

**DISEÑO DE UN BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO PARA
EXPERIMENTACIÓN EN LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE
PRINCIPAL**

Cristian Ricardo Durango Fonseca

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Mecánica
División de Ingenierías
Bogotá D.C.
2022**

**DISEÑO DE UN BRAZO ROBÓTICO ARTICULADO PARA
EXPERIMENTACIÓN EN LA UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SEDE
PRINCIPAL**

Cristian Ricardo Durango Fonseca

Cod. 2220736

**Trabajo de grado en la modalidad de solución de un
problema de Ingeniería y optar al título de Ingeniero Mecánico.**

DIRECTOR

Ing. Johanny Franchesco Niño Fonseca

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Mecánica
División de Ingenierías
2022**

Tabla de contenido

Tabla de contenido	3
Listado de imágenes	5
Listado de tablas	7
1. RESUMEN	8
2. INTRODUCCIÓN	9
3. ESTADO DEL ARTE	10
4. OBJETIVOS	12
5. DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO	13
5.1. Diseño conceptual	13
5.1.1. Necesidades del cliente:	13
5.1.2. Especificaciones de ingeniería	14
5.2. Evaluación de alternativas:	15
5.2.1. Selección de morfología del robot	15
5.2.1.1. Tipos de configuración estructura mecánica	15
5.2.1.2. Comparación entre configuraciones morfológicas	16
5.2.1.3. Benchmarking	17
5.2.2. Diferentes tipos de articulaciones	18
5.2.3. Elección de actuadores	18
5.2.4. Selección de materiales	19
5.3. Modelamiento CAD inicial	27
5.4. Ingeniería de detalle	26
5.4.1. Modelamiento matemático:	26
5.4.1.1. Movimiento de inercia por eslabón	31
5.4.1.2. Aceleración con una carga externa aplicada	31
5.4.1.3. Relación de engranajes	32
5.5. Obtención de geometrías	32
5.6. Procedimiento en cada segmento del brazo robótico:	34
5.6.1. Ejemplificación de proceso de diseño (Segmento AC)	34
5.6.1.1. Elección de materiales en cálculos	38
5.6.1.2. Elección de perfiles basados en proceso de fabricación	38
5.6.2. Elección de motores	39
5.6.3. Selección de las transmisiones	42

5.7.	Evolución de modelos	45
6.	OPTIMIZACION COMPUTACIONAL DEL DISEÑO	46
7.1.	Análisis de convergencia.....	46
7.2.	Primera iteración	46
7.3.	Segunda iteración	48
7.4.	Tercera iteración.....	50
7.5.	Cuarta iteración	52
7.6.	Quinta iteración.....	53
7.7.	Simulación en NX:	56
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
9.	LISTADO DE ANEXOS	65

Listado de imágenes

<i>Imagen 1. Ciclo de diseño de diseño.....</i>	<i>13</i>
<i>Imagen 3. Sección de trabajo para definir la longitud total.</i>	<i>27</i>
<i>Imagen 2. Cubo de trabajo del brazo articulado</i>	<i>27</i>
<i>Imagen 4. Sistema físico preliminar para cálculos en el brazo robótico articulado</i>	<i>28</i>
<i>Imagen 5. Esbozo de brazo robótico</i>	<i>26</i>
<i>Imagen 7. Modelo CAD de primera iteración de diseño.....</i>	<i>45</i>
<i>Imagen 8. Resultado de análisis por elementos finitos en la opción de estática estructural.</i>	<i>46</i>
<i>Imagen 9. Resultado de la primera iteración expuesta a fatiga hecho en elementos finitos.</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 10. Resultado de esfuerzos de la primera iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.....</i>	<i>47</i>
<i>Imagen 11. Resultado de deformación de la primera iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.....</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 12. Modelo CAD de la segunda iteración del brazo articulado.....</i>	<i>48</i>
<i>Imagen 13. Resultado del factor de seguridad de la segunda iteración expuesta a fatiga hecho en elementos finitos.....</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 14. Resultado de esfuerzos de la segunda iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.....</i>	<i>49</i>
<i>Imagen 15. Resultado de deformación de la segunda iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.....</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 16. Modelo CAD de la cuarta iteración del brazo robótico articulado.</i>	<i>50</i>
<i>Imagen 17. Resultado de resistencia a la fatiga de la tercera iteración expuesta a las cargas hecho en elementos finitos.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 18. Resultado de esfuerzos de la tercera iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 19. Resultado de simulación de vibraciones aleatorias</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 20. Modelo CAD de la cuarta iteración del brazo articulado.....</i>	<i>52</i>
<i>Imagen 21. Resultado del factor de seguridad expuesta a fatiga de la cuarta iteración hecho en elementos finitos.....</i>	<i>54</i>
<i>Imagen 22. Resultado de deformación de la cuarta iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.....</i>	<i>47</i>
<i>imagen 25 Análisis de vibraciones de la sexta iteración.....</i>	<i>48</i>

<i>Imagen 26 factor de seguridad de la sexta iteración.....</i>	<i>49</i>
<i>imagen 27 Análisis de vibraciones de la sexta iteración.....</i>	<i>50</i>
<i>imagen 28. Inserción de masa e inercia en simulación MCD.....</i>	<i>51</i>
<i>Imagen 29. Inserción de función de colisión.....</i>	<i>52</i>
<i>imagen 30. Inserción de juntas de bisagra.....</i>	<i>53</i>

Listado de tablas

<i>Tabla 1. Selección de grosores para el Aluminio.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 2. Diámetros y áreas para el Aluminio.</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 3. Volumen y cálculo de masa para el Aluminio.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4. Selección de grosores para los polímeros PEEK y ABS.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5. Diámetros y áreas de polímeros para impresión 3D.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 6. Volúmenes y masa de polímeros para impresión 3D.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 7. Selección de grosores para titanio.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 8. Diámetros y área del titanio</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 9. Volumen y masa del titanio.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 10. Selección de radios para aceros.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 11. Diámetros y áreas para aceros.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 12. Volúmenes y masa para acero</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 13. Cuadro comparativo de materiales.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 14. Cuadro pugh de comparación para definir proceso de fabricación.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 15. Cuadro pugh de comparación de sistemas de transmisión de potencia</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 16. Cuadro pugh de comparación de sistemas de transmisión de potencia</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 17. Presupuesto aproximado de piezas y materiales necesarios</i>	<i>60</i>

1. RESUMEN

En el siguiente trabajo se realiza el diseño de ingeniería de un brazo robótico de 6 grados de libertad con un alcance de un metro cubico de trabajo. El brazo cuenta con las características necesarias para su fabricación, construcción y operación.

El diseño se basa en las siguientes características: capacidad de carga, movimiento en un espacio definido, viabilidad de instalación de sensores o componentes y dificultad reducida para programación y operación del dispositivo. Estos atributos son suficientes para probar y caracterizar su uso experimental.

El trabajo estudia las necesidades y características de ingeniería del brazo robótico según los estudiantes de la Universidad Santo Tomás, posteriormente se realiza un modelo conceptual donde se aplica ingeniería de detalle para finalmente obtener un diseño, este tiene que considerar su fabricación, ensamblaje y armado. Finalmente, se comprobará sus limitaciones como sus capacidades atreves de softwares de simulación de tipo CAE (Computational Asist Engineering) y MCD (Mechatronics Concept Design).

2. INTRODUCCIÓN

Los distintos tipos de industria cada vez más apuestan por la automatización y robotización de los ambientes de producción debido a la revolución industrial, la producción en masa y la aparición de nuevas tecnologías (Santos, 2011). Estas tecnologías permiten potenciar aún más la capacidad de generar bienes como también de darles mayor valor añadido, esto ha presionado entre los estudiantes dentro de las universidades a obtener el conocimiento sobre el funcionamiento de los elementos ya descritos (Lamb, 2013).

Un elemento usado y extendido por todo el campo industrial son los brazos robóticos, ya que cuentan con gran versatilidad a la hora de realizar distintos trabajos. Esto da campo a internarse en el modo como este tipo de robots funciona mientras que a su vez se puede observar una interacción entre distintas áreas y carreras colaborando para generar un solo dispositivo.

Este proyecto pretende implementarse en la Universidad Santo Tomás, más específicamente en las actividades de las carreras afines como automatización (Diaz, 2018) y control (Duran y Arenas., 2016), estudio de conceptos mecánicos y el desarrollo de sistemas inteligentes (Villareal, 2019). Este brazo tiene la meta de ofrecer la capacidad de ayudar a entender las actividades mencionadas anteriormente y fomentar el desarrollo en diseño como también tecnologías (sensores, inteligencia artificial y sistemas complementarios) orientadas a este tipo de dispositivos (Salvucci, Kimura, Sehoon, hori., 2011).

Su función consiste en mover a través del espacio de trabajo cargas y herramientas, como también la intervención de múltiples disciplinas para el desarrollo de procesos de automatización y sistemas inteligentes. Esto proveerá un mejor entendimiento físico y técnico de los estudiantes de las carreras afines (mecánica, industrial, electrónica, etc.) (Santos, 2011).

3. ESTADO DEL ARTE

En 1938 H Roselund y W Polland construyen el primer brazo articulado de la historia, usado para la aplicación de pintura en spray, esto incorporó en las líneas de producción a los robots donde hasta entonces eran operadas por exclusivamente trabajadores humanos (Amaya, 2017).

En los años 50, después de los grandes cambios dados por la automatización y desarrollo de tecnologías electrónicas e hidráulicas permitieron crear un robot operado por solenoides, interruptores de fin de carrera y otros dispositivos hidráulicos vistos por primera vez en General Electric Co y General Mills (Gasparetto, Scalera., 2019), después, se incorpora el controlador digital modular que es el precursor de los sistemas de control automáticos.

Posteriormente, entre los años 60 y 70 son introducidas las referencias Roehampton y Edimburg en el mercado ya que, los brazos robóticos articulados comienzan a usar lenguaje computacional y a dejar de operar con actuadores hidráulicos, a su vez, la capacidad de carga de estos dispositivos aumenta considerablemente. (Gasparetto, Scalera., 2019) (Kolbert, Chavan, Rodriguez., 2017).

En los años 80 el robot desarrollado por IBM, el RS-1 ve la luz gracias a la incorporación de tecnologías como sensores y controles informáticos permitieron hacer robots más inteligente capaces de adaptarse a su entorno, esta capacidad les valió para dar inicio con líneas de montaje donde estas máquinas se encargarían de la manufactura integralmente y ser operadas desde la distancia de manera efectiva, (Bejczy, 1980), (Bae, Jin, Young, Chang, Ahn., 2017).

En la década de los 90 el cambio de filosofía de construcción de robots incorporo nuevas formas de fabricar estas máquinas haciéndolas cada vez más compactas, a su vez, la producción de robots con comportamientos más orgánicos (humanoides, mascotas robóticas, entre otros) como por ejemplo el modelo P-3 de Honda que es un robot con características humanas y el modelo ASIMO, (Bae, Jin, Young, Chang, Ahn., 2017) todos estos modelos modernos de robot poseen brazos robóticos articulados.

Desde los años 70 las empresas como KUKA, FANUC y ABB son reconocidas por desarrollar y distribuir diferentes tipos de brazos robóticos, usados frecuentemente para líneas de producción y trabajos donde la precisión es fundamental, esta característica le proporciona a los productos hechos o ensamblados por estas máquinas un mayor grado de calidad, superior y a un costo inferior a la mano de obra calificada para dichos estándares (Villareal, 2019).

Esto incentiva a las Universidades a acercarse a dicha tecnología, El MIT constantemente realiza y mejora diseños antiguos desde los años 80 (Reyes, 2011), (Crowder, 2006), (Antsaklis, 1997), (Bae, Jin, Young, Chang, Ahn., 2017) y sus estudios han desarrollado bases para complementar los diseños hechos por los estudiantes más antiguos. A su vez, la Universidad Santo Tomás ya ha diseñado brazos robóticos con características de control

remoto (Bejczy, 1980). Pero, actualmente no se ha construido algún diseño experimental propio de la Universidad, aunque ya se cuenta con modelos construidos por los estudiantes.

