kg
Área	275984 mm <sup>2</sup>
Volumen	943316 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=62.5553 mm y=187.383 mm z=212.786 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

## Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	26/11/2019, 1:23 a. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

### Material(es)

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA 100% infill	
General	Densidad de masa	1.23 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	48.49 MPa
	Resistencia máxima a tracción	48.49 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.53 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.43 su
	Módulo cortante	0.534965 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	

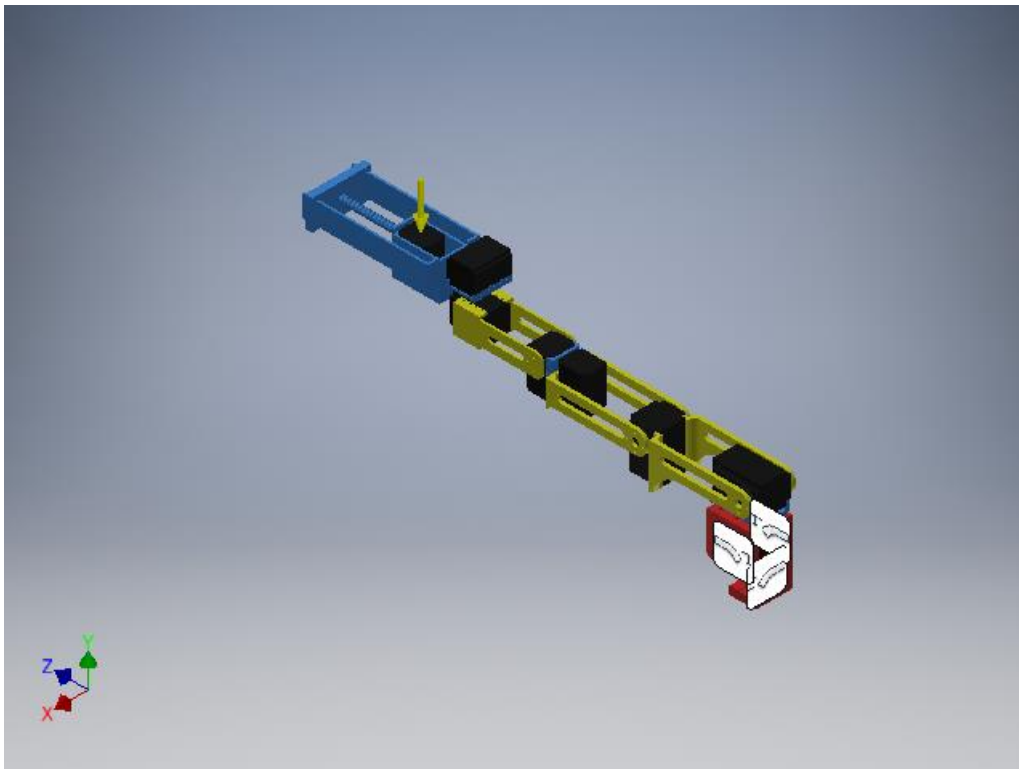
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

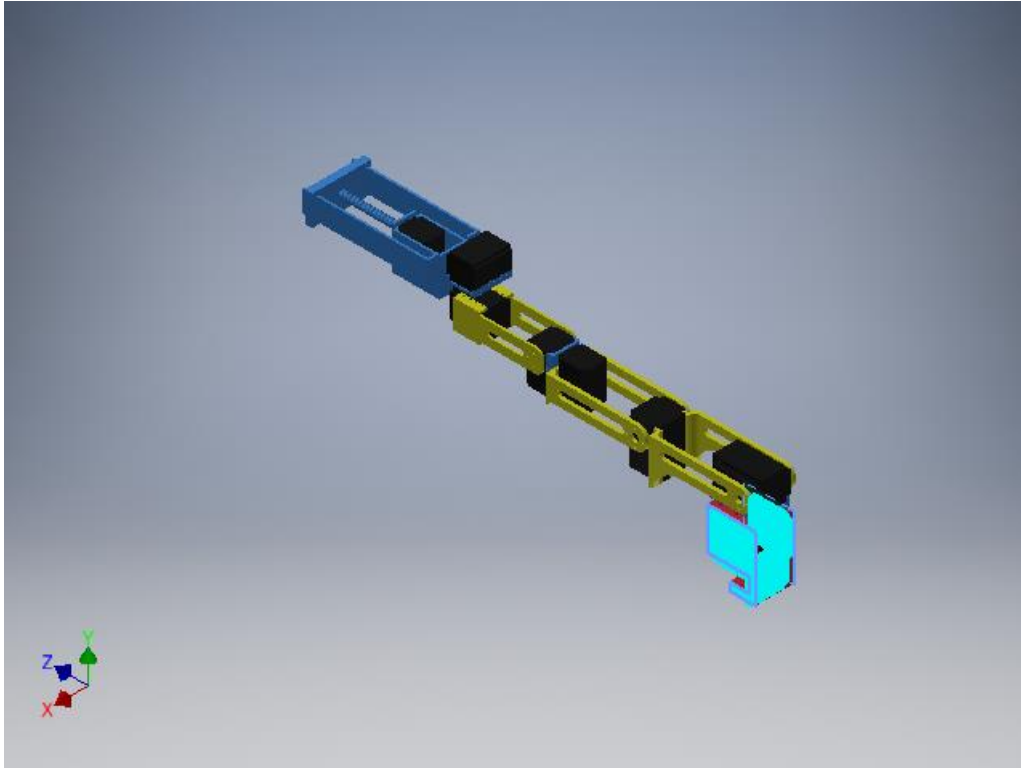
### Cara(s) seleccionada(s)



## Restricción fija:1

Tipo de restricción Restricción fija

### Cara(s) seleccionada(s)



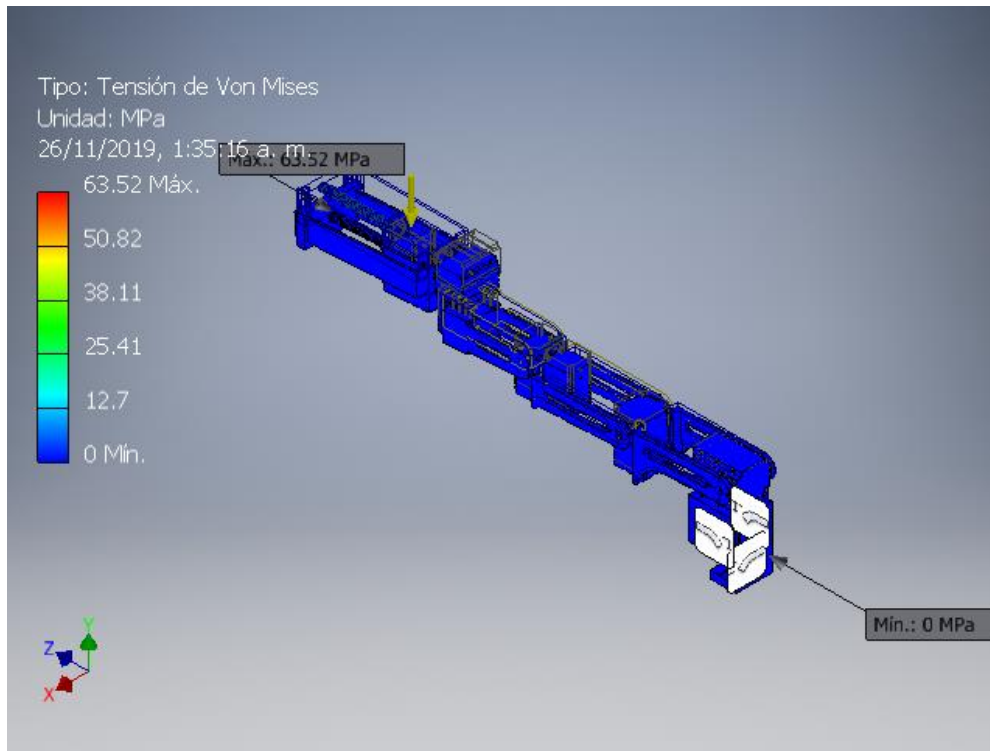
## Resultados

### Resumen de resultados

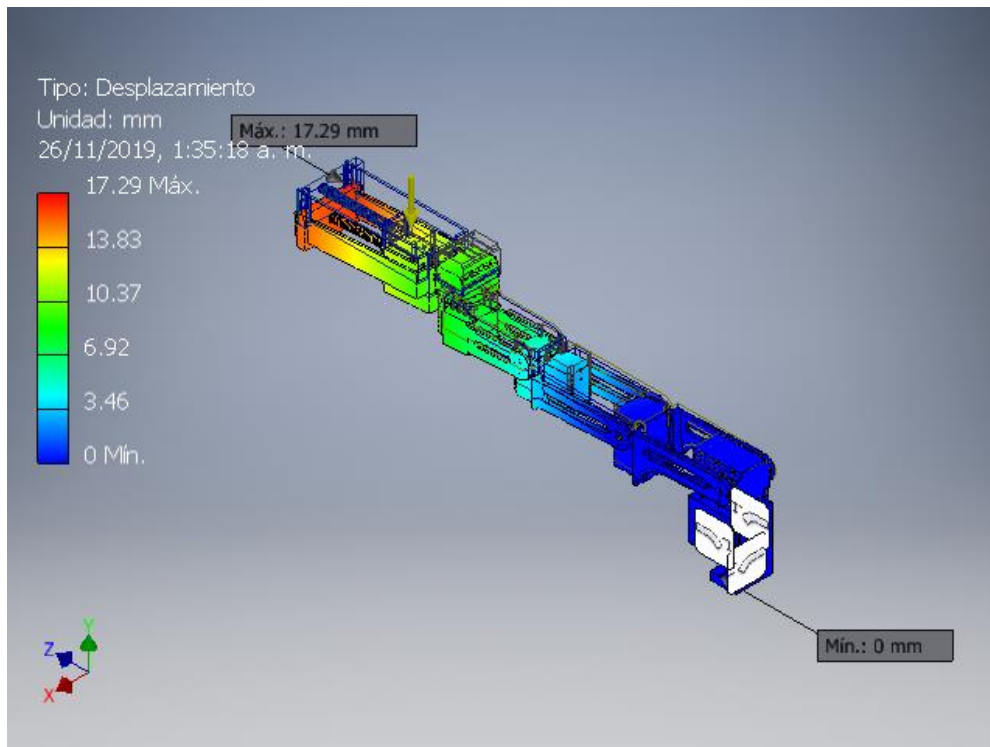
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	943314 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1407 kg	
Tensión de Von Mises	0.0000154116 MPa	63.5232 MPa
Desplazamiento	0 mm	17.2878 mm
Coefficiente de seguridad	0.633066 su	15 su
Deformación equivalente	0.0000000109118 su	0.0398754 su
Presión de contacto	0 MPa	122.78 MPa

## Figuras

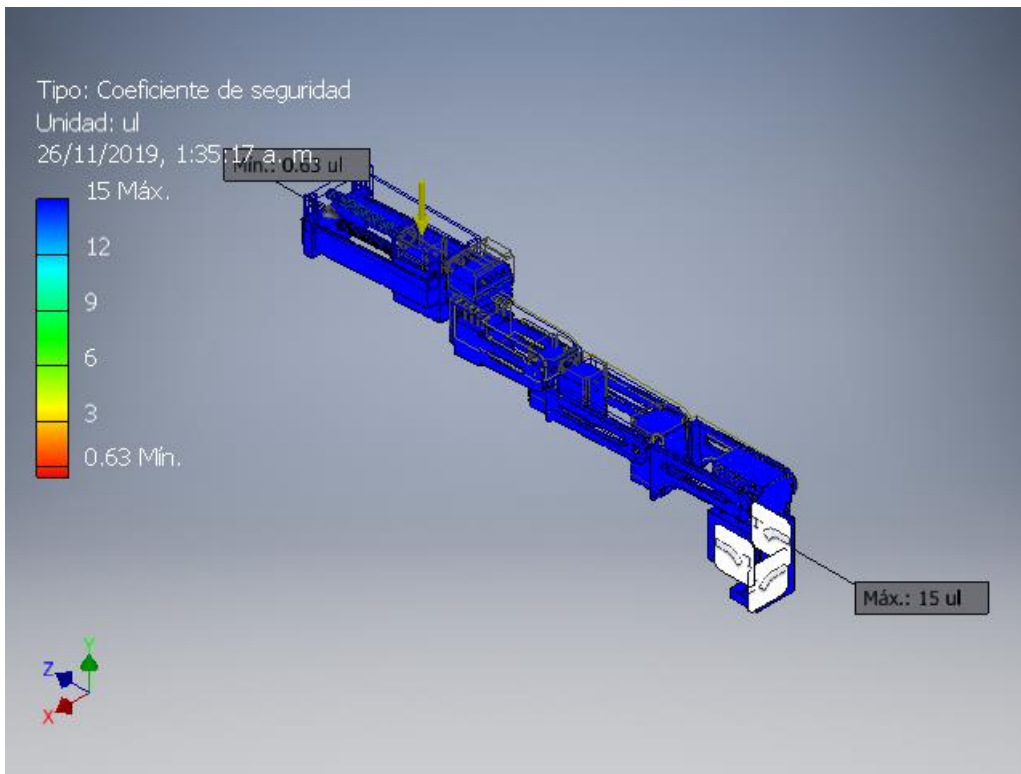
### Tensión de Von Mises



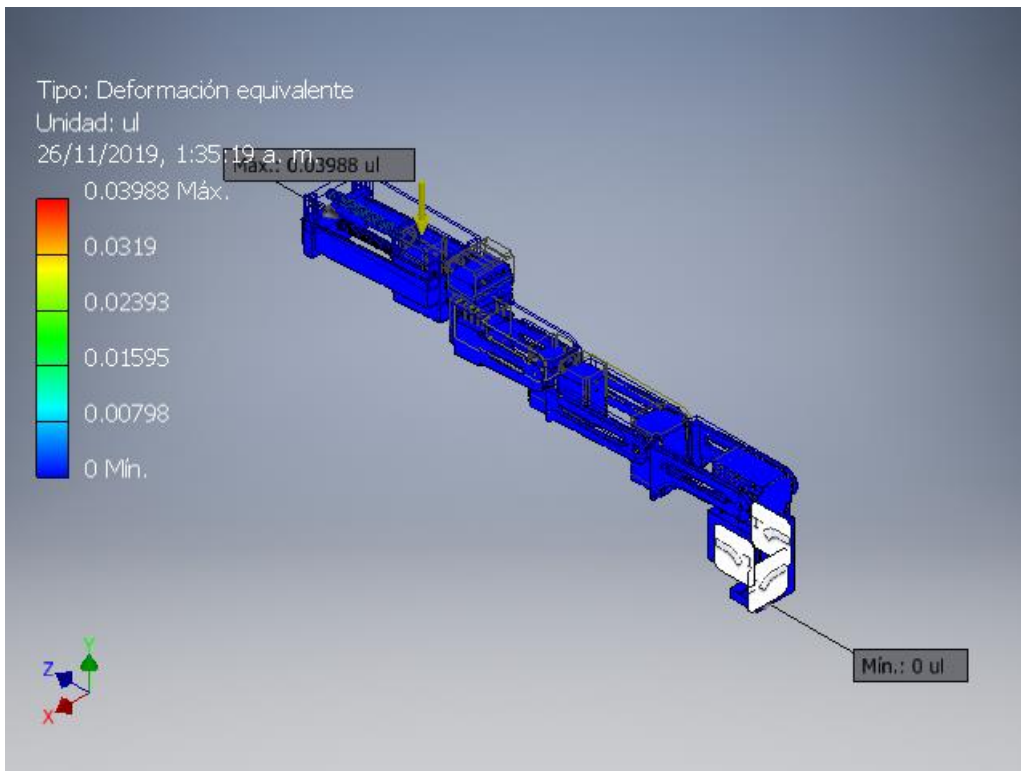
### Desplazamiento



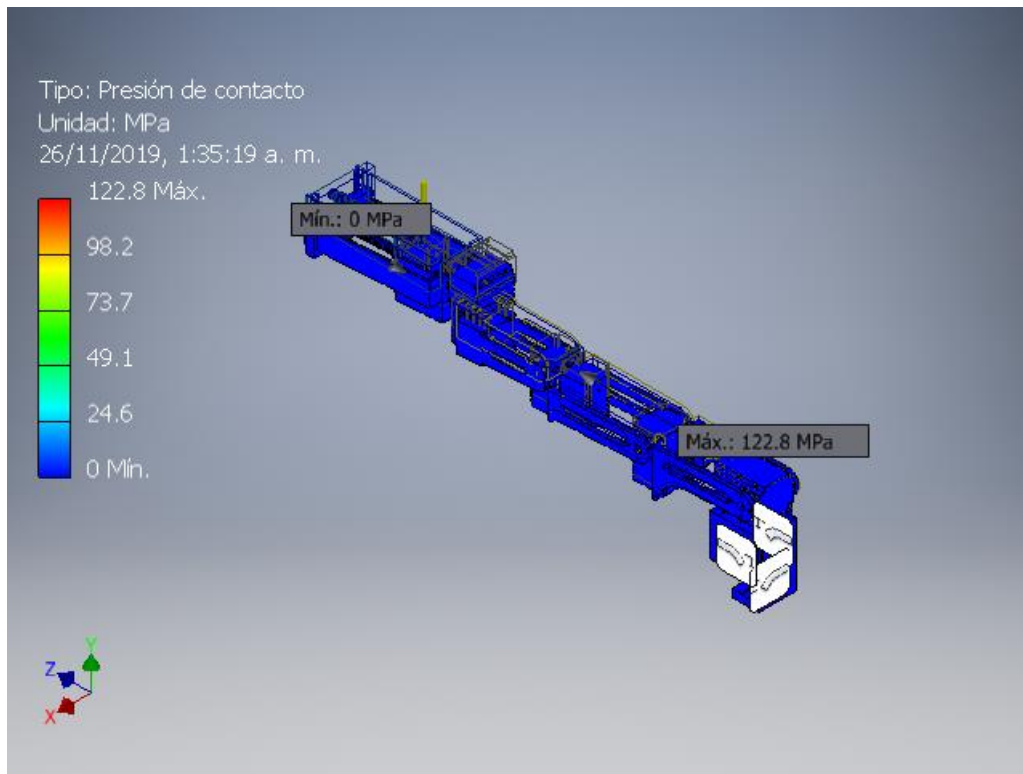
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



## Análisis estático:2

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	26/11/2019, 1:26 a. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## Material(es)

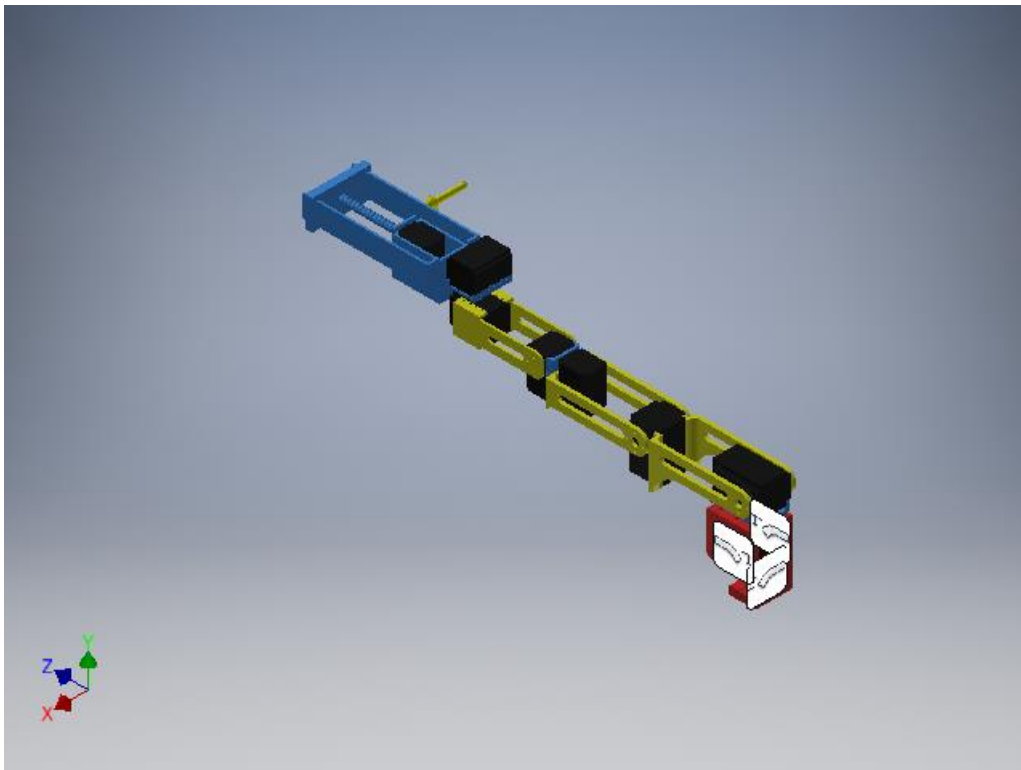
Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA 100% infill	
General	Densidad de masa	1.23 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	48.49 MPa
	Resistencia máxima a tracción	48.49 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.53 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.43 su
	Módulo cortante	0.534965 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

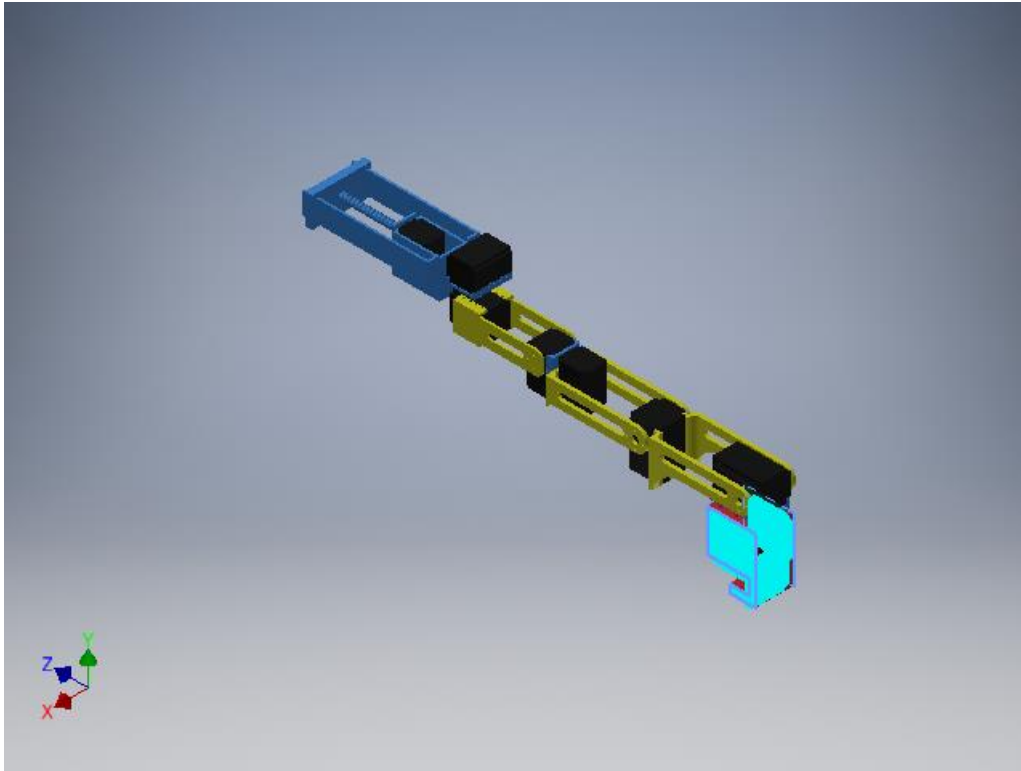
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

## Cara(s) seleccionada(s)



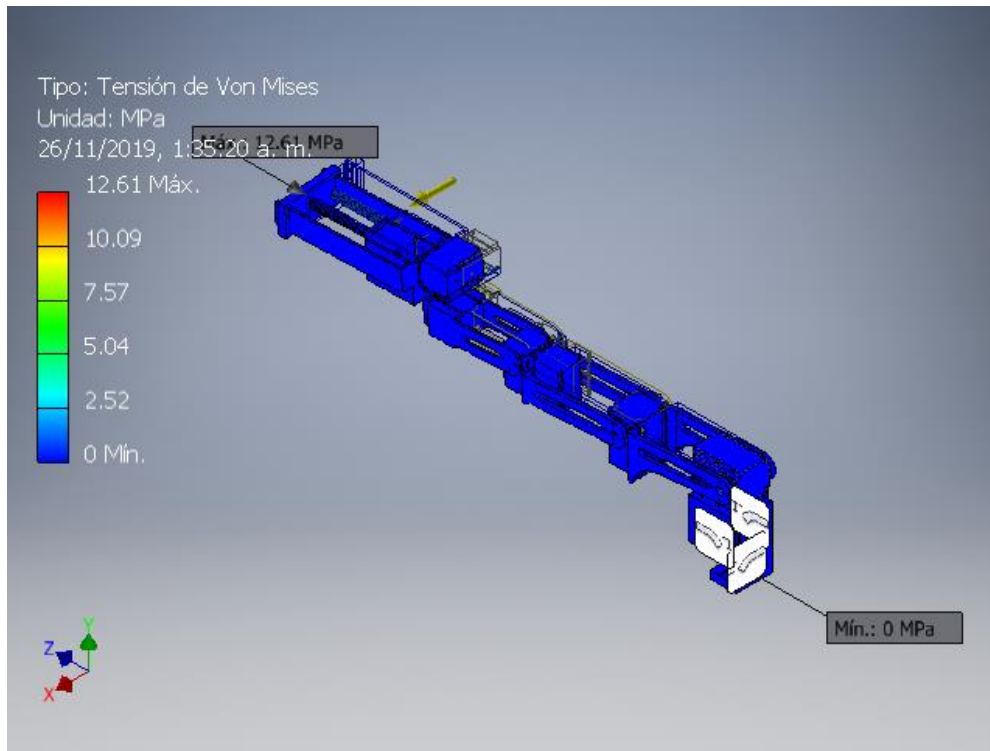
## Resultados

### Resumen de resultados

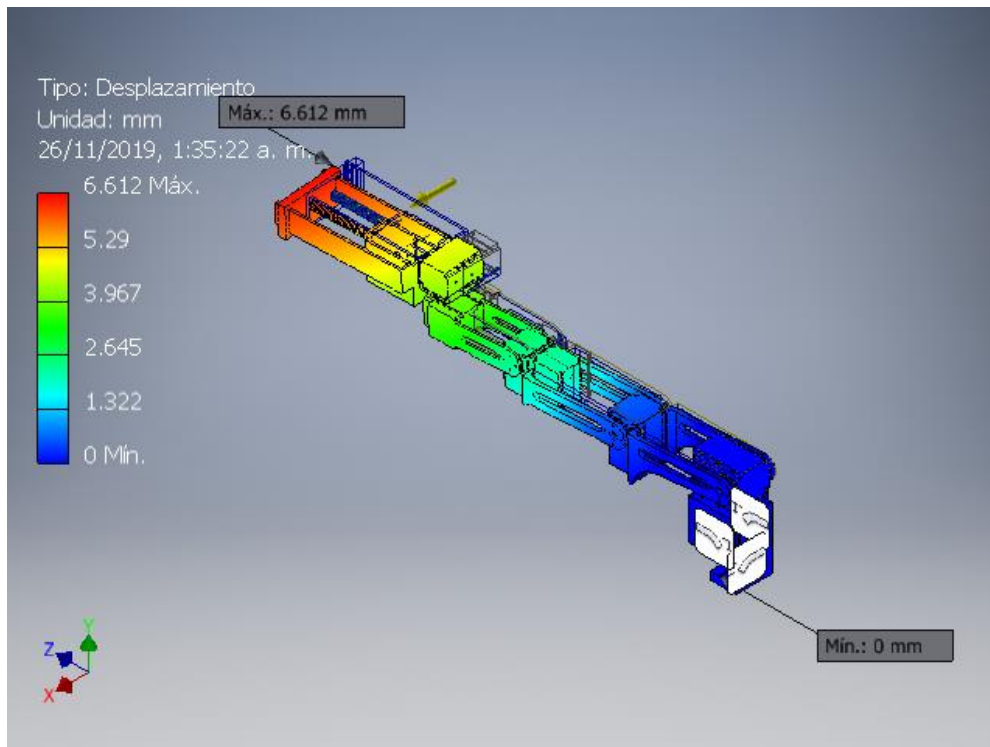
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	943314 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1407 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000158876 MPa	12.611 MPa
Desplazamiento	0 mm	6.61203 mm
Coficiente de seguridad	3.34901 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000992435 su	0.00832719 su
Presión de contacto	0 MPa	21.5933 MPa