Los brazos robóticos articulados tienen una gran ventaja en la industria en donde se desarrolla la ingeniería mecánica, gracias a la versatilidad y adaptación al ambiente que otras morfologías de brazos robóticos carecen, este tipo de morfología funciona bien en sectores específicos de otras industrias pero en su gran mayoría los brazos articulados son la norma, los fabricantes tienen un largo catalogo y en su mayoría lo compone este tipo de robot (kuka tiene 1 robot lineal 1 scara y 1 delta 27 articulados [KUKA, 2022]), (fanuc tiene 7 scaras , 5 delta y 30 articulados[FANUC, 2022]) y faudetec (3 articulados[FAUDETTEC, 2022]), ABB (1 lineal, 4 scara, 3 delta y 35 articulados[ABB, 2022]) dobot (12 articulados 1 scara[DOBOT]) UR (5 articulados[UR, 2022])

4. OBJETIVOS

General:

- diseñar y simular un brazo robótico articulado de 6 GDL capaz de trasladar cargas de hasta 2 kg en un volumen efectivo de un metro cubico orientado a validar sistemas de control inteligente.

Específicos:

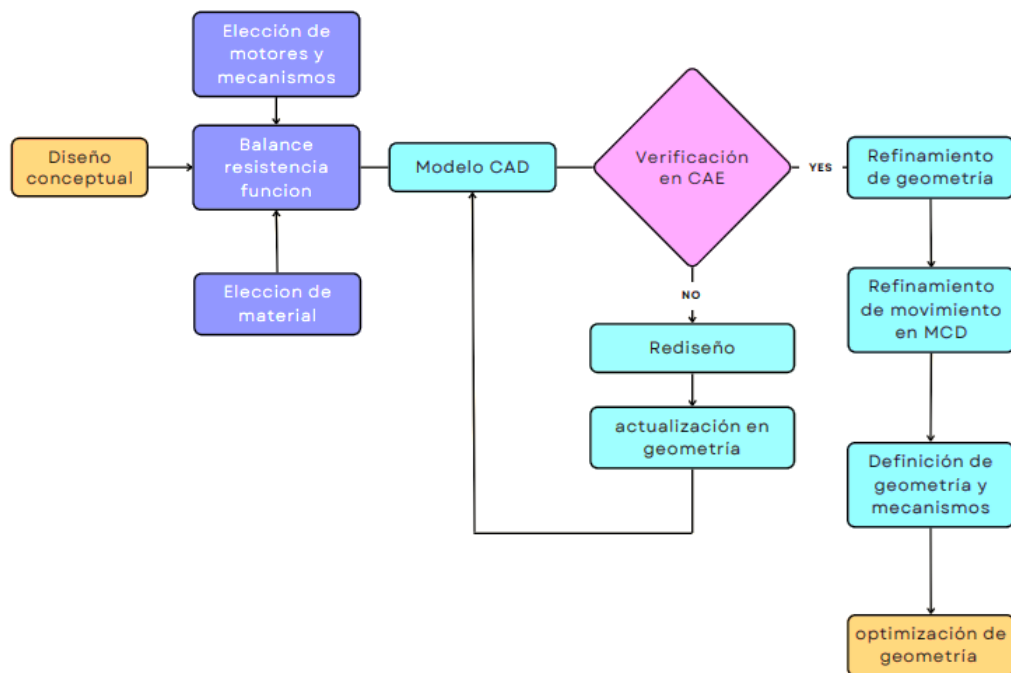
- determinar los parámetros de diseño del brazo robótico que permita validar sistemas de control inteligente.
- Realizar la ingeniería de detalle del brazo robótico que permita validar diferentes sistemas de control.
- Validar el funcionamiento del brazo robótico mediante la simulación del modelo en software MCD y CAE.

5. DISEÑO DEL BRAZO ROBÓTICO

5.1. Diseño conceptual

Para iniciar el proyecto se estudian las necesidades a solucionar, traduciéndolas a requerimientos de ingeniería donde pasa al desarrollo de un diseño conceptual y finalmente se refina el proceso con la aplicación de ingeniería de detalle de acuerdo a la metodología (Norton, 2011). Este proceso finaliza con una constante redefinición y rediseño de especificaciones para obtener el mejor resultado posible apoyado en el uso de software de ingeniería CAE y MCD como se muestra con el diagrama de flujo a continuación:

Imagen 1. Ciclo de diseño de diseño



5.1.1. Necesidades del cliente:

A continuación, las necesidades del cliente se obtienen y analizan en especificaciones de diseño.

Los requerimientos iniciales son los siguientes:

- Capacidad de carga de al menos 2 kg
- Espacio de trabajo de un metro cubico
- Capacidad de funcionar en las instalaciones de la Universidad Santo Tomás en los laboratorios ETM (24 – 48 V DC)
- Facilidad para incorporar mecanismos de control
- Holgada capacidad de movimiento fluido y predecible

- Capacidad de mantener posiciones sin sacrificar precisión
- Acceso a arreglos y cambios en las funciones y mecanismos
- Espacio de ensamble, movimiento y manejo de cables, piezas, entre otros elementos.
- Necesidad de un espacio y anclaje o soporte definido.
- Poseer una modularidad suficiente para seccionar trabajos como ensamble y construcción.

5.1.2. Especificaciones de ingeniería

A continuación, se establecen las suposiciones de diseño:

Materiales: el material de construcción debe tener características tales como:

- la capacidad de sostener carga y estructura.
- Resistencia ante las vibraciones.
- Maquinabilidad que pueda realizarse dentro de las instalaciones de la Universidad Santo Tomás o dentro de la ciudad.
- Precio por volumen accesible para definir un presupuesto.
- Realizable con materiales y perfiles de fácil acceso.
- Reconocer ventajas y desventajas de los procesos de los materiales a comparar.
- Comprender las características propias de ciertos materiales y sus posibles restricciones de uso y combinación.

Mecanismos: las principales barreras para la construcción de ciertas máquinas pueden ser los mecanismos, por esta razón se tienen en cuenta los siguientes puntos para evaluar:

- Capacidad de realizar movimientos fluidos y predecibles
- Capacidad de mantener posiciones sin sacrificar precisión
- Incorporación de motores de control digital
- Mecanismos de transferencia de potencia compactos y eficientes.
- Este brazo robótico está enfocado al estudio de sistemas de control inteligente, a su vez moverse con sistemas convencionales de control por lo tanto debe basar su funcionamiento en circuitos y mecanismos acoplables entre máquina-controlador tales como motores, sensores y actuadores digitales.

Ensamblaje: algunos puntos del ensamble se tienen en cuenta sobre todo a la hora de realizar la ingeniería de detalle, ya que una máquina que no es posible ensamblar no funciona:

- Modularidad para realizar el ensamble
- Asignar espacios para dar cabida y un ensamble metodológico para el brazo robótico.
- Capacidad de corrección desperfectos de mecanismos y piezas.
- Acceso a arreglos y cambios en las funciones y mecanismos
- Espacio de ensamble, movimiento y manejo de cables, piezas, entre otros elementos.
- Identificar la combinación de materiales e identificar barreras o distribución de dichos materiales.

5.2. Evaluación de alternativas:

A continuación, se comparan y eligen materiales, mecanismos y procesos para el diseño del brazo robótico articulado:

5.2.1. Selección de morfología del robot

Los brazos robóticos cuentan con distintas características dependiendo de su morfología, por esto se han desarrollado una larga variedad de brazos ofrecen ventajas y desventajas en algunos casos y a su vez especialidades en ciertos campos. A continuación, se exponen los tipos configuraciones morfológicas:

5.2.1.1. Tipos de configuración estructura mecánica

Existe un enorme número de configuración de robots posibles, sin embargo, en la industria son usadas cinco comúnmente (polar, cilíndrico, cartesiano, angular y scara).

Configuraciones clásicas

- **Cartesiana:** El posicionamiento es realizado en el espacio de trabajo mediante articulaciones prismáticas. Este posee 3 grados de libertad relacionados con el movimiento en los 3 ejes cartesianos (X, Y y Z).
- **Cilíndrica:** Esta configuración rota en la base y se mueve en una articulación prismática en las direcciones restantes. Este posee 3 o 4 grados de libertad relacionados con el movimiento en los 3 ejes cilíndricos (Θ , r y Z).
- **Esférica o polar:** Esta configuración usa dos juntas de rotación y una articulación prismática en la dirección radial. Este posee 3 grados de libertad relacionados con el movimiento en los 3 ejes esféricos (Θ , β y r).
- **Angular:** o de brazo articulado, esta configuración consiste en 3 articulaciones donde 2 realizan movimiento angular y la última de rotación el volumen de trabajo es esférico y es la configuración más similar a la humana, la cantidad de grados de libertad puede variar entre 3 o más grados de libertad (Θ , β y α).

Configuración no clásica

- **SCARA:** La configuración puede ser similar a la cilíndrica, aunque el radio y la rotación es obtenida por uno o dos eslabones, este realiza movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos o más articulaciones rotacionales, posee 3 grados de libertad.

5.2.1.2. Comparación entre configuraciones morfológicas

La configuración morfológica se determina enfocado al mercado y el alineamiento a las funciones que se definen para el control inteligente que está realizándose en la industria como la manipulación de objetos.

- Ventajas morfológicas: se refiere a las capacidades y ventajas que ofrece la morfología para realizar distintas tareas (10 es aquel con más ventajas útiles en el área y 1 el de menos) (Crowder, 2006).
- Flexibilidad de uso: Se interpreta como la capacidad de usarse en distintos ambientes (10 es aquel con mayor flexibilidad y 1 el de menor) (Gonzales, Fernández, Sepúlveda 2020).
- Preferencia por los fabricantes: Se refiere a que tan frecuente es su uso o venta entre los distintos fabricantes, en este caso se comparó entre los fabricantes más reconocidos (10 es aquel con mayor preferencia y 1 el de menor) (ABB, FANUC, KUKA, UR, DOBOT; 2022).
- Dificultad de control: se refiere a la dificultad de calcular y control el robot (10 el más sencillo de manejar y 1 el más complejo) (Crowder, 2006).
- Alineamiento: Se refiere a la capacidad de alinearse con el desarrollo de controles inteligentes (10 es aquel con mayor alineamiento industrial y 1 el de menor).
- Enfoque industrial: Se refiere a la facilidad e implementarse nuevas tecnologías en la industria donde se involucre estas morfologías (como impresión en 3D, manejo por inteligencia artificial, realidad aumentada o manejo remoto en tiempo real) (10 mayor uso en la industria y 1 el de menor) (Grau, Indri, Lo Bello, 2017).
- Dificultad de elaboración: Se trata de la dificultad de construcción y diseño satisfactorio (10 es aquel con menor dificultad y 1 el de mayor) (Crowder, 2006).

Tabla 1. Cuadro comparativo entre configuraciones morfológicas

	Cartesianos	Cilíndricos	Articulados	polares	SCARA
Ventajas morfológicas	3	4	10	7	6
Flexibilidad	1	3	8	10	8
Preferencia	7	3	10	2	5
Dificultad de control	10	7	3	3	8
Alineamiento	4	6	8	10	3
Enfoque industrial	8	6	9	6	7
Dificultad de elaboración	10	10	10	6	8
Total	43	39	58	44	45

5.2.1.3. Benchmarking

Vale aclara que hay morfologías usadas más en ciertas industrias que en otras, la decisión también radicó en su uso en materia de la ingeniería mecánica a nivel continental. Así como se planteó en el alineamiento, los robots cardinales tienen una gran dispersión en el mundo gracias a la impresión 3D (El-Sayengh, Romdhane, Manjikian., 2020), los robots SCARA también tienen un uso intensivo en la manipulación de microchips por su facilidad en tareas pick & place (Shariatee, Akbarzadeh, mousavi., 2014):

- KUKA (KUKA, 2022):

- 1 robot lineal
- 1 robot SCARA
- 27 robots articulados

El 90% de los productos de este fabricante son brazos robóticos articulados, el 3% son lineales y 3% son SCARA

- FANUC (FANUC, 2022):

- 7 robots SCARA
- 30 robots articulados

El 71% de los productos de este fabricante son brazos robóticos articulados y el 17% son SCARA.

- ABB (ABB, 2022):

- 1 robot lineal
- 4 robots SCARA
- 35 robots articulados

El 81% de los productos de este fabricante son brazos robóticos articulados, el 9% son SCARA y el resto son lineales.

- DOBOT (DOBOT, 2022):

- 1 robot SCARA
- 12 robots articulados

El 92% de los productos de este fabricante son brazos robóticos articulados y el resto son SCARA

- UR (UR, 2022):

- 5 robots articulados

El 100% de los productos de este fabricante son brazos robóticos articulados.

los brazos robóticos articulados son usados en estos y más campos siendo el 83% de elementos en venta de los fabricantes más reconocidos.