## Figuras

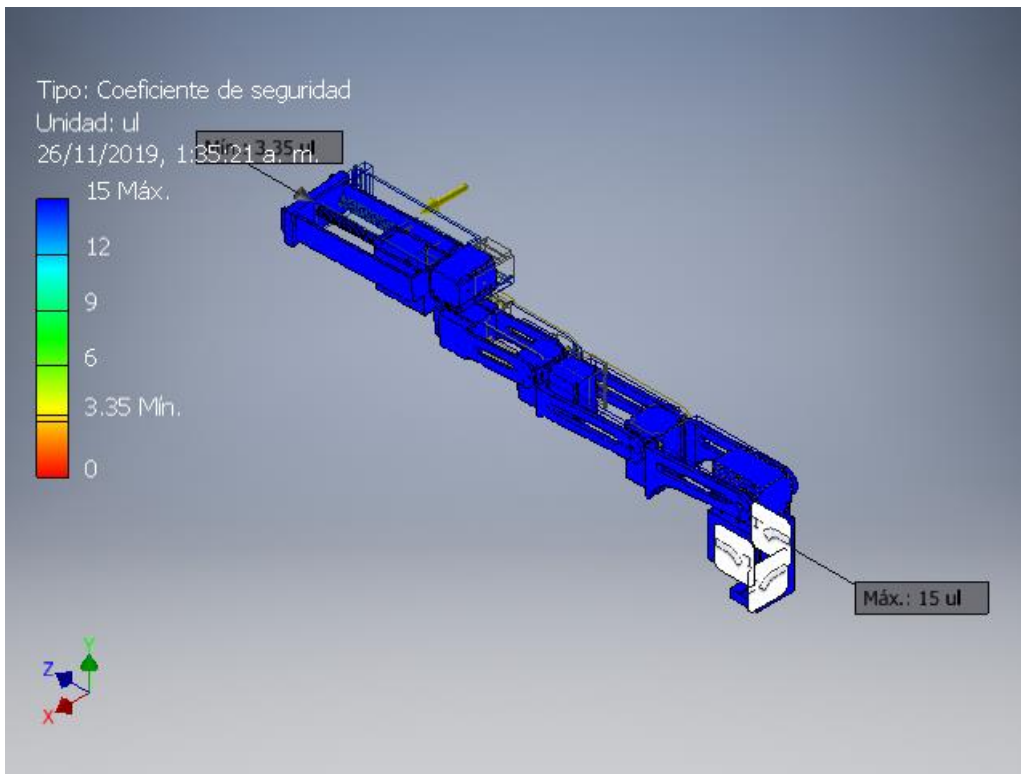
### Tensión de Von Mises



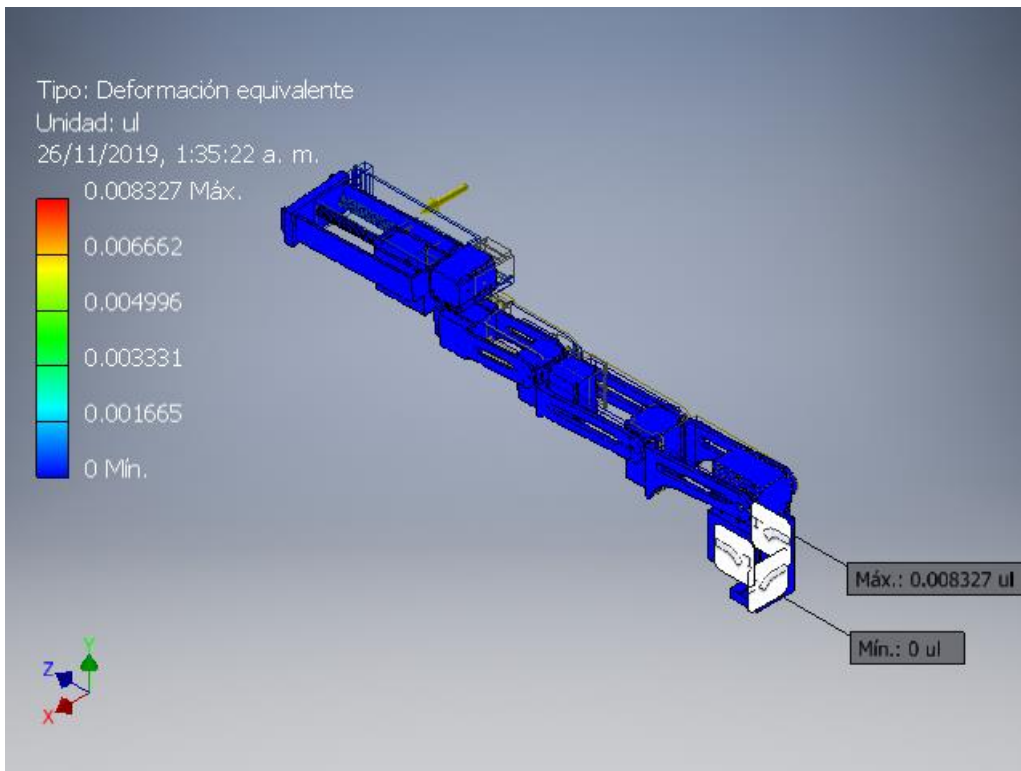
### Desplazamiento



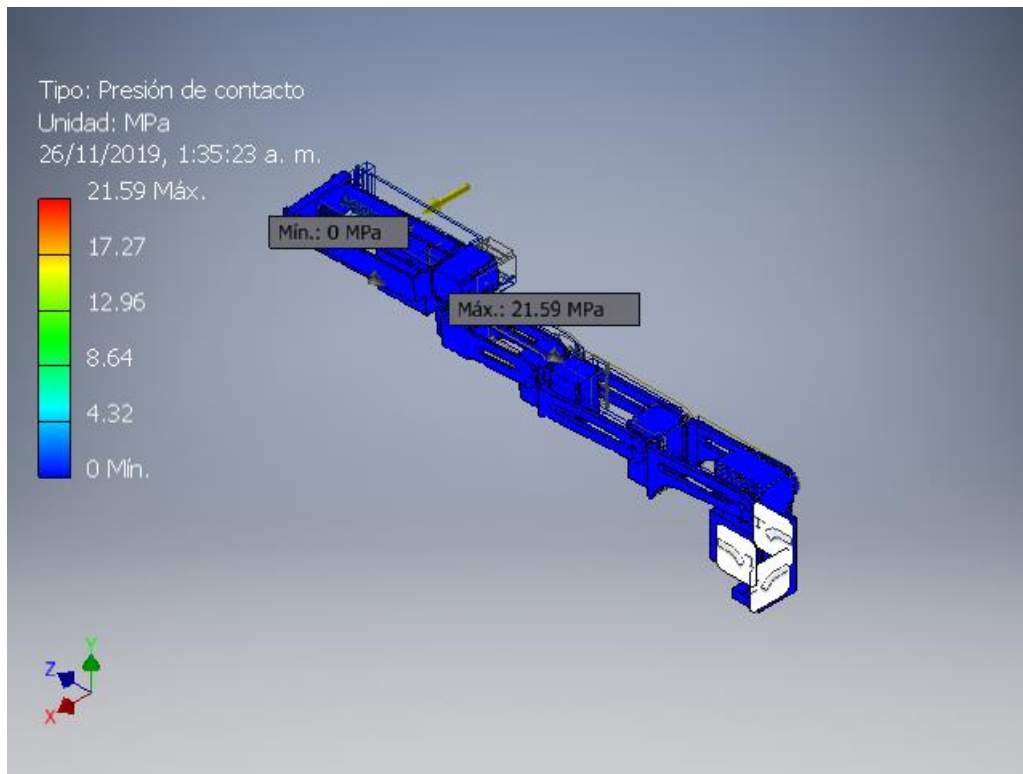
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



C:\Users\Didier\Desktop\Proyecto Humana - tercera iteracion\Diseño\_Brazo\Prototipo3\_Analisis.iam

# Análisis de esfuerzos (asumiendo PLA inyectado), con gravedad en el lado superior y lateral del diseño del prototipo 4



Archivo analizado:	Prototipo4_Analisis.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Fecha de creación:	26/11/2019, 12:59 a. m.
Autor del estudio:	Didier Salazar

## Información de proyecto (iProperties)

### Proyecto

Part Number	Prototipo4_Analisis
Designer	Didier

### Propiedades físicas

Masa	1.16112 kg
Área	269156 mm <sup>2</sup>
Volumen	954531 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=62.5029 mm y=189.669 mm z=187.536 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

## Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	26/11/2019, 12:43 a. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

### Material(es)

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA	
General	Densidad de masa	1.24 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	49.5 MPa
	Resistencia máxima a tracción	45.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.3465 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.4 su
	Módulo cortante	0.838036 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	

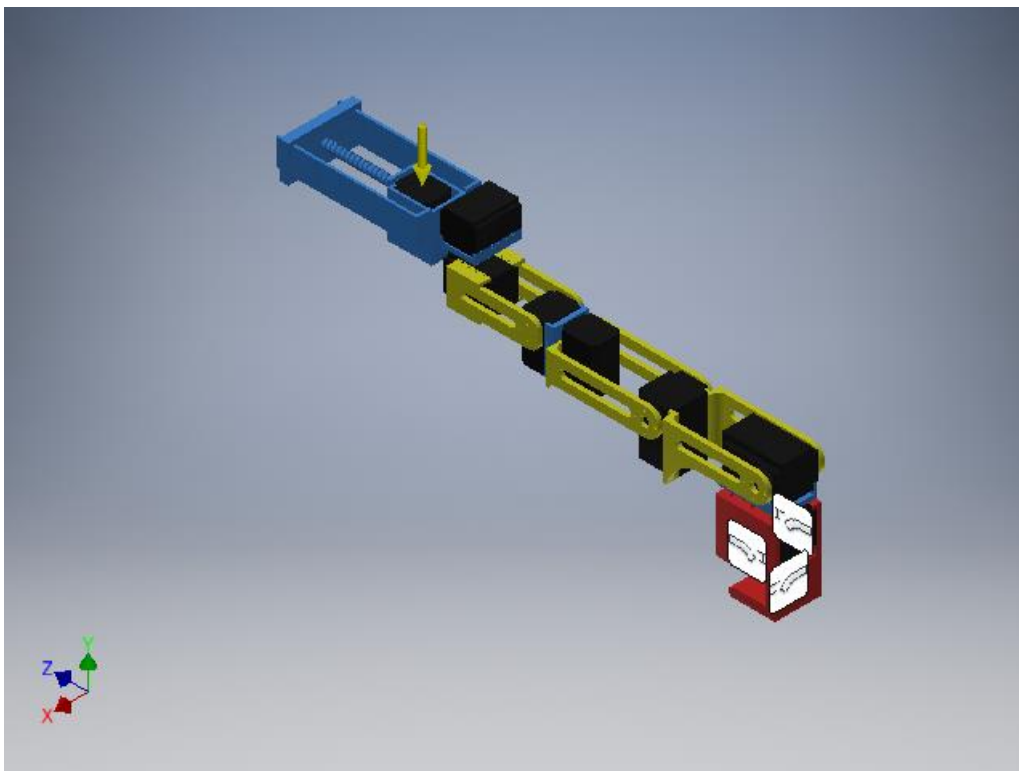
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	0.000 mm/s <sup>2</sup>

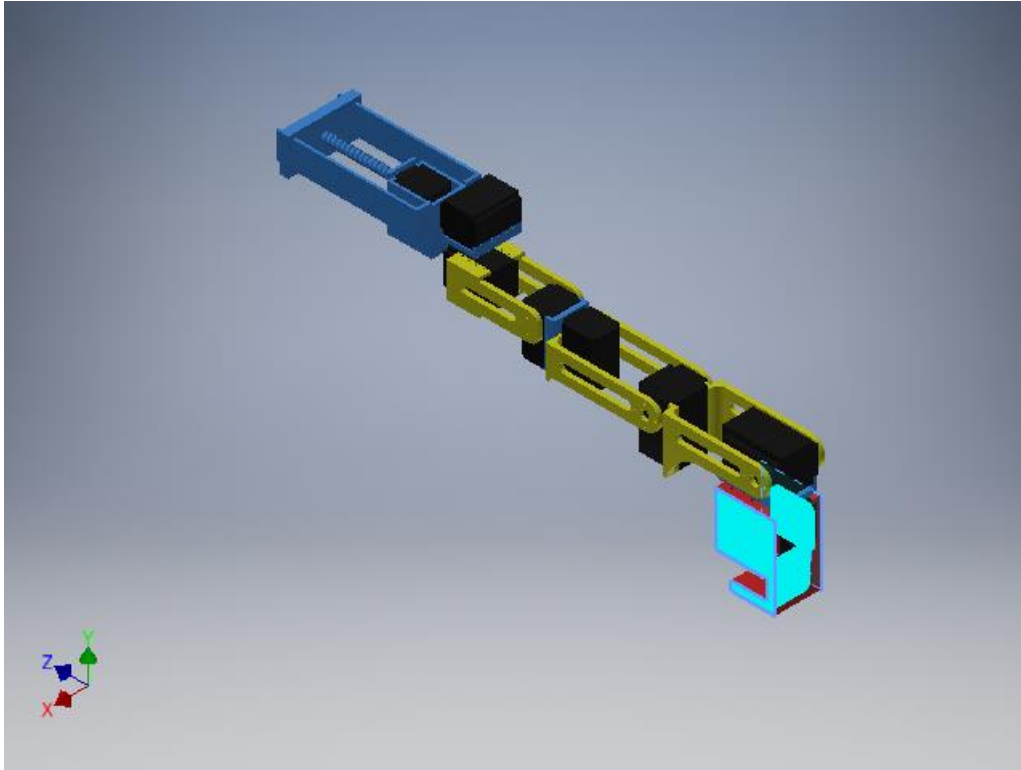
### Cara(s) seleccionada(s)