5.2.2. Diferentes tipos de articulaciones

Hay 3 tipos de articulaciones que no son del todo compatibles para la función que puede complicar su fabricación, afectar la capacidad adaptación y alterar la predicción del trazado. Por lo tanto, se descartarán de inmediato:

- Articulación esférica: provee 3 GDL rotando en 3 distintos ejes en una sola articulación, sin embargo, queda descartada debido a la complejidad en fabricación y control.
- Articulación cilíndrica: Provee 2 GDL rotando en el eje paralelo en una sola articulación, sin embargo, requiere un soporte por el cual transportar el movimiento perpendicular, modifica la longitud del manipulador e interfiere en la compactibilidad del manipular.
- Articulación prismática: Solo provee un GDL sin ningún tipo de movimiento rotacional en una articulación, esta como característica modifica la longitud del manipulador por lo que no esta considerada.

El resto de las articulaciones son:

- Articulación de tornillo: provee un GDL en movimiento paralelo al eje de un tornillo.
- Articulación planar: Provee 2 GDL uno rotando perpendicularmente al eje del plano y otro con un movimiento paralelo al eje del plano.

En consideración el tipo de articulación mayoritariamente usada por los fabricantes (100% en el benchmarking) es la articulación rotacional.

- Articulación rotacional: Provee 1 GDL en una articulación, induce un movimiento rotacional.

La articulación rotacional es elegida ya que es la mas usada en toda la industria, desde la estructura SCARA como la angular usan en mayor parte este tipo de articulación. A razón de trasladarse lo mas fielmente posible a la industria se usa este tipo de articulación.

5.2.3. Elección de actuadores

Los actuadores son aquellos elementos que generan el movimiento mecánico ya sea transformando energía neumática o eléctrica y se diferencian del siguiente modo:

- Los actuadores neumáticos cuentan con la capacidad de liberar gran cantidad de energía y de proveer un gran torque de manera casi inmediata, pero carecen de precisión debido a la compactibilidad del aire y dificultad para el control continuo. Esta desventaja lo hace un actuador no recomendado para aplicarse en el manipulador.
- Los actuadores hidráulicos son similares a los acusadores neumáticos, a diferencia de proveer mayor energía como también torque, poseer mayor precisión y facilidad de

control, sin embargo, la necesidad de una instalación especial, su susceptibilidad a las fugas y elevado precio no lo hace viable para incorporarse en el manipulador.

- Los actuadores eléctricos en cambio son mas eficientes y a su vez mas consistentes con la cantidad de energía y torque que entregan (aunque proveen menos energía mecánica y torque frente a los otros manipuladores), razones que los hacen elementos preferidos para aplicaciones como las que se usan en manipuladores.

5.2.4. Selección de materiales

Cálculo de esfuerzos

Los esfuerzos son dependientes de la geometría y fuerzas internas del cuerpo a analizar, en este caso:

- El peso de los motores como de los eslabones es considerado en la obtención de esfuerzos.
- Las cargas dinámicas son mayores a las estáticas, por lo tanto, se realizan los cálculos con estas fuerzas.

Esfuerzos permisibles y factores de seguridad usados.

El diseño cuenta con consideraciones aparte de su resistencia mecánica, la elección de material es elegida a partir de la metodología de Norton (2011), quien expone los siguientes aspectos:

- Datos de las propiedades del material obtenidos con pruebas
 - Están disponibles los datos de prueba del material aceptablemente representativo (3).
- Condiciones ambientales donde se utilizará
 - Son idénticas a las condiciones de las pruebas del material (1.3).
- Modelos analíticos de carga y esfuerzo
 - Los modelos representan aproximadamente el sistema (3).

$$N_{ductil} \cong MAX (F1, F2, F3) \quad (1)$$

Los factores de seguridad fueron elegidos siguiendo el procedimiento en Diseño de máquinas de R. Norton (2011), de este modo se determinó como factor de seguridad final de 3.

El punto de partida considera que dicho elemento es estático, esta suposición se aparta de la realidad, por lo tanto, otro elemento a considerar es la fatiga. Continuando con la metodología (Norton, 2011) se toman las siguientes características:

- Material: Aluminio 1xxx (Davis, 2001).
- Esfuerzo último: 110 MPa (Davis, 2001).
- Factor C de carga: elemento a flexión (1). (Norton, 2011)
- Factor C de tamaño: dimensión transversal (0.6). (Norton, 2011)
- Factor C de superficie: Acabado superficial (0.2). (Norton, 2011)
- Factor C de temperatura: Alcance de temperatura en la estructura inferior a 40 °C (1). (Norton, 2011)
- Factor C de Confiabilidad: Factor de seguridad que admite soportar dichas cargas a fatiga en un 90% (0.897). (Norton, 2011)

Finalmente, el esfuerzo máximo por fatiga es el siguiente.

$$S_e = 23.9 \text{ MPa} \quad (2)$$

$$S_{perm} = S_e \text{ corregido} = 4.7 \text{ MPa} \quad (3)$$

Factor de seguridad general:

Finalmente, el factor de seguridad debido a la fatiga es más alto al factor de diseño inicial, por lo tanto, se trabajará con dicho factor y esfuerzo (Norton, 2011).

$$Nt = \frac{\sigma_{nom}}{S_e \text{ corregido}} = 14.9 \quad (4)$$

Basado en los esfuerzos permisivos definidos pueden traducirse finalmente a configuraciones de geometrías y grosores, elementos de entrada se pueden trasladar a la herramienta de Office Excel. Considerando el peso e inercia de los motores, así como de los eslabones la función de la herramienta es ofrecer un estimado de la cantidad de masa, esfuerzos, áreas y volúmenes para iniciar evaluar las alternativas más óptima. (Norton, 2011).

En la tabla 1 puede verse prueba de perfiles circulares y grosor de paredes para el aluminio (1xxx aluminio sin aleaciones y 2xxx aluminio aleado principalmente de cobre). Este método de selección consiste en obtener una imagen clara de los diámetros exteriores (tabla 2), áreas transversales (tabla 2), volúmenes (tabla 3) y combinando este último factor con la densidad es posible obtener una masa nominal (tabla 3).

Tabla 1. Selección de grosores para el Aluminio.

Sección	Aluminio	1xxx ¹		2xxx ²
	σ_{per} (MPa)	Grosor (mm)	σ_{per} (MPa)	Grosor (mm)
F	4.70	2.325	2.53	0.440
E	4.70	3.284	1.23	0.429
D	4.70	4.020	1.54	0.438
C	4.70	4.632	1.79	0.401
B	--	--	--	--
A	4.70	5.237	2.60	1.000

Tabla 2. Diámetros y áreas para el Aluminio.

Sección	Diámetros			
	1xxx		4xxx	
EF	104.35	mm	100.88	mm
DE	106.57	mm	100.86	mm
CD	108.04	mm	100.88	mm
AC	110.47	mm	102.00	mm
	Áreas			
	1xxx		4xxx	
EF	0.01	m ²	7.99E-03	m ²
DE	0.01	m ²	8.05E-03	m ²
CD	0.01	m ²	7.99E-03	m ²
AC	0.01	m ²	7.98E-03	m ²

Tabla 3. Volumen y cálculo de masa para el Aluminio

Sección	Volumen			
	1xxx		4xxx	
EF	8.60E-04	m ³	7.99E-04	m ³
DE	2.41E-03	m ³	2.17E-03	m ³
CD	3.21E-03	m ³	2.80E-03	m ³
AC	2.72E-03	m ³	2.31E-03	m ³
	Masa			
	1xxx		4xxx	
EF	2.3	kg	2.2	kg
DE	6.5	kg	5.9	kg
CD	8.7	kg	7.6	kg
AC	7.3	kg	6.2	kg
	24.8	kg	21.8	kg

¹ Aluminios sin aleaciones Norma ASM (American Society for Metals) (Davis 2001)

² Aluminios con aleaciones principalmente de cobre, Norma ASM (Davis 2001)

Como el aluminio, los polímeros PEEK y ABS para impresión en 3D, se comparan las configuraciones geométricas en las tablas 4,5 y 6.

Tabla 4. Selección de grosores para los polímeros PEEK y ABS

Sección	Polímeros	PEEK ³		ABS ⁴
	σ (MPa)	Radio (mm)	σ (MPa)	Radio (mm)
F	1.60	6.518	0.550	16.731
E	1.60	9.033	0.550	22.240
D	1.60	10.897	0.550	26.089
C	1.60	12.410	0.550	29.096
B	--	--	--	--
A	1.60	13.869	0.550	31.911

Tabla 5. Diámetros y áreas de polímeros para impresión 3D

Sección	Diámetros			
	PEEK		ABS	
EF	113.04	m	133.46	m
DE	118.07	m	144.48	m
CD	121.79	m	152.18	m
AC	127.74	m	163.82	m
	Área			
	PEEK		ABS	
EF	1.00E-02	m ²	1.40E-02	m ²
DE	1.09E-02	m ²	1.64E-02	m ²
CD	1.17E-02	m ²	1.82E-02	m ²
AC	1.22E-02	m ²	1.97E-02	m ²

Tabla 6. Volúmenes y masa de polímeros para impresión 3D

Sección	Volumen			
	PEEK		ABS	
EF	1.00E-03	m ³	1.40E-03	m ³
DE	2.96E-03	m ³	4.43E-03	m ³
CD	4.08E-03	m ³	6.37E-03	m ³
AC	3.55E-03	m ³	5.70E-03	m ³
	Masa			
	PEEK		ABS	
EF	1.5	kg	2.0	kg
DE	4.3	kg	6.5	kg
CD	6.0	kg	9.3	kg
AC	5.2	kg	8.3	kg
	16.9	kg	26.1	kg

³ Filamento PEEK 3DXSTAT ESD (3DXTECH additive manufacturing, 2022)

⁴ Filamento ABS Extrafill “transparent” (Fillamentum additive polymers, 2022)

Las aleaciones de titanio se comparan sus geometrías volúmenes y masas en las tablas 7, 8 y 9.

Tabla 7. Selección de grosores para titanio.

Sección	Titanio	KS40 ⁵		KS50 ⁶
	σ (MPa)	Grosor (mm)	σ (MPa)	Grosor (mm)
F	18.4	0.604	21.0	0.531
E	16.7	0.950	19.0	0.835
D	14.7	1.323	16.7	1.164
C	14.5	1.550	16.5	1.364
B	--	--	--	--
A	14.4	1.776	16.4	1.564

Tabla 8. Diámetros y área del titanio

Sección	Diámetro			
	KS40		KS50	
EF	101.28	mm	101.06	m
DE	101.90	mm	101.67	m
CD	102.65	mm	102.33	m
AC	103.55	mm	103.13	m
	Área			
	KS40		KS50	
EF	8.04E-03	m ²	8.02E-03	m ²
DE	8.16E-03	m ²	8.12E-03	m ²
CD	8.28E-03	m ²	8.22E-03	m ²
AC	8.35E-03	m ²	8.29E-03	m ²

Tabla 9. Volumen y masa del titanio.

Sección	Volumen			
	KS40		KS50	
EF	8.04E-04	m ³	8.02E-04	m ³
DE	2.20E-03	m ³	2.19E-03	m ³
CD	2.90E-03	m ³	2.88E-03	m ³
AC	2.42E-03	m ³	2.40E-03	m ³
	Masa			
	KS40		KS50	
EF	3.6	kg	3.6	kg
DE	9.9	kg	9.9	kg
CD	13.1	kg	13.0	kg
AC	10.9	kg	10.8	kg
	37.5	kg	37.3	kg

⁵ Titanio de Kobe Steel pure titanium, ASTM Gr.1 (KOBELCO, 2000)

⁶ Titanio de Kobe Steel pure titanium, ASTM Gr.1 (KOBELCO, 2000)

Por último, los aceros se comparan sus grosores, áreas, volúmenes y masas en las tablas 10,11 y 12.

Tabla 10. Selección de radios para aceros.

Sección	Acero	1050 ⁷		4027 ⁸
	σ (MPa)	Grosor (mm)	σ (MPa)	Grosor (mm)
F	27.0	0.413	27.0	0.413
E	27.0	0.588	27.0	0.588
D	27.0	0.725	27.0	0.725
C	27.0	0.840	27.0	0.840
B	--	--	--	--
A	27.0	0.955	27.0	0.955

Tabla 11. Diámetros y áreas para aceros.

Sección	Diámetro			
	1050		4027	
EF	100.81	m	100.83	m
DE	101.18	m	101.18	m
CD	101.45	m	101.45	m
AC	101.91	m	101.91	m
	Área			
	1050		4027	
EF	2.00E-03	m ²	2.00E-03	m ²
DE	2.01E-03	m ²	2.01E-03	m ²
CD	2.02E-03	m ²	2.02E-03	m ²
AC	2.03E-03	m ²	2.03E-03	m ²

Tabla 12. Volúmenes y masa para acero

Sección	Volumen			
	1050		4027	
EF	2.00E-04	m ³	2.00E-04	m ³
DE	5.43E-04	m ³	5.43E-04	m ³
CD	7.07E-04	m ³	7.07E-04	m ³
AC	5.89E-04	m ³	5.89E-04	m ³
	Masa			
	1050		4027	
EF	1.6	kg	1.6	kg
DE	4.2	kg	4.2	kg
CD	5.5	kg	5.5	kg
AC	4.6	kg	4.6	kg
	15.9	kg	15.9	kg

⁷ Acero al carbono, norma SAE (SAE, 1995)

⁸ Acero al molibdeno, norma SAE (SAE, 1995)

El grosor del material es fundamental para el análisis de resistencia, en función de esta característica es posible mantener o descartar materiales y limitar condiciones de falla. La mitad de los materiales es capaz de resistir las cargas sin problema, pero el grosor en estos materiales está por debajo del milímetro y la fatiga es un proceso como se puede ver posteriormente más probable.

A continuación, se usan y verifican los valores a través de simulación CAE en ANSYS:

La masa no será considerada como definitiva, ya que no se está teniendo en cuenta la cantidad de material usado en juntas, mecanismos entre otros factores que se pueden sumar. Este valor se determinará de manera iterativa hasta alcanzar un valor consistente con la realidad.

La herramienta de CAD facilita la obtención final de volumen y masa, considerando también motores y mecanismos así se logró obtener un aproximado iterado cálculo con un factor de corrección en la potencia.

La obtención del diseño requiere conocer el comportamiento, fiabilidad, transformación, acceso y posibles restricciones debido a características propias de los materiales.

De acuerdo a la consulta de distintos catálogos, fabricantes y publicaciones científicas la comparación se realizó de la siguiente manera:

- Densidad: este aspecto refiere a la masa por unidad de volumen y a su vez un medio para determinar que material es más apropiado ya que una razón de selección de motores o mecanismos depende del peso, además, de la resistencia mecánica. Como se puede ver en las tablas 3, 6, 9, 12.
- Resistencia a la tensión: aspecto se refiere a la capacidad de los eslabones que componen al robot (como se puede ver en las tablas 1, 4, 7, 10) para soportar las cargas.
- Tipo de transformación: considera la capacidad e instalaciones de la Universidad Santo Tomás para transformar las materias elegidas en el taller de Ingeniería Mecánica, por lo que se añadirán puntos en la capacidad de materias que puedan transformarse.
- El acceso: considera la capacidad que tienen los estudiantes de la Universidad Santo Tomás de adquirir dicho material, cotizando de distintas fuentes y el medio de adquisición.
- Restricciones intrínsecas: los materiales poseen distintas características y estas pueden afectar directamente la capacidad de usar y combinar otros elementos, lo que arriesga el diseño y los factores de seguridad.
 - El PEEK cuenta con muchos problemas de compatibilidad y estabilidad cuando tiene contacto con metales (K. Manjunath, B. Aruna, M. Kulkarni; 2014), lo que puede perjudicar la vida útil de partes en dicha situación. En el caso de la impresión en 3D, la impresora en la universidad tiene

inconvenientes para imprimir objetos muy grandes, los materiales apropiados pueden tener costos elevados, el acabado no es parejo a lo largo del sistema.

- Titanio cuenta con muchas ventajas sobre los demás materiales, la resistencia es el factor que más puede resaltar y su dureza como flexibilidad no lo hace el material idóneo para la aplicación (en este caso reducida a movimiento de cargas muy pequeñas.)
- El posible desgaste corrosivo en el acero y aluminio es una razón descarte de estos dos materiales.
- El ensamblaje: refiere al estudio de deformación y capacidad de ajustarse con otros materiales, en su defecto materiales muy rígidos o menos maleables afectaran este factor.
- La compactibilidad es una característica considerada para ofrecer la facilidad de almacenamiento y trabajo.
- El precio de compra debe ser acorde al aporte que pueda ofrecer el material, sí ofrece una capacidad muy holgada se descarta por no aprovecharse lo suficiente, como también se considera el valor referente a su transformación.

Para definir una decisión se definirá con un sistema de comparación pugh donde 10 es el valor más alto y 1 el más bajo, puesto en la tabla número 13.

Tabla 23. Cuadro comparativo de materiales

Características\Material	Acero	Aluminio	Polímeros	Titanio
Densidad	5	7	9	3
Transformación	8	8	10	3
Acceso	7	7	7	2
Restricciones intrínsecas	8	7	5	9
Ensamblaje	6	8	6	7
Resistencia mecánica	8	7	6	10
Compactibilidad	2	5	3	10
Precio	6	6	5	1
Total	50	55	51	45

5.3. Modelamiento CAD inicial

A continuación, se eligen las características preliminares para iniciar con el diseño del brazo robótico:

El brazo articulado tiene un alcance de media esfera por lo tanto el cubo de trabajo debe entrar en dicho espacio. Dividido en 4 sectores este ocupara un espacio entre 500 mm de ancho y largo, 1000 mm de alto, como resultado la distancia es de 1224 mm en total (Lt).

El brazo robótico debe extenderse a una longitud que le permita alcanzar las secciones delimitantes del espacio de trabajo, a su vez se debe ceder espacio para hacer uso de herramientas o acoples.

Imagen 2. Cubo de trabajo del brazo articulado

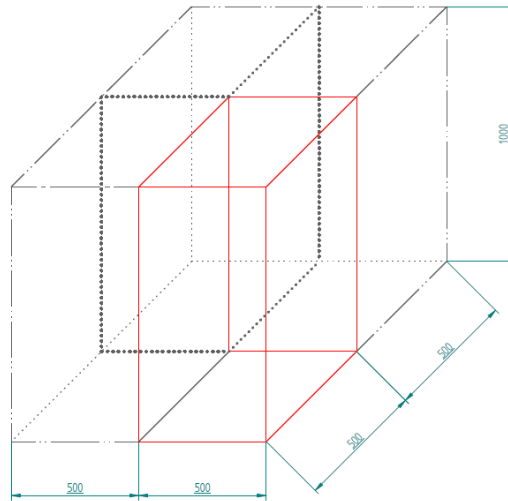
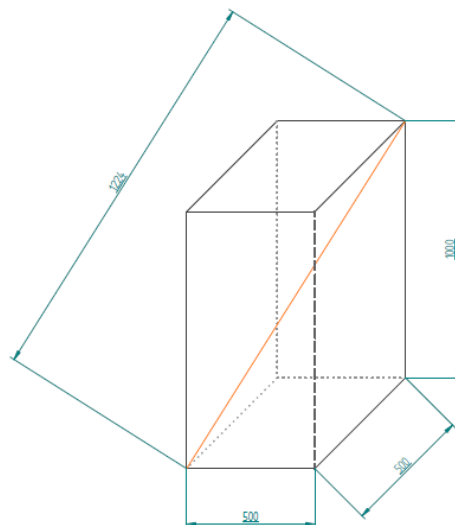


Imagen 3. Sección de trabajo para definir la longitud total.



La posición inicial es el centro en la parte baja

La ubicación de las articulaciones se distribuye en:

$$AC = 45\% * L_t = 612 \text{ mm} \quad (5)$$

$$CD = 25\% * L_t = 306 \text{ mm} \quad (6)$$

$$DE = 15\% * L_t = 183 \text{ mm} \quad (7)$$

$$EF = 10\% * L_t = 122 \text{ mm} \quad (8)$$

La carga de diseño es de 3 kg para ofrecer un margen de tolerancia entre cargas y peso.

Imagen 4. Sistema físico preliminar para cálculos en el brazo robótico articulado

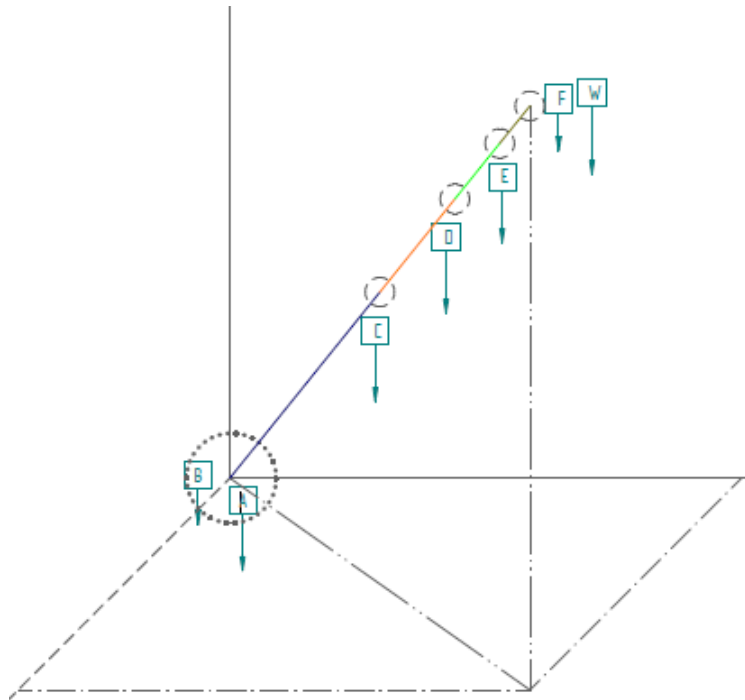
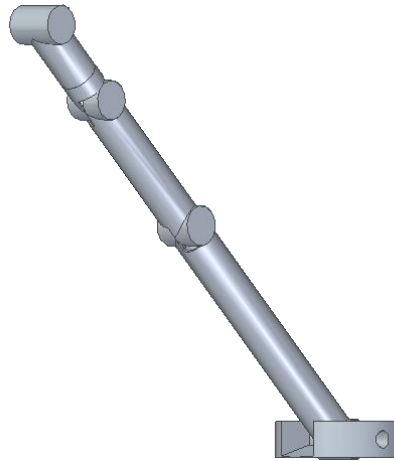


Imagen 5. Esquema del brazo robótico



5.4. Ingeniería de detalle

5.4.1. Modelamiento matemático:

A continuación, se expone las ecuaciones 9 hasta la ecuación 129 son usadas para justificar las bases de diseño.

- Ecuaciones estáticas preliminares

$$F = Wm + W_{ac} \quad (9)$$

Base A:

$$\Sigma Fy = 0 \quad (10)$$

$$RFy - (w + FMc + FMd + FMe + FMf + FMa + FMb) = 0 \quad (11)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (12)$$

$$RMb = 0 \quad (13)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (14)$$

$$RFx = 0 \quad (15)$$

$$\Sigma Mx = 0 \quad (16)$$

$$RMa - (Rw * w + RMc * FMc + RMd * FMd + RMe * FMe + RMf * FMf) = 0 \quad (17)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (18)$$

$$RFz = 0 \quad (19)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (20)$$

$$RMz = 0 \quad (21)$$

Sección C

$$\Sigma Fy = 0 \quad (22)$$

$$RMc - (w + FMc + FMd + FMe + FMf) = 0 \quad (23)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (24)$$

$$Rc = 0 \quad (25)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (26)$$

$$RFx = 0 \quad (27)$$

$$\Sigma Mx = 0 \quad (28)$$

$$RMc - (Rw * w + RMd * FMd + RMe * FMe + RMf * FMf) = 0 \quad (29)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (30)$$

$$RFz = 0 \quad (31)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (32)$$

$$Rc = 0 \quad (33)$$

Sección D

$$\Sigma Fy = 0 \quad (34)$$

$$RMd - (w + FMd + FMe + FMf) = 0 \quad (35)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (36)$$

$$Rd = 0 \quad (37)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (38)$$

$$RFx = 0 \quad (39)$$

$$\Sigma Mx = 0 \quad (40)$$

$$RMd - (Rw * w + RMe * FMe + RMf * FMf) = 0 \quad (41)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (42)$$

$$RFz = 0 \quad (43)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (44)$$

$$Rd = 0 \quad (45)$$

Sección E

$$\Sigma Fy = 0 \quad (46)$$

$$RMc - (w + FMe + FMf) = 0 \quad (47)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (48)$$