## Restricción fija:1

Tipo de restricción Restricción fija

### Cara(s) seleccionada(s)



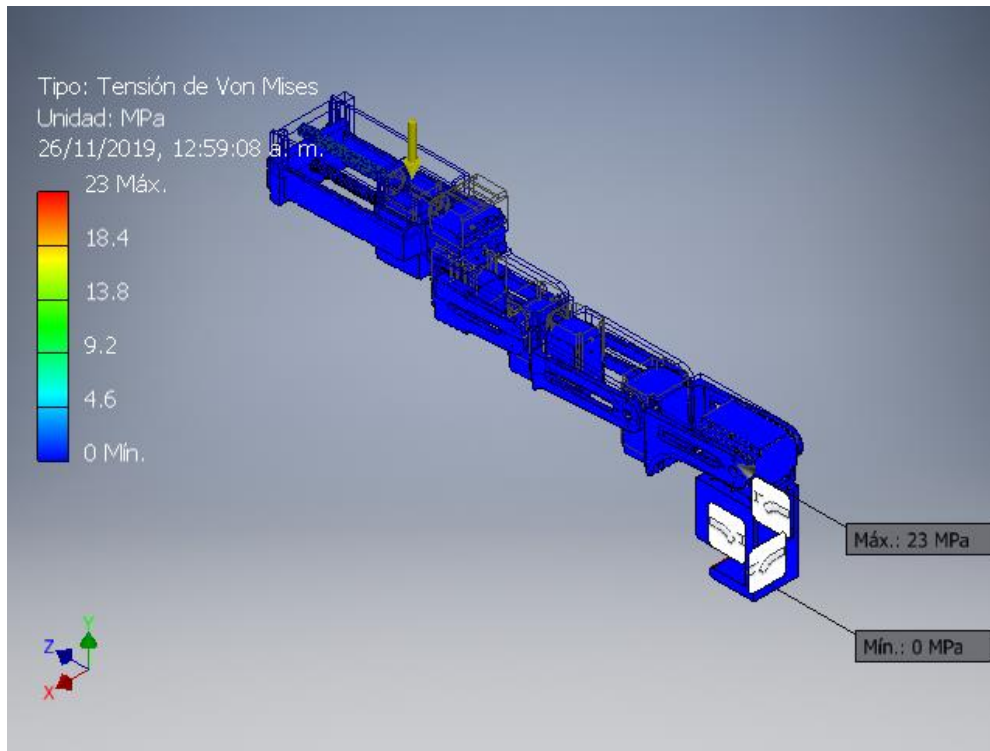
## Resultados

### Resumen de resultados

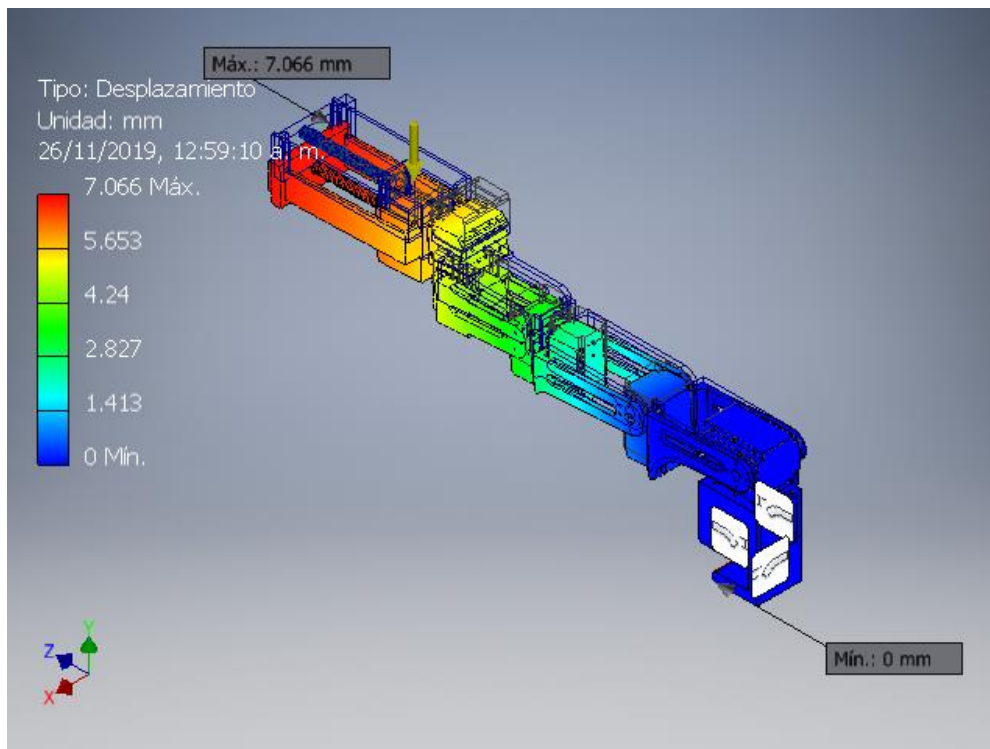
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	954529 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1578 kg	
Tensión de Von Mises	0.00000000025719 MPa	23.0043 MPa
Desplazamiento	0 mm	7.06648 mm
Coefficiente de seguridad	2.5275 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000000102431 su	0.0197984 su
Presión de contacto	0 MPa	17.3879 MPa

## Figuras

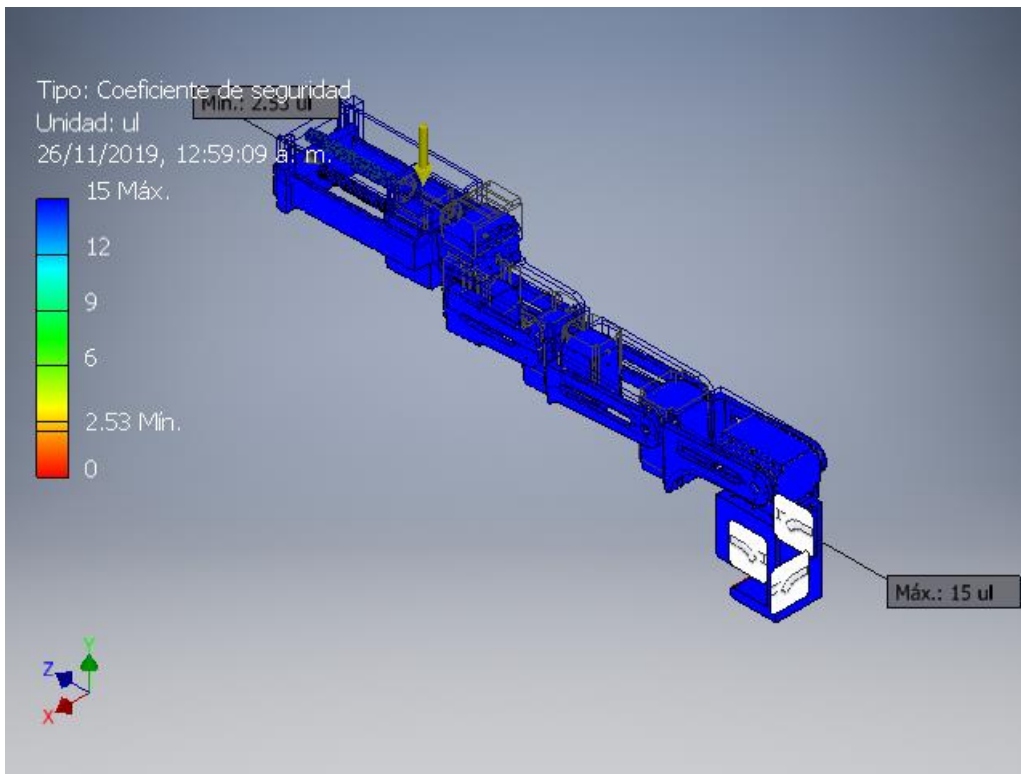
### Tensión de Von Mises



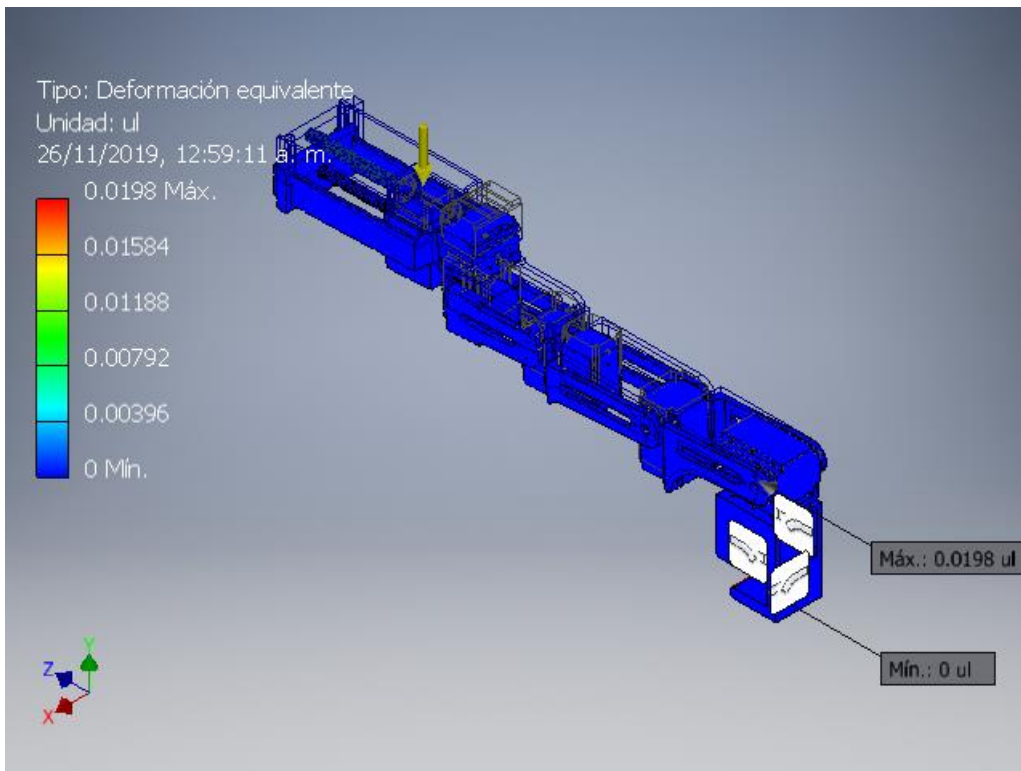
### Desplazamiento



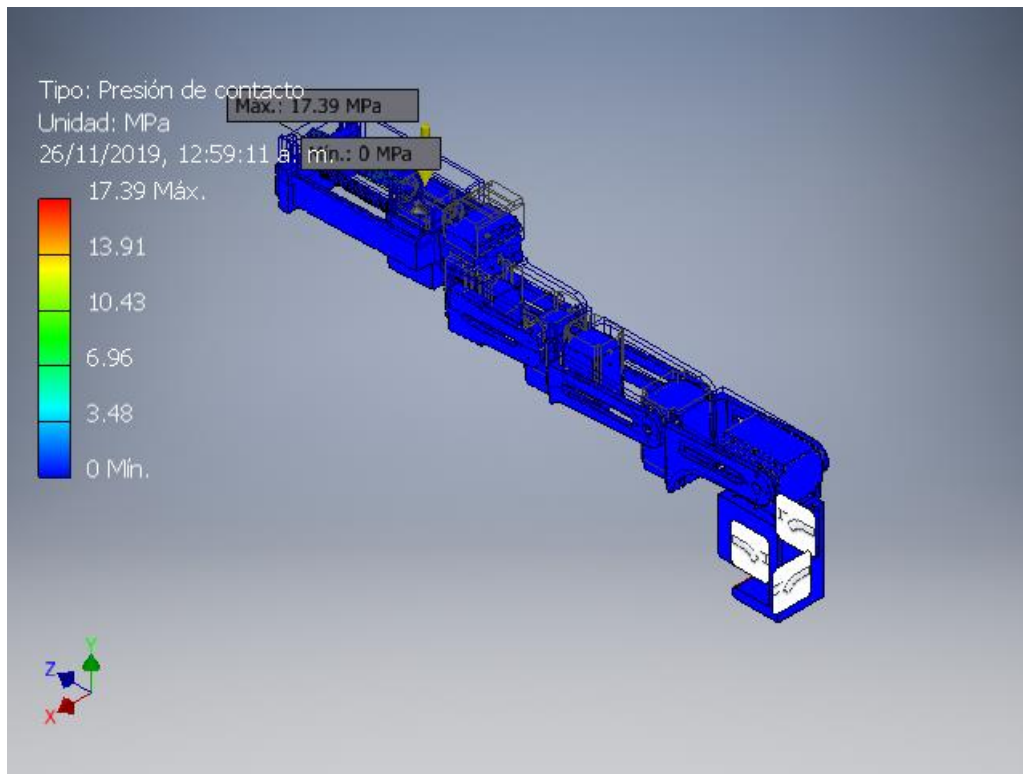
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



## Análisis estático:2

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	26/11/2019, 12:52 a. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## Material(es)

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA	
General	Densidad de masa	1.24 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	49.5 MPa
	Resistencia máxima a tracción	45.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.3465 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.4 su
	Módulo cortante	0.838036 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