$$Rd = 0 \quad (49)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (50)$$

$$RFx = 0 \quad (51)$$

$$\Sigma Mx = 0 \quad (52)$$

$$RMe - (Rw * w + RMf * FMf) = 0 \quad (53)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (54)$$

$$RFz = 0 \quad (55)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (56)$$

$$Rd = 0 \quad (57)$$

Sección F

$$\Sigma Fy = 0 \quad (58)$$

$$RMc - (w + FMe + FMf) = 0 \quad (59)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (60)$$

$$Rd = 0 \quad (61)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (62)$$

$$RFx = 0 \quad (63)$$

$$\Sigma Mx = 0 \quad (64)$$

$$RMe - (Rw * w + RMf * FMf) = 0 \quad (65)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (66)$$

$$RFz = 0 \quad (67)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (68)$$

$$Rd = 0 \quad (69)$$

- Ecuaciones dinámicas preliminares

Sección A

$$\Sigma Fy = \dot{\theta} * r \quad (70)$$

$$RFy - (w + FMc + FMd + FMe + FMf + FMa + FMb) = \dot{\theta} * r \quad (71)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (72)$$

$$RMb = 0 \quad (73)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (74)$$

$$RFx = 0 \quad (75)$$

$$\Sigma Mx = \dot{\theta} * r \quad (76)$$

$$RMa - (Rw * w + RMc * FMc + RMd * FMd + RMe * FMe + RMf * FMf) = \dot{\theta} * r \quad (77)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (78)$$

$$RFz = 0 \quad (79)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (80)$$

$$RMz = 0 \quad (81)$$

Sección C

$$\Sigma Fy = \dot{\theta} * r \quad (82)$$

$$RMc - (w + FMc + FMd + FMe + FMf) = \dot{\theta} * r \quad (83)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (84)$$

$$Rc = 0 \quad (85)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (86)$$

$$RFx = 0 \quad (87)$$

$$\Sigma Mx = \dot{\theta} * r \quad (88)$$

$$RMc - (Rw * w + RMd * FMd + RMe * FMe + RMf * FMf) = \dot{\theta} * r \quad (89)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (90)$$

$$RFz = 0 \quad (91)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (92)$$

$$Rc = 0 \quad (93)$$

Sección D

$$\Sigma Fy = \dot{\theta} * r \quad (94)$$

$$RMc - (w + FMd + FMe + FMf) = \dot{\theta} * r \quad (95)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (96)$$

$$Rd = 0 \quad (97)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (98)$$

$$RFx = 0 \quad (99)$$

$$\Sigma Mx = \dot{\theta} * r \quad (100)$$

$$RMd - (Rw * w + RMe * FMe + RMf * FMf) = \dot{\theta} * r \quad (101)$$

$$\Sigma Fz \quad (102)$$

$$RFz = 0 \quad (103)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (104)$$

$$Rd = 0 \quad (105)$$

Sección E

$$\Sigma Fy = \dot{\theta} * r \quad (106)$$

$$RMc - (w + FMe + FMf) = \dot{\theta} * r \quad (107)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (108)$$

$$Rd = 0 \quad (109)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (110)$$

$$RFx = 0 \quad (111)$$

$$\Sigma Mx = \dot{\theta} * r \quad (112)$$

$$RMe - (Rw * w + RMf * FMf) = \dot{\theta} * r \quad (113)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (114)$$

$$RFz = 0 \quad (115)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (116)$$

$$Rd = 0 \quad (117)$$

Sección F

$$\Sigma Fy = \dot{\theta} * r \quad (118)$$

$$RMc - (w + FMf) = \dot{\theta} * r \quad (119)$$

$$\Sigma My = 0 \quad (120)$$

$$Rd = 0 \quad (121)$$

$$\Sigma Fx = 0 \quad (122)$$

$$RFx = 0 \quad (123)$$

$$\Sigma Mx = \dot{\theta} * r \quad (124)$$

$$RMe - (Rw * w + RMf * FMf) = \dot{\theta} * r \quad (125)$$

$$\Sigma Fz = 0 \quad (126)$$

$$RFz = 0 \quad (127)$$

$$\Sigma Mz = 0 \quad (128)$$

$$Rd = 0 \quad (129)$$

5.4.1.1. Movimiento de inercia por eslabón

La inercia y masa se debe considerar para el movimiento de los eslabones, de acuerdo con el texto de R.Crowder (2013) el procedimiento por eslabón es el siguiente:

$$I = I_G + Md^2 \quad (130)$$

Donde I_G es la inercia (I_{yy}) del cuerpo, M es la masa y d es la distancia entre el nuevo eje de rotación y el eje original de rotación.

5.4.1.2. Aceleración con una carga externa aplicada

$$\alpha_{peak} = \frac{T_{peak} - T_l/n}{2I_m n} \quad (131)$$

Donde T_{peak} es el torque pico, T_l torque del motor, I_m inercia de masa y n la reducción de engrane.

5.4.1.3. Relación de engranajes

Los engranajes son la solución más adecuada para la transmisión de potencia y su diseño y selección siguen el mismo proceso del texto de R. Crowder (2013), como se muestra a continuación.

$$T_o = \pm n T_i \quad (132)$$

$$\omega_o = \pm \frac{\omega_i}{n} \quad (133)$$

$$I_{eff} = \frac{I_L}{n^2} \quad (134)$$

Aceleración de cargas con inercias variables

$$I_{load} = d^2 M_L + I_{yy} \quad (135)$$

Donde d es la distancia desde el eje de la junta y paralelo al eje de la carga, en este caso de I_{yy} y M_L es la masa de la carga.

5.5. Obtención de geometrías

Obtenidos los elementos de inicio como fuerzas, materiales y esfuerzos permisibles para resistencia a la fatiga es posible obtener una geometría que supla las condiciones. Con esto en mente se considero todos los aspectos geométricos, con la creación de un primer modelo que funcionará como base para corregir errores de calculo posteriores.

Los cálculos se automatizaron en Excel para agilizar los procedimientos y realizar mejoras en las geometrías, las condiciones ya están supuestas como un brazo extendido y la carga final ya está fijada.

Como se obtuvo en la ecuación 3 el valor del esfuerzo permisible es 4.7 MPa. Se uso la herramienta de obtener valor en Excel para obtener un diámetro que alcance estos esfuerzos máximos con cargas ya establecidas contando con masas de segmentos y motores.

5-1. Representacion grafica de calculo automatizado en excel

θ	90	N	12			
W	31.74 N	38.87 N*m	σ perm	radio interno	radio externo	
Mf	40.19 N	87.90 N*m	4.70E+06	0.05	0.052	
Me	39.55 N	125.47 N*m	4.70E+06	0.05	0.053	
Md	49.08 N	157.87 N*m	4.79E+06	0.05	0.054	
Mc	80.24 N	185.95 N*m	4.87E+06	0.05	0.055	
Mb	1.00 N	1.00 N*m	0.00E+00	0.01	1.000	
Ma	0.00 N	214.03 N*m	4.92E+06	0.05	0.055	

Como se mencionó antes los esfuerzos cambiaran a medida que las geometrías transversales y masas de motores son corregidas, por esta razón se automatizo este proceso en Excel y se cambió las geometrías a medida que se buscaba modificar características en el brazo. Así también fue posible comparar entre mecanismos de transmisión de potencia en un menor

tiempo y buscando mejorar los aspectos más críticos como el peso y concentradores de esfuerzo.

5-2 representación de modificaciones automáticas debido a cambios en las masas de motores

		θ	90	N	12			
	Masa de motores	W	31.74 N	38.87 N*m	σ perm	radio interno	radio externo	
Mf	3.8 kg	Mf	40.19 N	87.90 N*m	4.70E+06	0.05	0.052	
Me	3.8 kg	Me	39.55 N	125.47 N*m	4.70E+06	0.05	0.053	
Md	4.8 kg	Md	49.08 N	157.87 N*m	4.79E+06	0.05	0.054	
Mc	8 kg	Mc	80.24 N	185.95 N*m	4.87E+06	0.05	0.055	
Mb	4.8 kg	Mb	1.00 N	1.00 N*m	0.00E+00	0.01	1.000	
Ma	11.2 kg	Ma	0.00 N	214.03 N*m	4.92E+06	0.05	0.055	

		θ	90	N	12			
	Masa de motores	W	31.74 N	38.87 N*m	σ perm	radio interno	radio externo	
Mf	3.8 kg	Mf	40.19 N	87.90 N*m	4.70E+06	0.05	0.052	
Me	3.8 kg	Me	39.55 N	125.47 N*m	4.70E+06	0.05	0.053	
Md	4.8 kg	Md	49.08 N	157.87 N*m	4.79E+06	0.05	0.054	
Mc	30 kg	Mc	300.90 N	263.18 N*m	6.89E+06	0.05	0.055	
Mb	4.8 kg	Mb	1.00 N	1.00 N*m	0.00E+00	0.01	1.000	
Ma	11.2 kg	Ma	0.00 N	368.49 N*m	8.47E+06	0.05	0.055	

Gracias a Solid Edge se agilizo la obtención de los datos de masa, centro de gravedad, volumen, área transversal, momento de inercia de masa y momento polar de inercia de masa fue posible corroborar los cálculos de manera manual además de ser indicadores de medición para contribuir a las mejoras que se realizaron.

5-3 Recuadro de propiedades adquirido de un modelo CAD (Solid Edge)

Global
Principales

Masa: 18.741 kg
Volumen: 6135610.404 mm³

Masa de sustitución de cantidad: 18.741 kg
☐ Usar como la masa del conjunto

Centro de masa
☐ Mostrar símbolo
Centro de volumen
☐ Mostrar símbolo

X: 394.40 mm
Y: -10.17 mm
Z: 0.00 mm
X: 363.48 mm
Y: -3.97 mm
Z: 0.00 mm

Momentos de inercia de la masa

Ixx: 0.071 kg·m²
Iyy: 3.716 kg·m²
Izz: 3.735 kg·m²

Ixy: -0.120 kg·m²
Iyz: 0.000 kg·m²
Ixz: 0.000 kg·m²

Con esta información se define las necesidades de torque y reducción, cerrando el ciclo de diseño en estas últimas condiciones.

5.6. Procedimiento en cada segmento del brazo robótico:

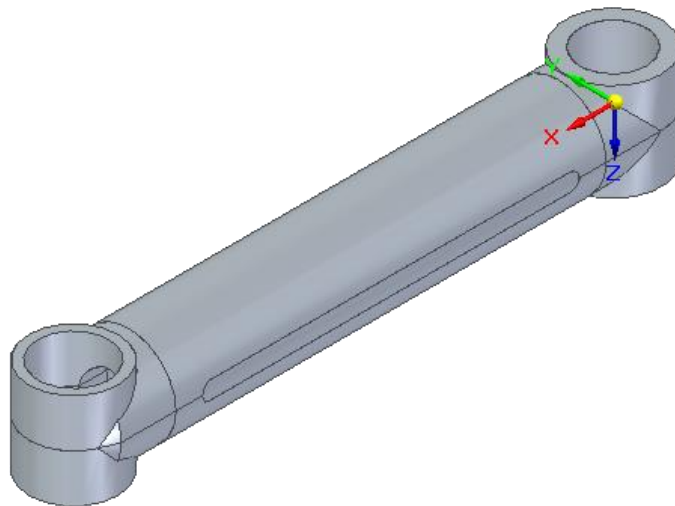
Para determinar como un diseño satisfactorio se impusieron las siguientes condiciones:

- La masa total del brazo no puede ser más del 25% de la masa ideal.
- Debe mantenerse la longitud total.
- Los modelos se pueden fabricar.
- Se ajustan los componentes y las geometrías de tal modo que mejoren el rendimiento del manipulador.
- Los segmentos poseerán al menos una articulación por lo que se considerará todo los componentes mecánicos y electrónicos que lo componen.
- Debe ser lo mas compacto posible
- Poseer espacio para almacenar cableado y sistemas sensoriales.

5.6.1. Ejemplificación de proceso de diseño (Segmento AC)

En el segmento AC el diseño se centró en identificar las mejores geometrías que requieran menos material, mayor compactibilidad, menor distribución de esfuerzos y suficiente espacio para almacenar cableado y sistemas sensoriales.