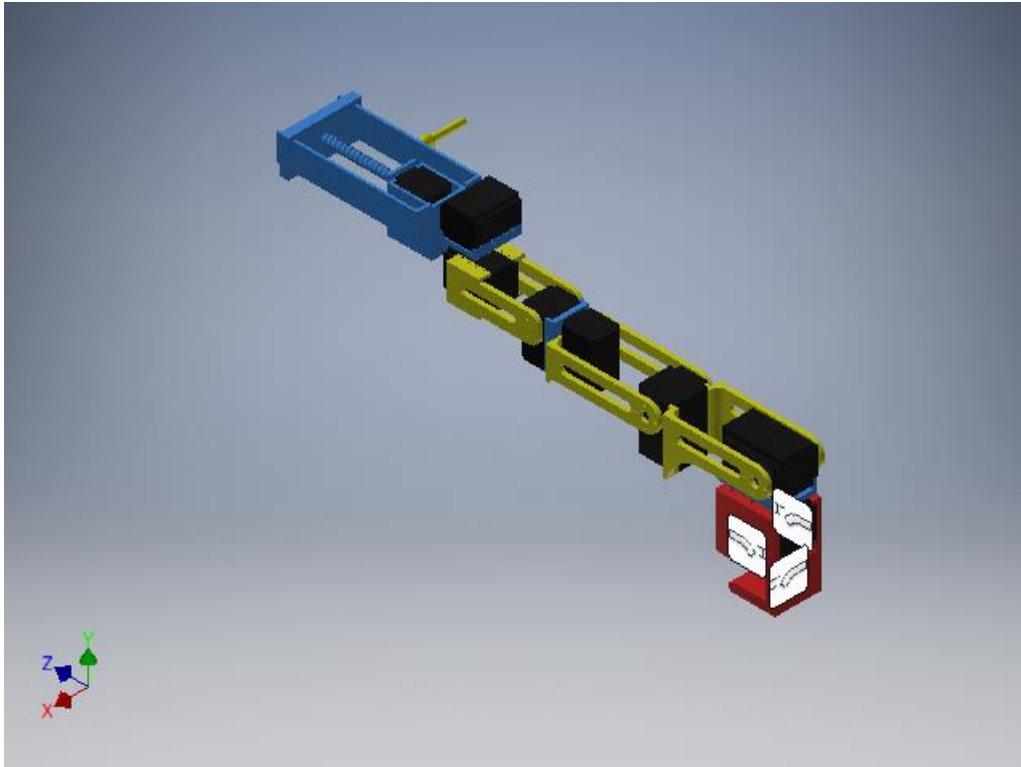
	AX12AServo AX12AServo
--	--------------------------

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

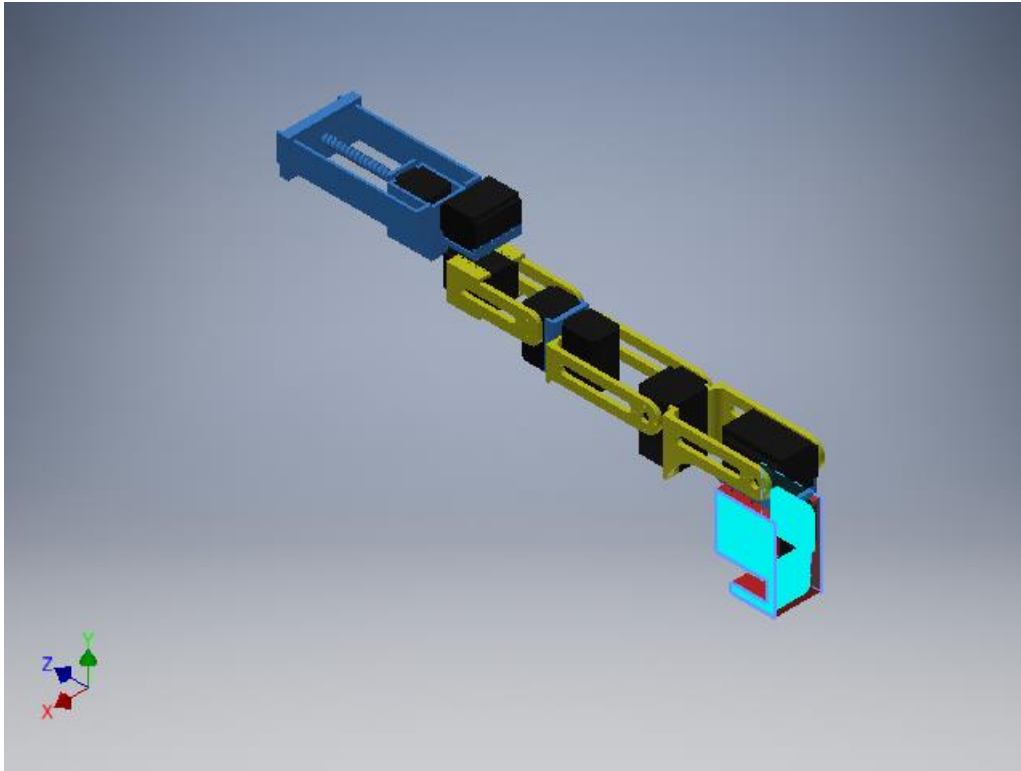
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

### Cara(s) seleccionada(s)



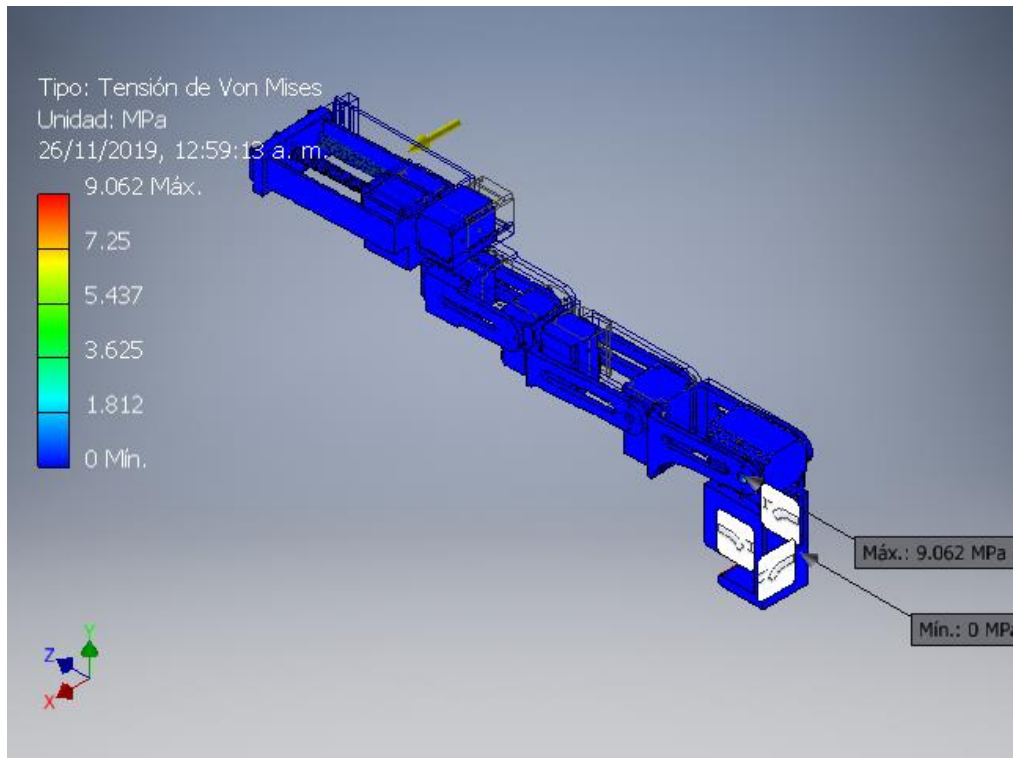
## Resultados

### Resumen de resultados

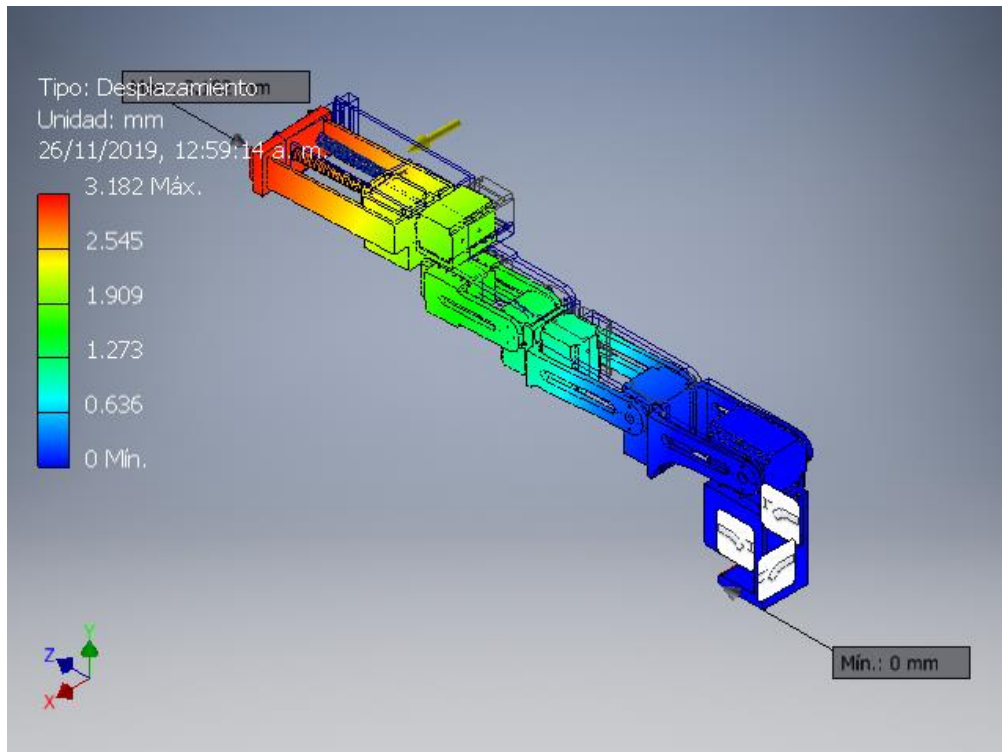
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	954529 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1578 kg	
Tensión de Von Mises	0.000000000600128 MPa	9.06192 MPa
Desplazamiento	0 mm	3.18175 mm
Coficiente de seguridad	9.75637 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000000287754 su	0.00784224 su
Presión de contacto	0 MPa	4.25026 MPa

## Figuras

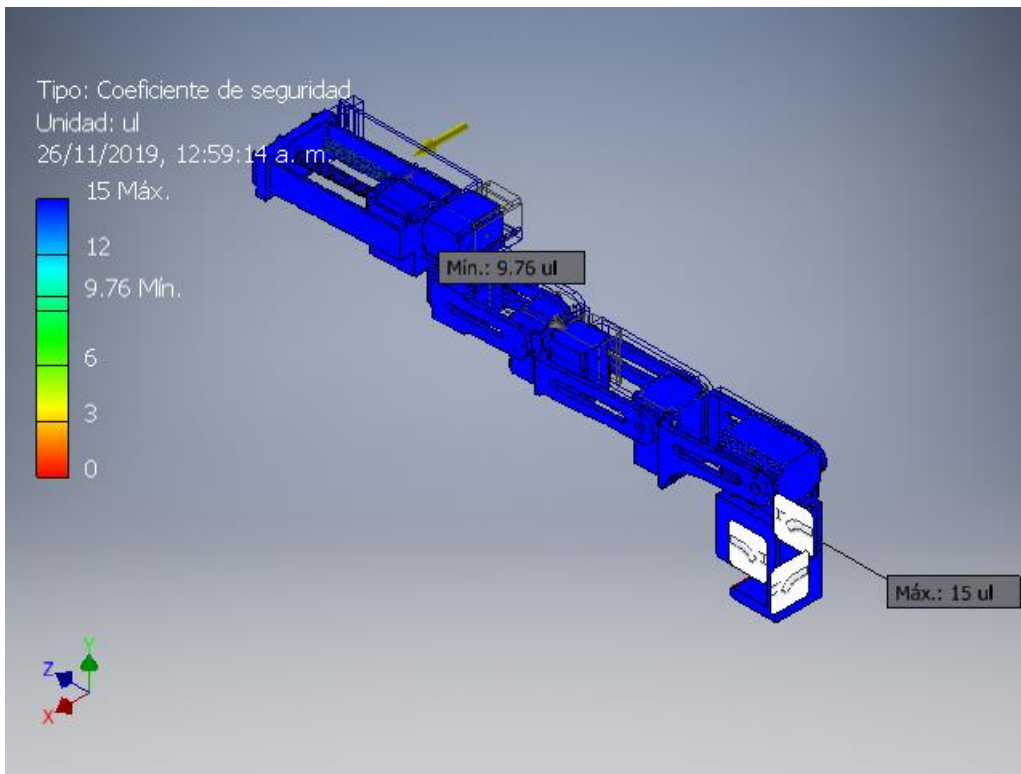
### Tensión de Von Mises



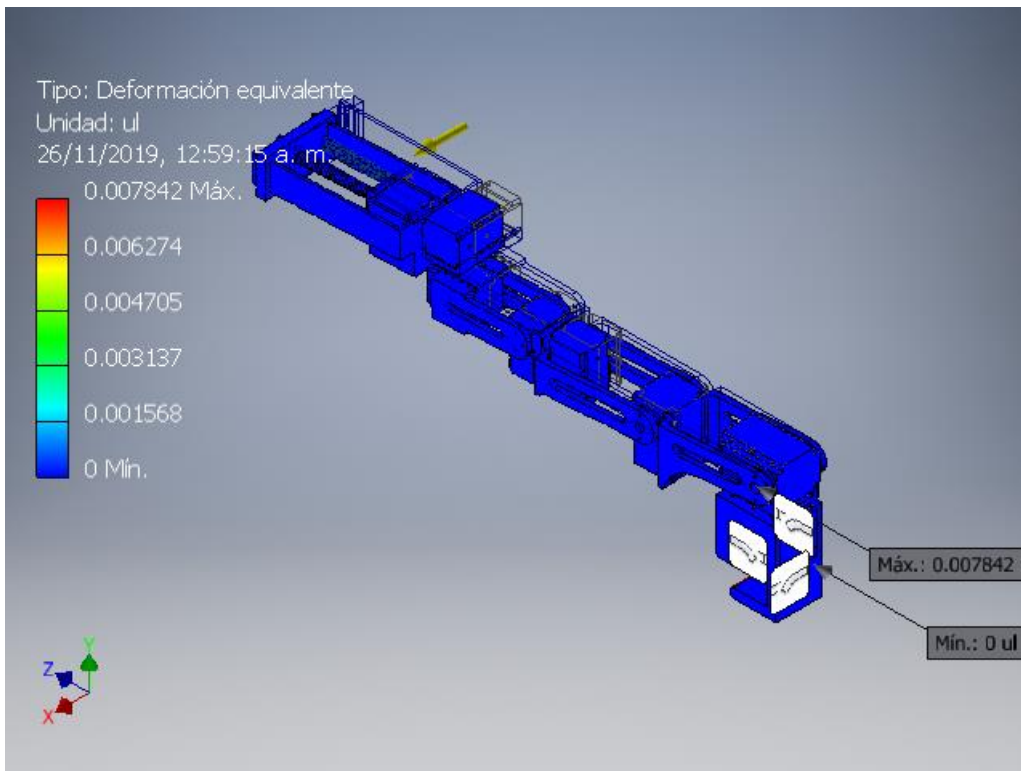
### Desplazamiento



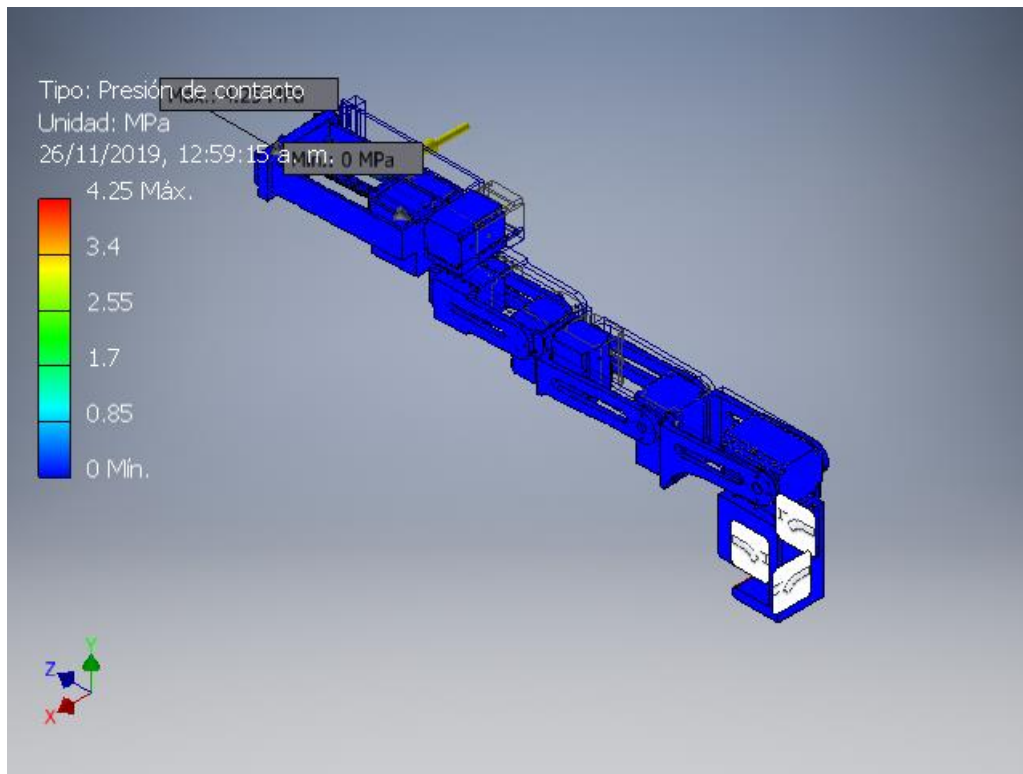
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



C:\Users\Didier\Desktop\Proyecto Humana - cuarta iteracion\Diseño\_Brazo\Prototipo4\_Analisis.iam

# Análisis de esfuerzos (asumiendo PLA impreso con 100% de infill), con gravedad en el lado superior y lateral del diseño del prototipo 4



Archivo analizado:	Prototipo4_Analisis.iam
Versión de Autodesk Inventor:	2018 (Build 220112000, 112)
Fecha de creación:	26/11/2019, 1:16 a. m.
Autor del estudio:	Didier Salazar

## Información de proyecto (iProperties)

### Proyecto

Part Number	Prototipo4_Analisis
Designer	Didier

### Propiedades físicas

Masa	1.1545 kg
Área	269156 mm <sup>2</sup>
Volumen	954531 mm <sup>3</sup>
Centro de gravedad	x=62.5005 mm y=189.693 mm z=187.386 mm

Nota: los valores físicos pueden ser diferentes de los valores físicos utilizados por CEF indicados a continuación.

## Análisis estático:1

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	26/11/2019, 1:08 a. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

**Configuración de malla:**

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

**Material(es)**

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA 100% Infill	
General	Densidad de masa	1.23 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	48.49 MPa
	Resistencia máxima a tracción	48.49 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.54 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.43 su
	Módulo cortante	0.538462 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	

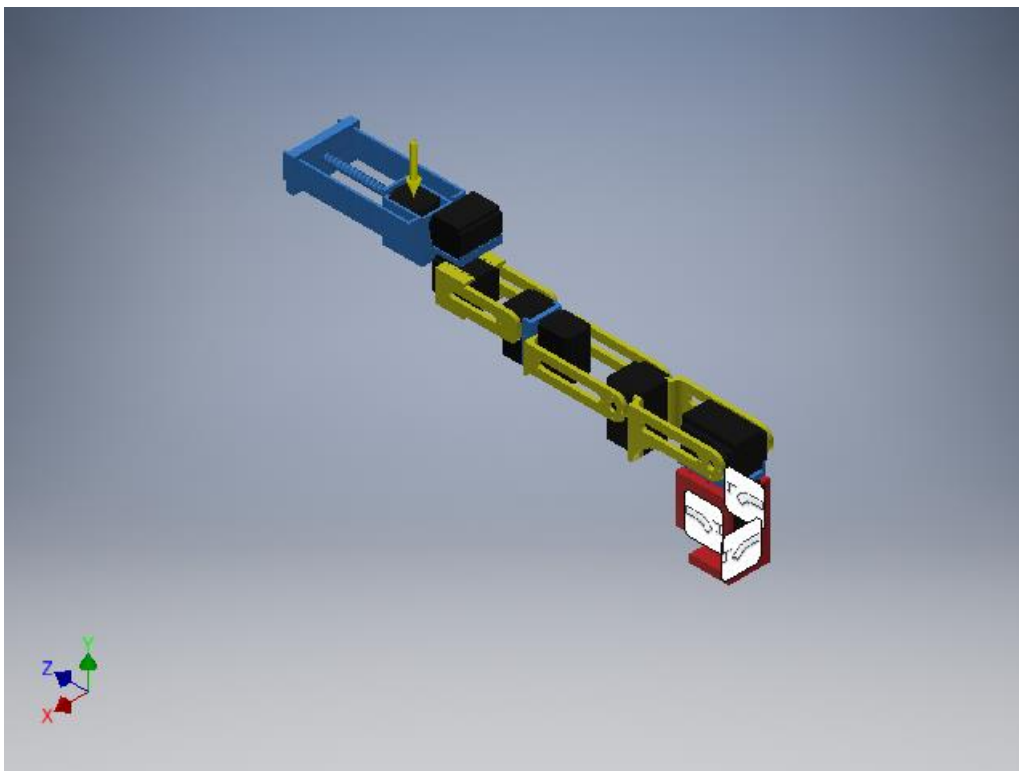
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	-9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	0.000 mm/s <sup>2</sup>

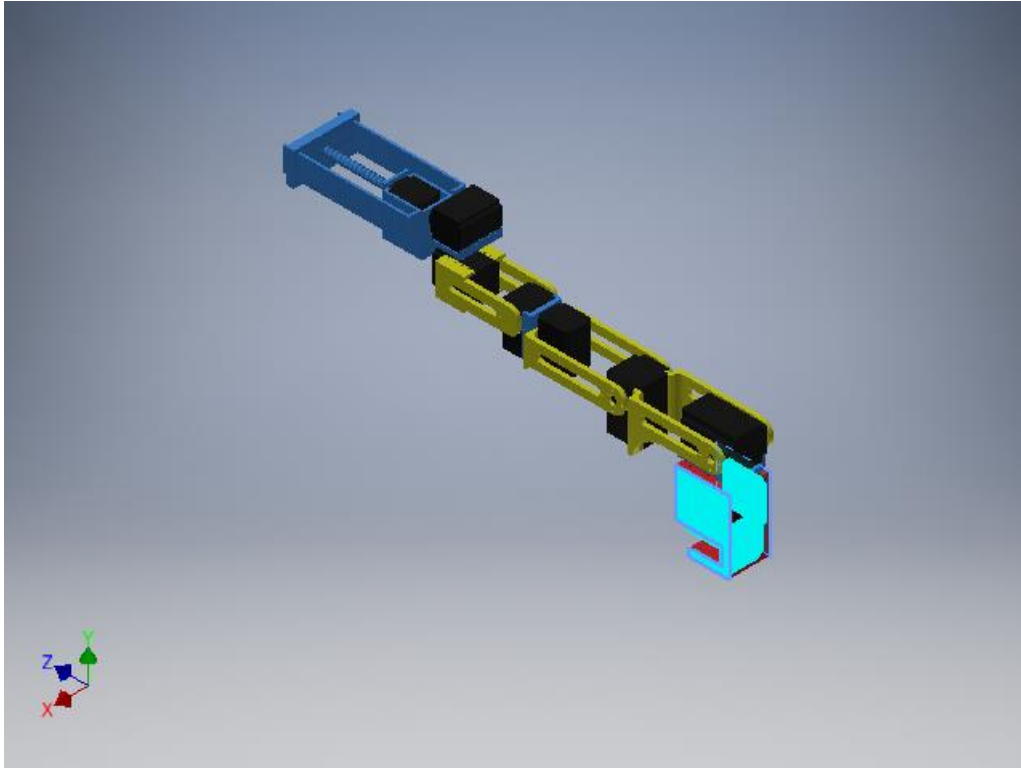
### Cara(s) seleccionada(s)



## Restricción fija:1

Tipo de restricción Restricción fija

### Cara(s) seleccionada(s)



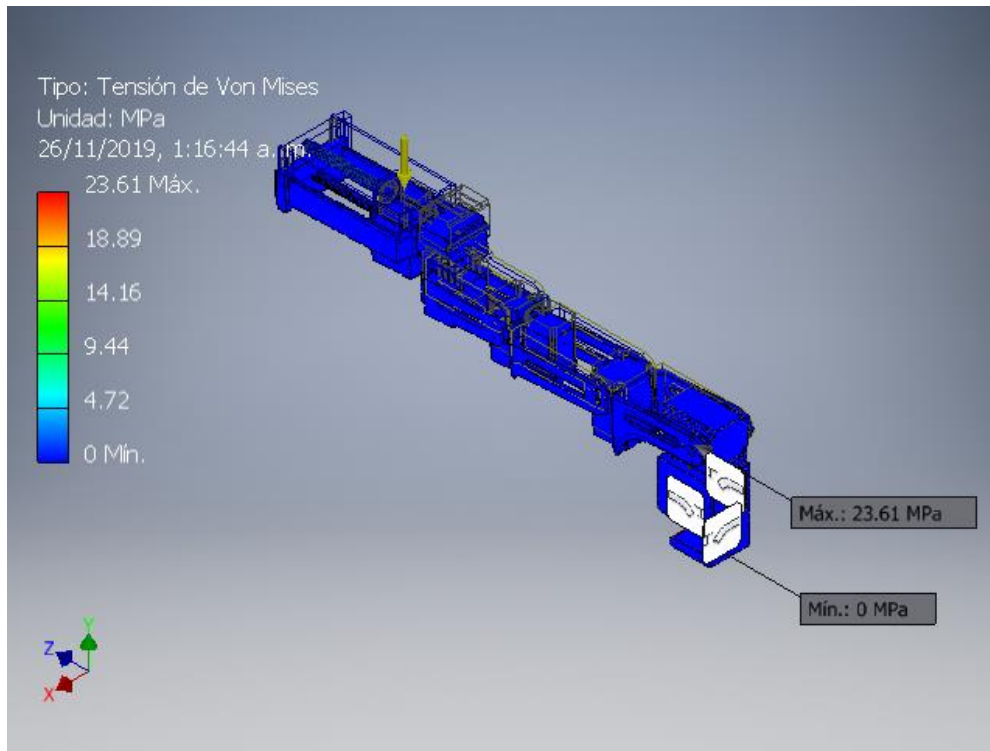
## Resultados

### Resumen de resultados

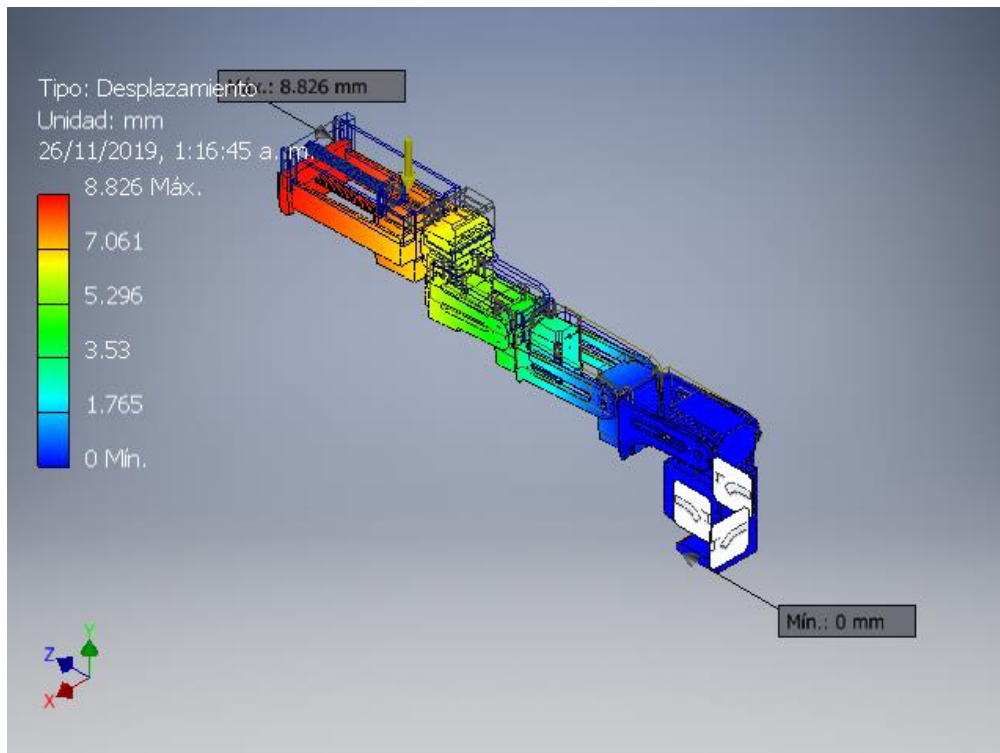
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	954529 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1545 kg	
Tensión de Von Mises	0.0000000000798385 MPa	23.6069 MPa
Desplazamiento	0 mm	8.82594 mm
Coefficiente de seguridad	2.38199 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000000496875 su	0.0203169 su
Presión de contacto	0 MPa	16.0517 MPa