5-4 Modelo CAD de prueba inicial



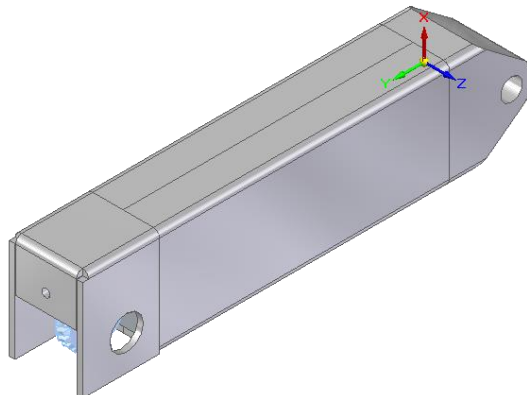
La geometría de inicio en el segmento AC, cuenta con un área transversal circular con extremos del mismo modo circulares y accesos para el paso de engranes, esta geometría no se conserva debido a su carencia de espacio para motores. Las características geométricas y de masa se describen con la imagen a continuación, el peso es de 6.95 Kg aproximadamente y sus inercias están por debajo del kg.m^2 , para facilitar el análisis se centró las correcciones en una relación de masas e inercias, buscando un balance entre un menor peso y facilidad para los motores de elevar los segmentos posteriores.

5-5 Propiedades del modelo CAD inicial (Solid Edge)

Global		Principales	
Masa:	6.948 kg	Volumen:	2562084.632 mm ³
Masa de sustitución de cantidad:	6.948 kg	☐	Usar como la masa del conjunto
Centro de masa		Centro de volumen	
☐	Mostrar símbolo	☐	Mostrar símbolo
X:	282.18 mm	X:	282.18 mm
Y:	0.00 mm	Y:	0.00 mm
Z:	0.00 mm	Z:	0.00 mm
Momentos de inercia de la masa			
lxx:	0.015 kg·m ²	lyy:	0.909 kg·m ²
lxy:	0.000 kg·m ²	lzz:	0.912 kg·m ²
lxz:	0.000 kg·m ²	lyz:	0.000 kg·m ²

El modelo se modificó de tal manera que pueda alojar un motor y demás componentes necesarios para el movimiento de los segmentos posteriores, la forma del brazo se ve poco acabada y muy poco detallada. Se descartó la geometría circular ya que no se ajustaba a la forma de los motores paso a paso. El segmento se mostrará a continuación.

5-6 Modelo CAD con geometría rediseñada (Solid Edge)



Se aumentó el grosor de las paredes y transformé el área como lo demanda el procedimiento de Norton para fatiga (Norton, 2011), con un resultado en esfuerzos mucho menores a los obtenidos en el proceso anterior, además de notorias alteraciones de masa e inercia.

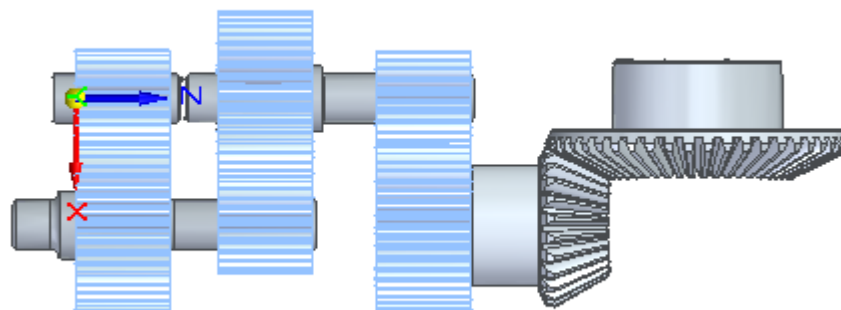
5-7 Propiedades del segundo diseño (Solid Edge)

24.022 kg		8026006.206 mm ³	
Masa de sustitución de cantidad:		☒ Usar como la masa del conjunto	
24.022 kg			
Centro de masa		Centro de volumen	
☐ Mostrar símbolo		☐ Mostrar símbolo	
X: -59.81 mm		X: -60.73 mm	
Y: 256.94 mm		Y: 227.28 mm	
Z: 0.00 mm		Z: 0.00 mm	
Momentos de inercia de la masa			
lxx:	lxy:	lxx:	lzz:
2.608 kg·m ²	0.190 kg·m ²	2.727 kg·m ²	
lxy:	lxz:	lyz:	
-0.386 kg·m ²	0.000 kg·m ²	0.000 kg·m ²	

Principalmente se aumentó el momento de inercia y el momento de inercia polar disminuye el esfuerzo flector y cortante, sin embargo, el peso total sumado a un elevado momento de inercia de la masa restringe el funcionamiento del mecanismo que mueve este segmento. Aun así, el avance es positivo ya que dicha geometría permite extrapolarse a geometrías más orgánicas.

Para el sistema de transmisión se comprobó entre varias opciones, inicialmente se optó por engranes piñón-corona, sin embargo, el torque de salida requerido era elevado y la compactibilidad de estos engranes a dicho torque no era posible. Así que se optó por usar un tren de engranes convencionales en 3 fases (para mantener el perfil de la carcasa lo más fina posible), como se mostrara a continuación.

5-8 Conjunto de prueba de sistema de transmisión piñón corona

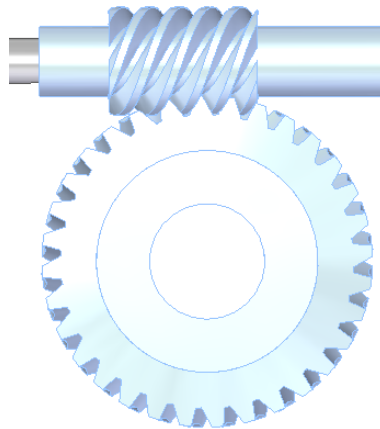


Como se puede ver en la imagen, los engranes ocupan una gran porción del volumen dentro del segmento 0.039 m³ donde la mayoría está dentro del habitáculo, a su vez, estos elementos

pesarían 2.099Kg que representa un peso considerable. Así que se optó por otra solución, los engranes tipo tornillo sin fin como se verá a continuación:

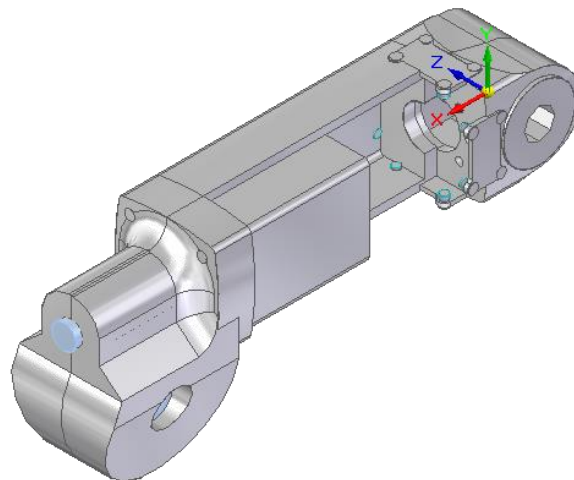
El volumen es mayor 0.042 m^3 , sin embargo solo se considera la mitad (0.021 m^3) ya que estar asomado en el extremo no interfiere con la capacidad operativa. Así, el habitáculo del segmento AC está ocupado por el motor y finalmente por los demás elementos (cableado y elementos sensoriales.)

5-9 Conjunto de transmisión de engrane y tornillo sin fin



A continuación, el segmento AC obtuvo un grosor máximo de la iteración anterior, pero fue reduciéndose en aquellas zonas donde no se encuentran concentradores de esfuerzos, así se obtuvo una forma que se amoldara a los motores y una disminución en resistencia a esfuerzos debido a un menor momento de inercia.

5-10 Modelo CAD del diseño final de segmento AC



Con esta geometría con un habitáculo semejante a una viga en C la masa e inercia alcanzaron un punto de equilibrio hasta el punto donde los motores seleccionados pudieran mover sin

5-11 Propiedades del diseño final del segmento AC

Global		Principales	
Masa:	10.441 kg	Volumen:	3849964.058 mm ³
Masa de sustitución de cantidad:	10.441 kg	☐ Usar como la masa del conjunto	
Centro de masa		Centro de volumen	
☐ Mostrar símbolo		☐ Mostrar símbolo	
X:	253.62 mm	X:	253.62 mm
Y:	-17.01 mm	Y:	-17.01 mm
Z:	0.00 mm	Z:	0.00 mm
Momentos de inercia de la masa			
Ixx:	0.051 kg-m ²	Iyy:	1.029 kg-m ²
Ixy:	-0.081 kg-m ²	Iyz:	0.000 kg-m ²
Izz:	1.043 kg-m ²	Iyz:	0.000 kg-m ²

problemas este y los segmentos posteriores. La reducción en masa fue de un 43% y la inercia es igualmente más baja que la anterior, siendo el valor justo para que los elementos móviles.

Finalmente se alcanzó el objetivo de obtener un segmento AC con las necesidades suplidas de compactibilidad, espacio de habitáculo, resistencia a esfuerzos y masa. Otro efecto del proceso iterativo fue un acercamiento del centro de masa a la base.

5.6.1.1. Elección de materiales en cálculos

La elección de ciertos materiales varía según la necesidad y otros factores como la compatibilidad

5.6.1.2. Elección de perfiles basados en proceso de fabricación

La diferencia en resistencia es muy alta con diferencias en el grosor de perfiles, independiente de la geometría, se considera el uso de materiales disponibles comercialmente y accesibles para los estudiantes de la Universidad Santo Tomás.

El proceso de transformación en los talleres de Universidad Santo Tomás se puede realizar procesos de conformado por remoción de viruta, soldadura, plegado como otras tareas más sencillas de corte y acabado. Es determinante conocer las capacidades de producción y reducir el trabajo externo en la medida de lo posible.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado los procesos productivos se compararán y se ajustará el proceso de diseño dependiendo de la necesidad de diseño en la tabla 14.

Tabla 3. Cuadro comparativo para definir proceso de fabricación.

No.	Proceso	Efectividad	Tiempo	Acabado	Costo
1.	Fresado	7	4	5	7
2.	Mecanizado en CNC	10	3	10	2
3.	Corte	6	8	5	8
4.	Soldadura	8	10	4	3
5.	Taladrado	8	10	10	3
6.	Impresión 3D	7	2	4	7

El diseño final se enfocará en las opciones que más se ajusten a la necesidad de características como el acabado, el tiempo, el precio y limitaciones de las máquinas en la universidad.

5.6.2. Elección de motores

Según el libro de R. Crowder (2013) y A. Barrientos (1997) los motores a utilizar deben ofrecer la capacidad de ejercer el torque necesario y ser compatibles con sistemas inteligentes, de acuerdo con estas condiciones se compararán los distintos tipos de motores digitales:

Motores de AC síncronos:

- Para realizar el sistema de control en motores síncronos lo mas recomendable es utilizar un sensor de posición continuo que detecta la posición del rotor (Barrientos, 1997).
- Aquí es posible incluir los motores sin escobillas, sin embargo, la dificultad de realizar el control en corriente alterna es mas elevada con los motores de corriente directa (Crowder, 2013).

Motores AC asíncronos:

- Cuentan con una buena capacidad de torque y estabilidad (Crowder, 2013)
- Los motores asíncronos no son óptimos para realizar satisfactoriamente el control (Barrientos, 1997).
- Debido a que estos operan a una velocidad constante y condiciones de ciclo abierto, donde el estado estático son características son de principal importancia (Crowder, 2013).
- Para realizar controles vectoriales el motor debe ser capaz de moverse entre los cuatro cuadrantes polares sin ninguna discontinuidad (Crowder, 2013).
- A su vez requieren de mas elementos que permitan ajustar y modificar el movimiento del motor para ajustarse a un sistema de control satisfactoriamente (Crowder, 2013).

Motores de DC por excitación:

- Estos poseen una ventaja donde la inercia del rotor es reducida comparado a un rotor bobinado (Barrientos, 1997).

- Su ventaja también genera una desventaja, ya que pueden presentarse problemas por sobrecalentamiento por sobrecarga (Barrientos, 1997).
- En los motores con escobilla la relación velocidad – torque, voltaje – velocidad y carga – velocidad son lineales, lo que facilita el control (Crowder, 2013).
- El precio de los motores con escobilla es mayor que otros tipos.
- Los motores sin escobilla alimentados con corriente directa cuentan con una restricción de velocidad – torque a causa de conmutación, aspecto que con los motores con escobillas no sucede (Crowder, 2013)

Motores de DC por inducción:

- Los motores de inducción son típicamente más grandes que motores de magnetos permanentes de control por onda sinusoidal, para idénticas salidas de poder; esto es porque para el motor de inducción requiere menos poder.
- Para la misma salida de torque, eficiencia (el cual está ligada directamente al marco de tamaño) es para motores de inducción. Por lo tanto, a previsión podría requerir refrigeración forzada.
- Los motores de inducción cuestan menos que sus equivalentes de magneto permanente de control por onda sinusoidal, debido a su simplicidad y falta de magnetos permanentes.
- En motores de inducción, el campo se debilita fácilmente alcanzando un amplio rango de velocidad; esto no es posible en motores de magnetos permanentes de onda sinusoidal.
- El vector de control de los motores de inducción requiere una considerable capacidad de cómputo, y mientras los microprocesadores son una ventaja ellos no son necesario. En aplicaciones de seguridad crítica, el uso de motores basados en controladores sofisticados microprocesadores capaces de constituir un menor riesgo de seguridad.

Motores paso a paso:

Los motores paso a paso se dividen en varios tipos:

- De imanes permanentes: el rotor de estos motores posee una polarización magnética constante, gira para orientar sus polos de acuerdo al campo magnético creado por las fases del estator.
- De reluctancia variable: El rotor está formado por un material ferromagnético que tiende a orientarse de modo que facilite el camino de las líneas de fuerza del campo magnético generado por las bobinas del estator.
- Híbridos: estos motores combinan el modo de funcionamiento de los dos tipos anteriormente expuestos.

Las ventajas elegidas para el uso de motores paso a paso son las más cercanas porque estas se alinean a las necesidades del cliente requeridas y son las siguientes:

- Los motores paso a paso son capaces de operar con una precisión básica de más o menos un paso en sistema de ciclo abierto. Esta inherente precisión remueve el requerimiento para un transductor de posición y velocidad, y de esta manera reduce el costo total del sistema.
- Los motores paso a paso pueden producir grandes salidas de torque a bajas velocidad incluyendo la posición estática del motor paso a paso híbrido.
- La operación del motor paso a paso y en sus asociaciones de circuitos de movimiento es digitalmente efectiva. Permitiendo una siempre interface a controlador digital o a computador.
- La construcción del motor paso a paso es simple y robusta, liderando con una alta confiabilidad

Aunque cuenta con una desventaja importante:

- Debido a las inercias propias de arranque y para no se alcanzan las velocidades nominales instantáneamente por lo que debe considerarse al momento de realizar los sistemas de control (Barrientos, 1997).

En conclusión, los motores con mayor facilidad de control son los motores paso a paso, sus ventajas en este aspecto son muy superiores, incluyendo su precisión y relativo bajo costo. Esta opción es la más alineada a nuestra necesidad de reducir la complejidad en el control y enfocar ese esfuerzo en aplicaciones de sistemas inteligentes (Crowder, 2006).

5.6.3. Selección de las transmisiones

Existe una variedad de maneras para transmitir movimiento y potencia para distintas aplicaciones:

Lineales: Mecanismos cuyo movimiento es paralelo al área transversal de la salida de potencia.

Angulares: Mecanismos cuyo movimiento es angular, donde cuyo eje puede ser paralelo o excéntrico al eje de potencia.

Las características del brazo articulado es el movimiento angular en cada una de sus uniones es necesario mecanismos angulares como los siguientes:

- **Correas y poleas:** La transmisión de correa transmite movimiento giratorio y torque de un eje a otro suavemente, sin ruido y de manera económica. Sin embargo, las distancias pequeñas pueden causar fatiga con mayor frecuencia, su eficiencia es menor y en distancias largas puede generar latigazos y vibraciones.
- **Cadenas y piñones:** La transmisión de cadenas se emplean para transmitir movimiento giratorio y torque de un eje a otro, suave y silenciosamente, así como a bajo costo. Las transmisiones de cadena proporcionan la flexibilidad que los engranajes rectos carecen, sin embargo, su eficiencia se ve reducida para distancias cortas.
- **Engranes:** Los engranes la función de un engrane es transmitir movimiento de un eje giratorio a otro, donde el movimiento del motor se transmite a los ejes que transportan los rodillos (Myska, 2012).
 - **Engranes rectos:** Son el tipo de engranajes sirven para transmitir movimiento paralelo al eje de rotación. Este se conforma por ruedas dentadas que se mueven angularmente a través del contacto entre dientes.
 - **Engranes helicoidales:** Similares a los engranajes rectos, estos engranes se inclinan hacia el eje de rotación. Esto permite un acoplamiento más gradual y produce impacto y ruidos menores.
 - **Engranes cónicos:** Son engranes donde los engranes con el mismo principio de los engranes rectos, aunque están sus ejes están dispuestos en un ángulo de 90°.
 - **Engranes de tornillo sin fin:** Sirven para transmitir entre ejes no paralelos que no se intersecan. El tornillo sin fin tiene un diente en forma de espiral alrededor de un cilindro de paso.
 - **Engranes Planetario:** Una transmisión planetaria es una transmisión coaxial y es particularmente apropiada para aplicaciones de alto torque y bajas velocidades. Compuesta por un engranaje sol, que conduce a un marco dentado y finalmente un engrane planetario quien conduce la potencia.

- Engranés harmónicos: Los engranes harmónicos proveen un alto rango de transmisión con mínima reacción en una unidad compacta. Compuesta de 3 partes: estrías circulares, generador de ondas y una línea flexible.
- Engranés cicloidales: Los engranes cicloidales ofrecen un alto rango de reducción en una sola etapa, provee gran resistencia y poca reacción. (Crowder, 2006).

A continuación, se anuncian los aspectos de comparación entre engranajes:

- Complejidad: La complejidad de instalación como de mantenimiento es fundamental para mecanismos confiables y duraderos, (medida del más complejo con un puntaje de 1, al más sencillo con un puntaje de 10).
- Compatibilidad: La compactibilidad hace referencia al uso efectivo del espacio y su distribución a lo largo del sistema. (Donde 10 es el más compacto y 1 donde no se usa o distribuye bien el espacio.)
- Rangos de transmisión: Los rangos transmisión que pueden alcanzar (donde 10 necesita menos etapas y mayor rango de transmisión y 1 donde requiere de mayor cantidad de etapas).
- Fabricación: Se refiere a la complejidad y tiempo que requiere para producir dicho sistema. (Donde 10 es el elemento más sencillo de fabricar con los elementos de la Universidad Santo Tomás y 1 es el más complejo)
- Ventajas mecánicas: Hace referencia a aquellas capacidades como el bloqueo mecánico de algún sistema debido a la naturaleza del sistema o menor producción de vibraciones como de movimientos que afectan la función del brazo robótico. (Donde 10 cuenta con mayor ventaja y 1 es el de menor ventaja mecánica).

Tabla 4. Cuadro comparativo de sistemas de transmisión de potencia

Tipo	Cadenas	Poleas	Rectos	Helicoidales	Cónicos	Tornillo sin fin
Complejidad	10	10	10	8	10	7
compactibilidad	2	2	2	2	4	10
R. Transmisión	3	2	2	2	2	8
Fabricación	10	10	10	7	6	5
Ventajas mecánicas	1	3	1	1	1	10
Total	26	27	25	20	23	40

Tabla 5. Cuadro comparativo de sistemas de transmisión de potencia

Tipo	Planetario	Cicloidales	Harmónicos
Complejidad	2	7	5
Compactibilidad	6	10	10
R. Transmisión	7	7	7
Fabricación	9	9	2
Ventajas mecánicas	3	7	7
Total	27	40	31

Se prueban las distintas transmisiones de potencia para definir cual mecanismo puede ofrecer la compatibilidad y reducción necesaria para obtener el menor tiempo de producción, menor cantidad de elementos móviles y capacidad de movimiento.

Inicialmente, los engranes rectos pueden transmitir y potenciar la transferencia mediante trenes de engranaje, sin embargo, no son lo suficientemente compactos para ser insertados dentro del brazo robótico sin alterar su longitud, además, de añadir peso que puede interferir en el movimiento.

Los engranes tipo corona piñón tienen la capacidad de transferir la potencia de manera perpendicular, aunque no puede generar la suficiente reducción. Por lo tanto, debe insertarse un tren de engranes lo hace una opción poco acertada para la compactibilidad y aprovechamiento del espacio.

Las cadenas requieren de acoples que no aprovechan el espacio para este enfoque, por lo que se descartan debido a su requerimiento inicial, Así mismo las bandas pueden mover y ejecutar las acciones igual que los engranes, pero el mecanismo afecta el uso y peso del brazo robótico.

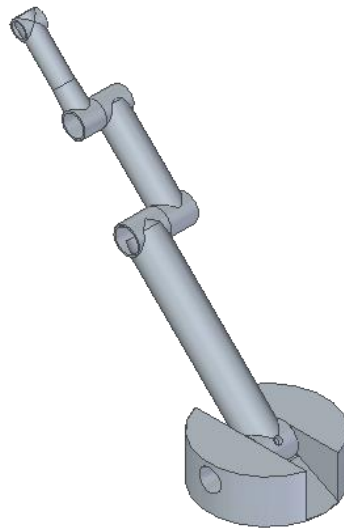
Los sistemas planetarios son compactos de manera transversal y son una opción ideal para funcionar en el eje paralelo al área transversal requerido en la unión E. Esta transmisión para un óptimo movimiento debe de contar con suficiente lubricación que puede afectar en la fabricación.

Finalmente, los engranes harmónicos y cicloidales pueden ser la opción más optima con ciertas diferencias como en la simpleza de piezas, por esta razón, la decisión de transmisión de queda en el los engranes cicloidales.

5.7. Evolución de modelos

El proceso de diseño se monta en base a los criterios ya mencionado, conociendo ciertas limitantes, métodos a utilizar y un diseño conceptual se iniciará el modelo CAD:

Imagen 6. Modelo CAD de primera iteración de diseño



Se modifica el diseño para validar el valor conceptual como se muestra a continuación el modelo CAD cuenta con una masa de 25.6 Kg y se altera para distribuir todo el cableado, motores y elementos de transmisión.

6. OPTIMIZACION COMPUTACIONAL DEL DISEÑO

Para ahorrar consumo de cómputo y obtener los valores más específicos posibles se usan los cálculos de convergencia, en esta sección se identifica el tamaño y demás detalles de enmallado para obtener los resultados más acordes con los calculados y veraces (Mason y Yang, 2020).

Este elemento fue simulado en el Workbench de ANSYS y arrojó los siguientes resultados:

7.1. Análisis de convergencia

Este análisis comparativo funciona como una herramienta de medida para evitar el uso excesivo de cálculo manteniendo la precisión y veracidad de los valores, de este modo puede ahorrarse en tiempo para tener técnicamente los mismos valores.

7.2. Primera iteración

Los esfuerzos se desvían aproximadamente un 4% respecto a los calculados previamente realizados, por lo que la validación es correspondiente e indicio de un correcto desarrollo.

Imagen 7. Resultado de análisis por elementos finitos en la opción de estática estructural.

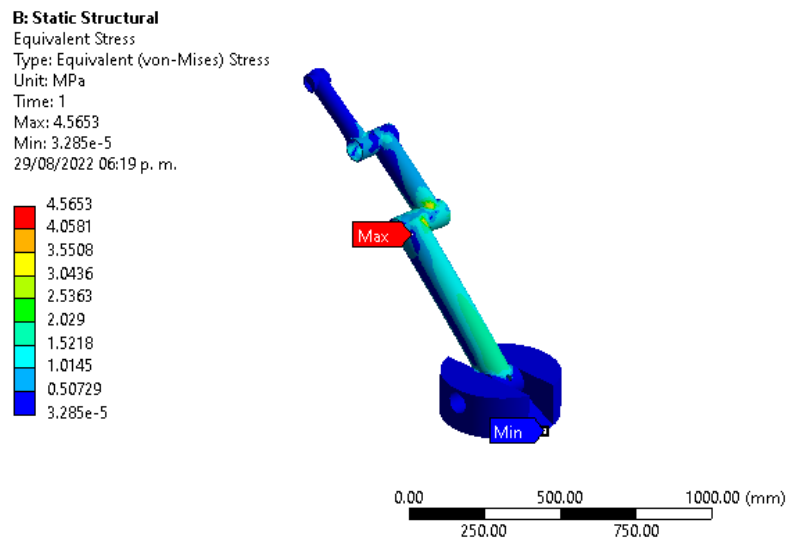
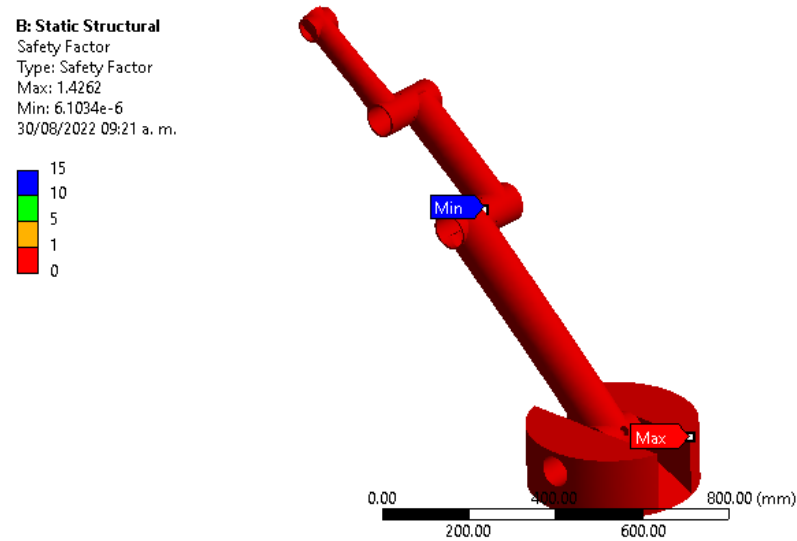


Imagen 8. Resultado de la primera iteración expuesta a fatiga hecho en elementos finitos.