## Figuras

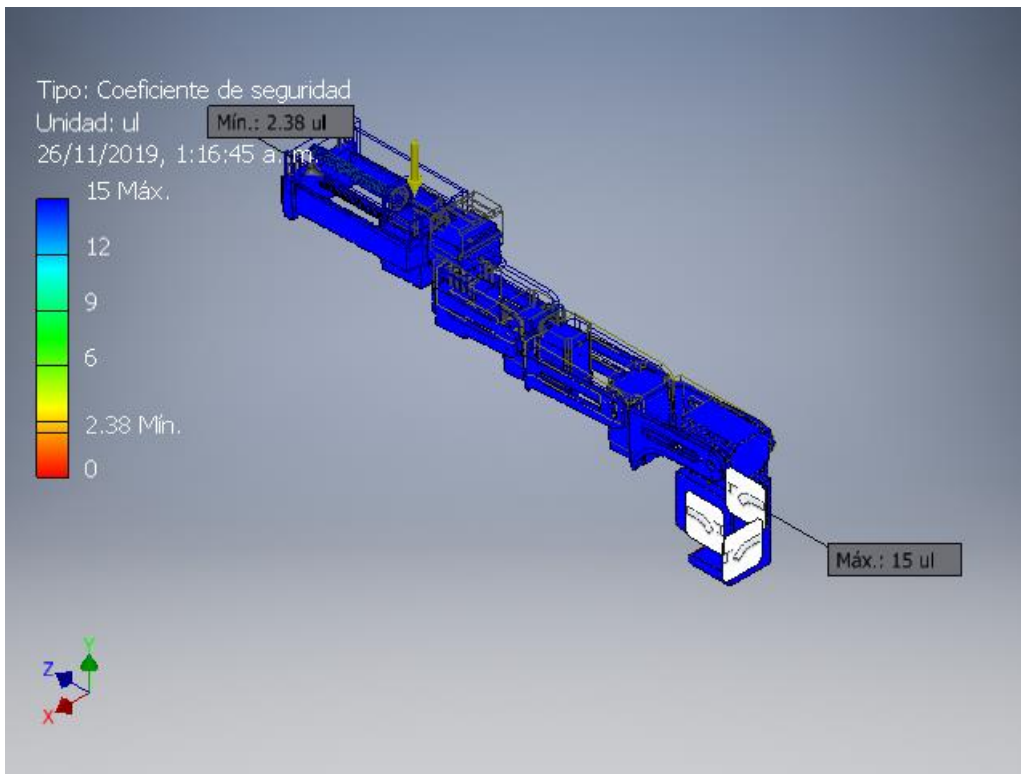
### Tensión de Von Mises



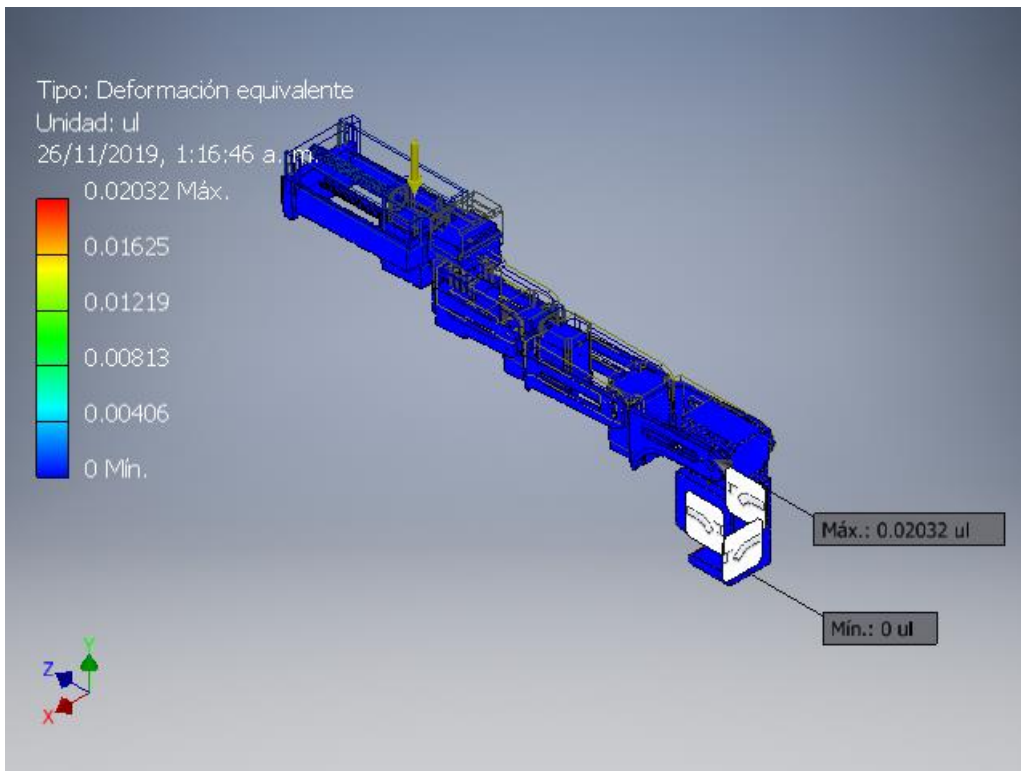
### Desplazamiento



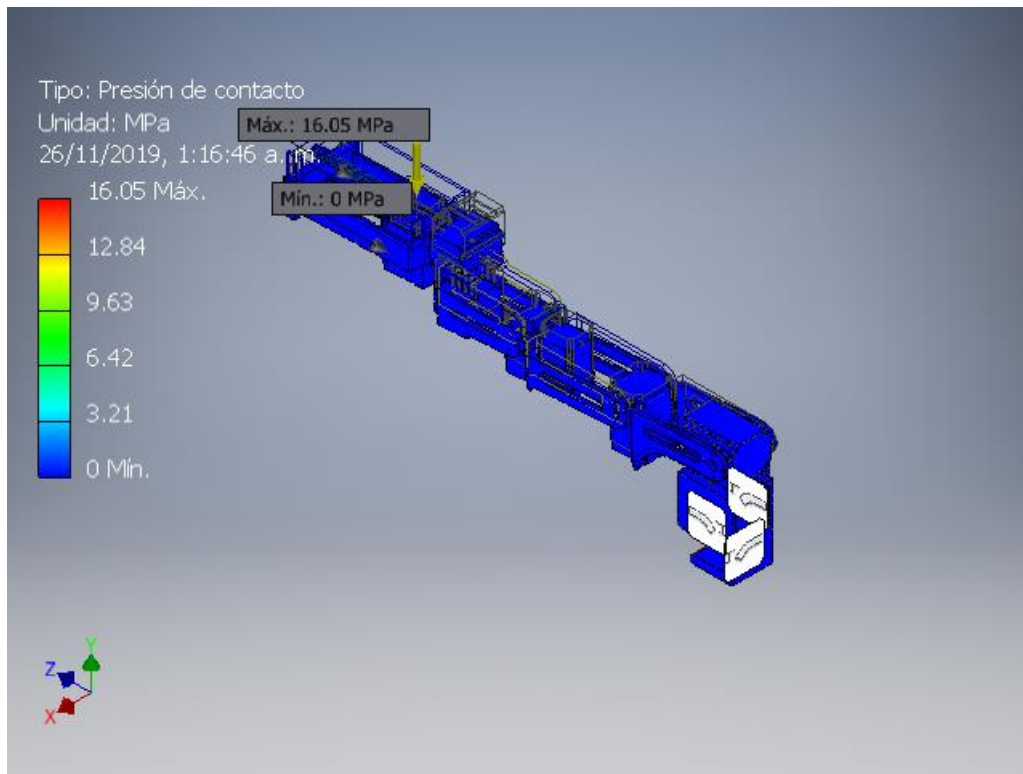
## Coefficiente de seguridad



## Deformación equivalente



## Presión de contacto



## Análisis estático:2

### Objetivo general y configuración:

Objetivo del diseño	Punto único
Tipo de estudio	Análisis estático
Fecha de la última modificación	26/11/2019, 1:11 a. m.
Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido	No
Separar tensiones en superficies de contacto	No
Análisis de cargas de movimiento	No

### Configuración de malla:

Tamaño medio de elemento (fracción del diámetro del modelo)	0.1
Tamaño mínimo de elemento (fracción del tamaño medio)	0.2
Factor de modificación	1.5
Ángulo máximo de giro	60 gr
Crear elementos de malla curva	No
Usar medida basada en pieza para la malla del ensamblaje	Sí

## Material(es)

Nombre	Plástico PAEK	
General	Densidad de masa	1.32 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	99.97 MPa
	Resistencia máxima a tracción	210 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.1 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.42 su
	Módulo cortante	0.387324 GPa
Nombre(s) de pieza	MX106TServo MX106TServo MX106TServo	
Nombre	PLA 100% Infill	
General	Densidad de masa	1.23 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	48.49 MPa
	Resistencia máxima a tracción	48.49 MPa
Tensión	Módulo de Young	1.54 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.43 su
	Módulo cortante	0.538462 GPa
Nombre(s) de pieza	Base_Solida_Servo1 Base_Solida_Servo2 Brazo_Servo_Soporte_2_3 Brazos_De_Servo2_A_3 Brazo_Servo3_Solido Brazo_Servo3_Solido2 Base_Solida_Servo5 Base_Solida_Servo5 Brazos_Servo5_A_6 Brazos_Servo5_A_6_Solido Base_Solida_Servo8 Servo8_Pieza_Linear Servo8_Tornillo Mini_soporte_sin_fin Mini_soporte_sin_fin	
Nombre	Plástico ABS	
General	Densidad de masa	1.06 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	20 MPa
	Resistencia máxima a tracción	29.6 MPa
Tensión	Módulo de Young	2.24 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.38 su
	Módulo cortante	0.811594 GPa
Nombre(s) de pieza	AX12AServo AX12AServo AX12AServo	

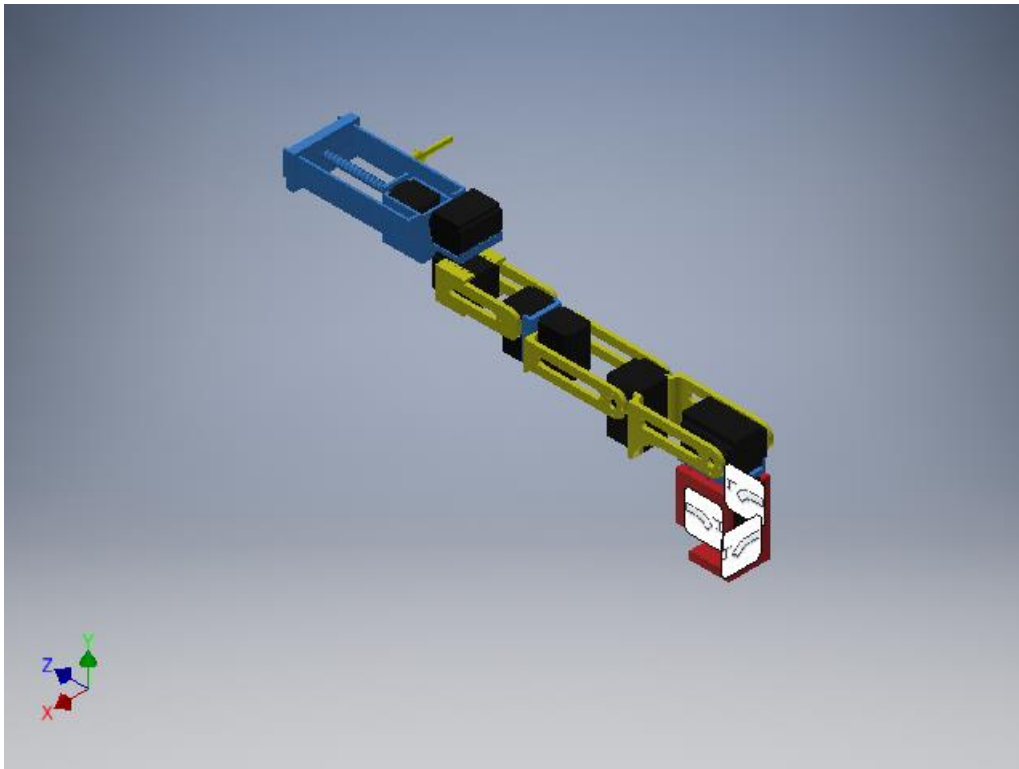
	AX12AServo AX12AServo
--	--------------------------

## Condiciones de funcionamiento

### Gravedad

Tipo de carga	Gravedad
Magnitud	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector X	9810.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Y	0.000 mm/s <sup>2</sup>
Vector Z	-0.000 mm/s <sup>2</sup>

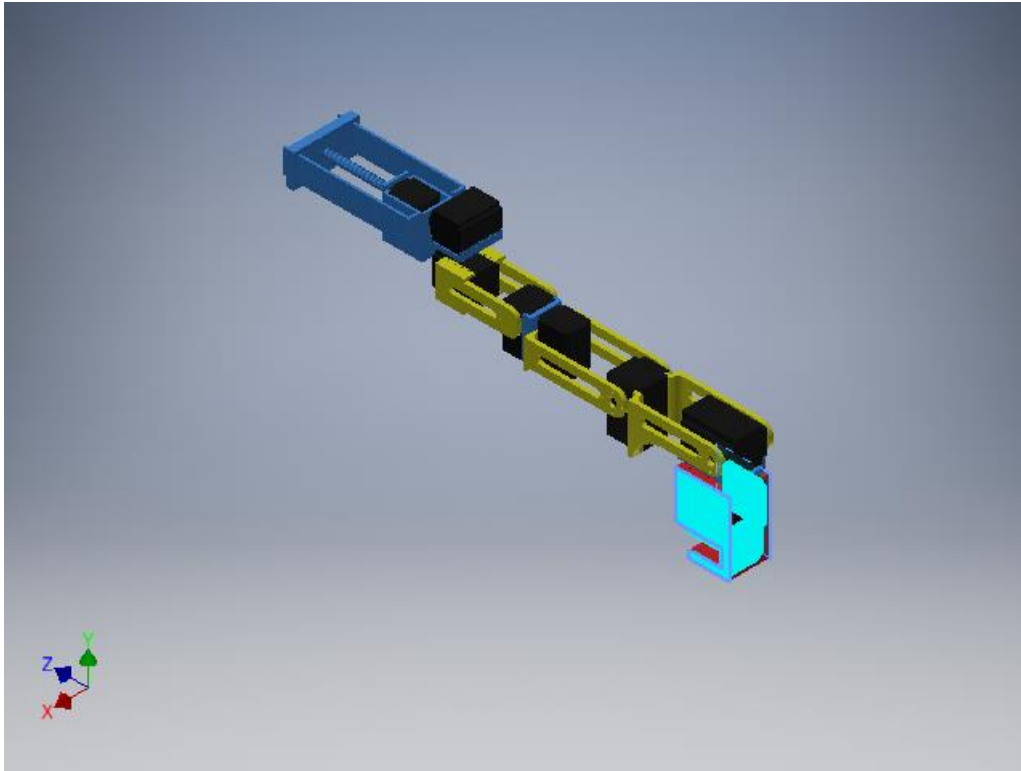
### Cara(s) seleccionada(s)



### Restricción fija:1

Tipo de restricción	Restricción fija
---------------------	------------------

### Cara(s) seleccionada(s)



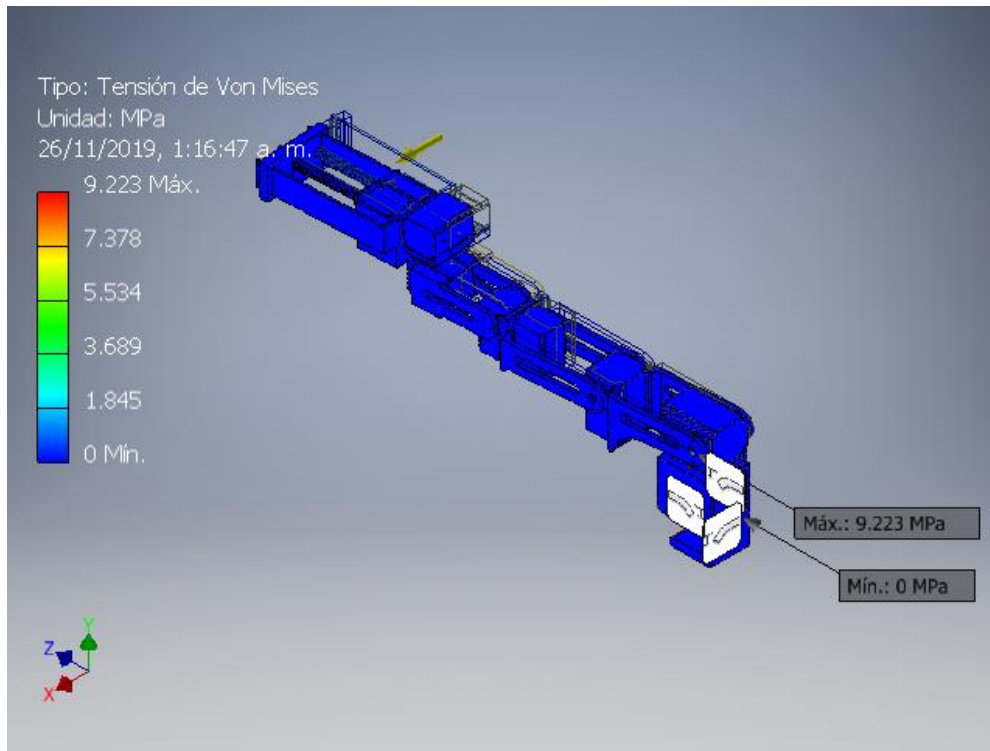
## Resultados

### Resumen de resultados

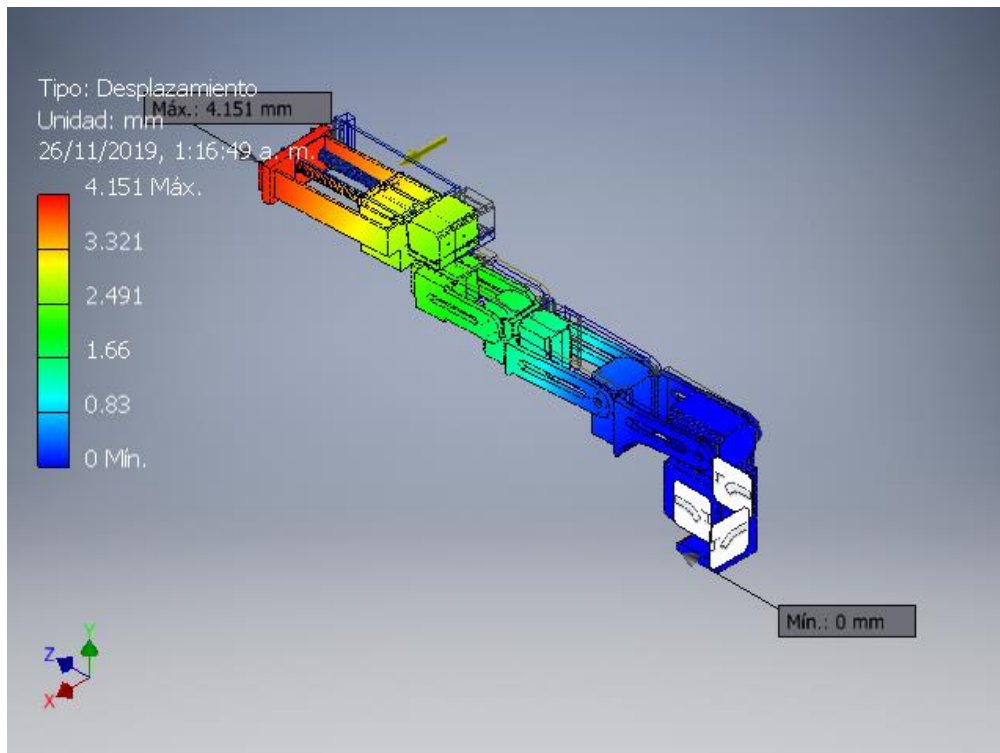
Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	954529 mm <sup>3</sup>	
Masa	1.1545 kg	
Tensión de Von Mises	0.000000000528255 MPa	9.22306 MPa
Desplazamiento	0 mm	4.15086 mm
Coficiente de seguridad	7.69616 su	15 su
Deformación equivalente	0.000000000000392436 su	0.00794088 su
Presión de contacto	0 MPa	4.421 MPa

## Figuras

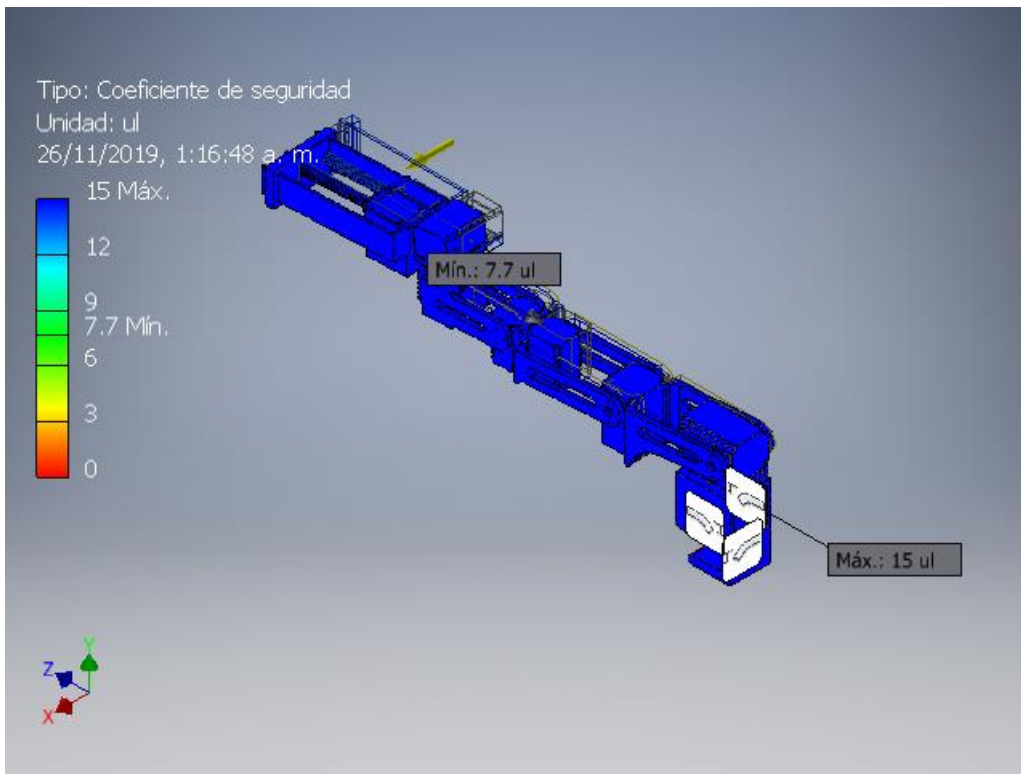
### Tensión de Von Mises



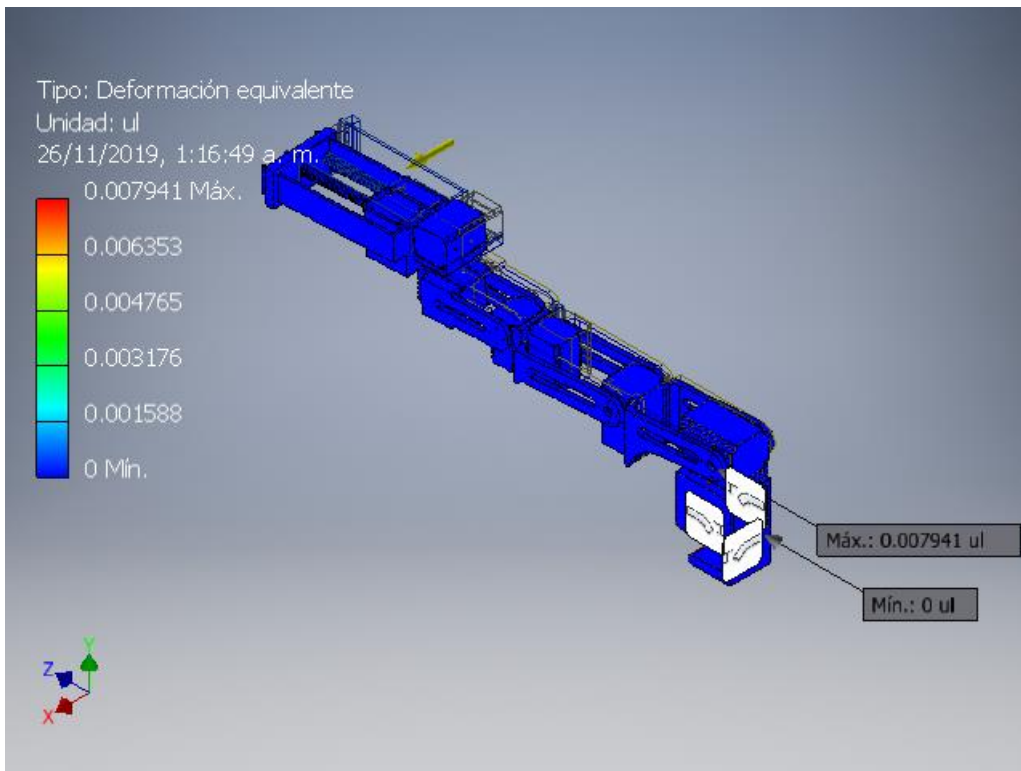
### Desplazamiento



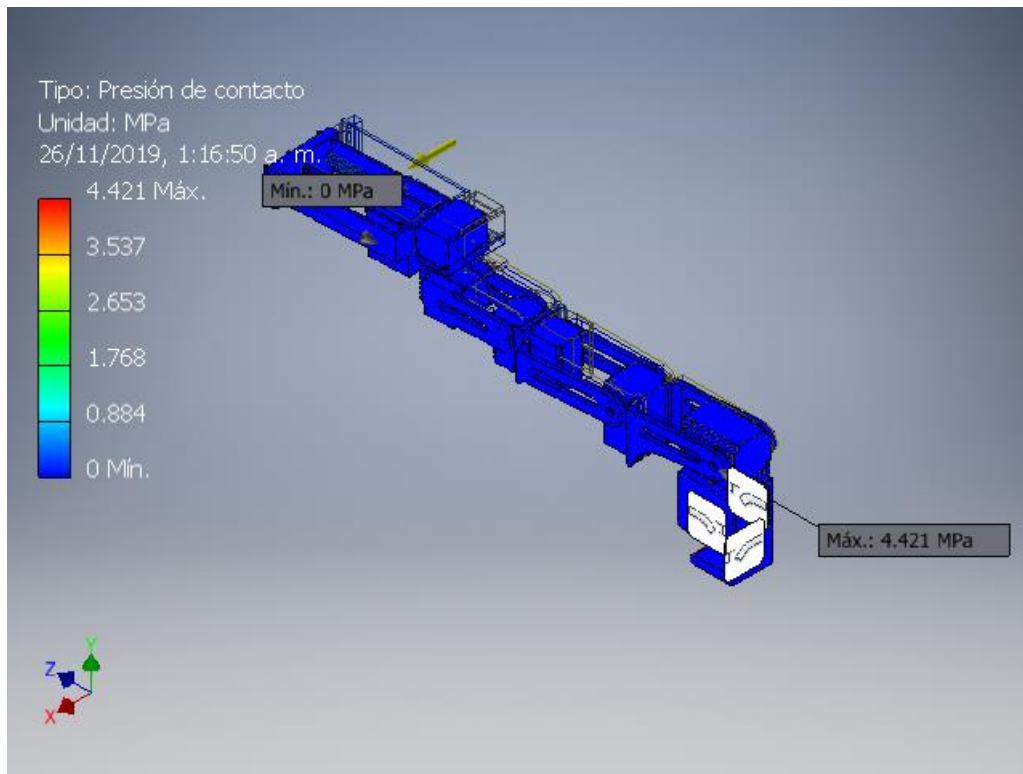
### Coefficiente de seguridad



### Deformación equivalente



## Presión de contacto



C:\Users\Didier\Desktop\Proyecto Humana - cuarta iteracion\Diseño\_Brazo\Prototipo4\_Analisis.iam