Así pues, la herramienta de fatiga arroja que esta geometría no es capaz de soportar los esfuerzos variables, y debe rediseñarse en su totalidad, como lo muestra la siguiente imagen:

El siguiente recuadro puede verse los esfuerzos del sistema debido a las vibraciones aleatorias y como se predijo anteriormente falla debido a concentradores de esfuerzo en las uniones.

Así mismo las desviaciones debido a estas vibraciones se pueden calcular y como se muestra a continuación:

Imagen 9. Resultado de esfuerzos de la primera iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.

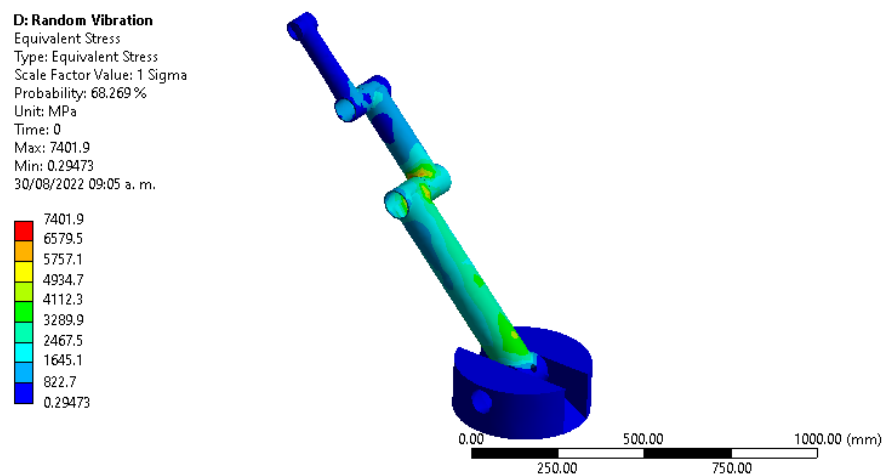
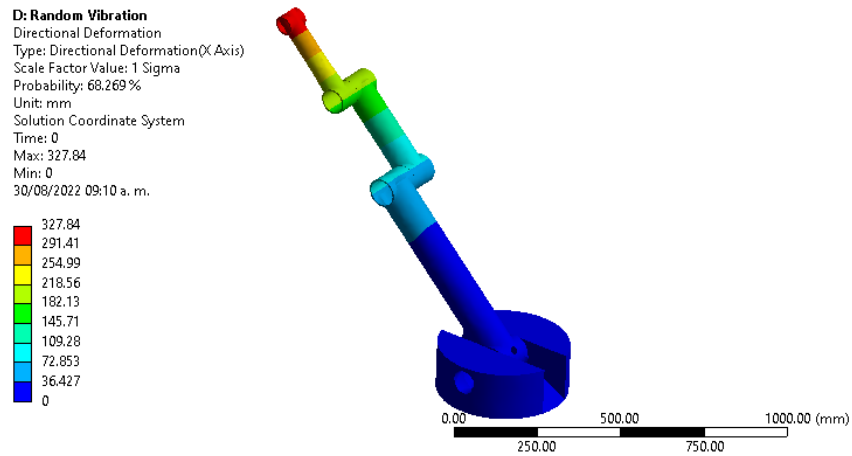


Imagen 10. Resultado de deformación de la primera iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.

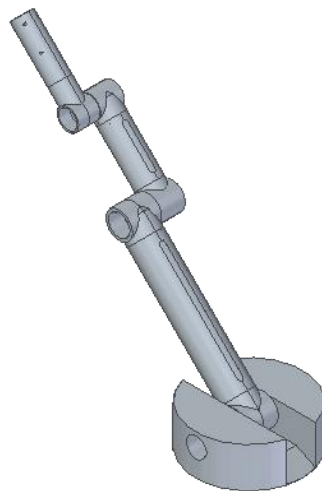


Es imposible continuar con dicha geometría debido a la gran cantidad de deformación y desviación. Aunque el factor de seguridad era muy elevado la simulación arroja que no es seguro mantener dicha geometría.

7.3. Segunda iteración

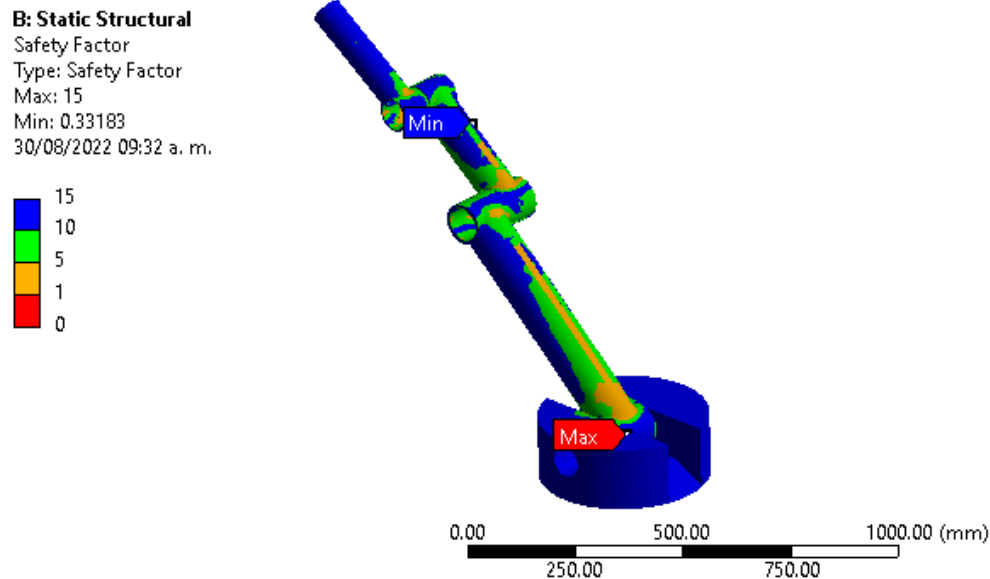
El diseño conceptual tiene muchos factores a solucionar, como ubicación de motores y mecanismos como también consideraciones de ensamblaje y fabricación. Posteriormente estos modelos fueron expuestos a las cargas y su masa es de 42.9 Kg, finalizando con el modelo que se muestra en la siguiente imagen:

Imagen 11. Modelo CAD de la segunda iteración del brazo articulado.



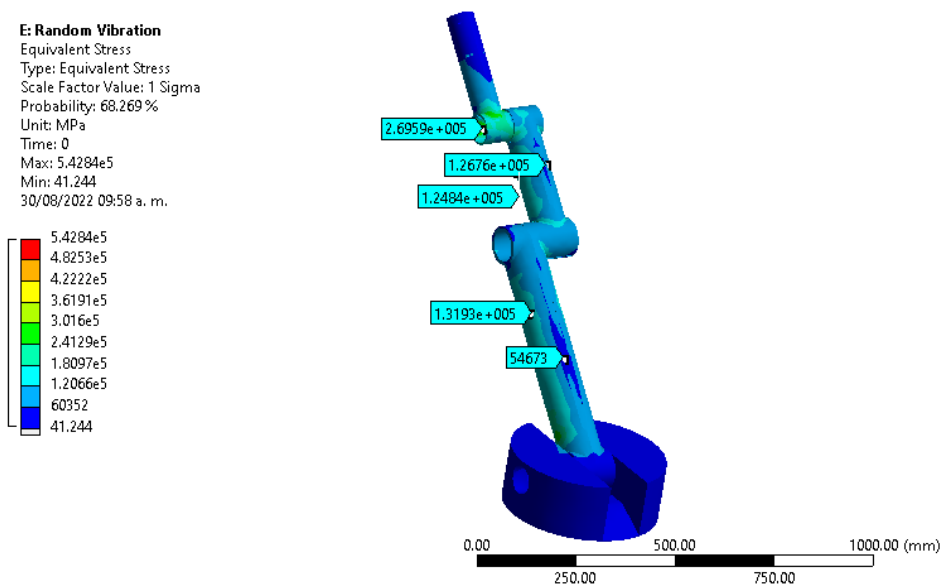
El ensamblaje ya es considerado con mayor importancia en este modelo y cuenta con refuerzos en las zonas más expuestas a esfuerzos con materiales más resistentes, en este caso el acero estructural A-36 y el grosor en paredes se mantiene, hecho el modelo CAD pasa nuevamente por ANSYS, los resultados arrojan una falla por fatiga donde a pesar de absorber los esfuerzos más altos los soportes fallan por fatiga, además genera más puntos débiles.

Imagen 12. Resultado del factor de seguridad de la segunda iteración expuesta a fatiga hecho en elementos finitos.



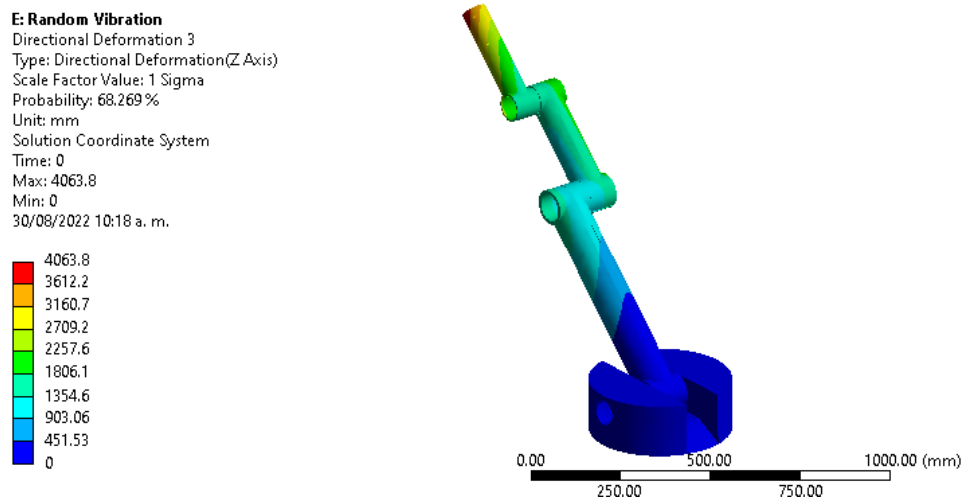
Las vibraciones aleatorias son más fuertes en este caso y como puede notarse en la siguiente imagen que los esfuerzos son mucho más elevados debido a la deformación que genera el aluminio contra el acero debilitando la estructura:

Imagen 13. Resultado de esfuerzos de la segunda iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.



La deformación fue mucho mayor al modelo anterior, lo que también explica el aumento en los esfuerzos, como la imagen a continuación lo puede expresar:

Imagen 14. Resultado de deformación de la segunda iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.

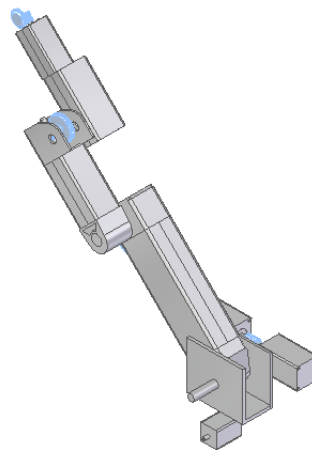


7.4. Tercera iteración

El modelo se simplificó aún más y se introdujeron los sólidos de los motores y mecanismos de movimiento, la masa total es de 86.1 Kg sin contar la base, a partir de esta iteración los mecanismos son tomados como parte de todo el sistema para las simulaciones en CAE.

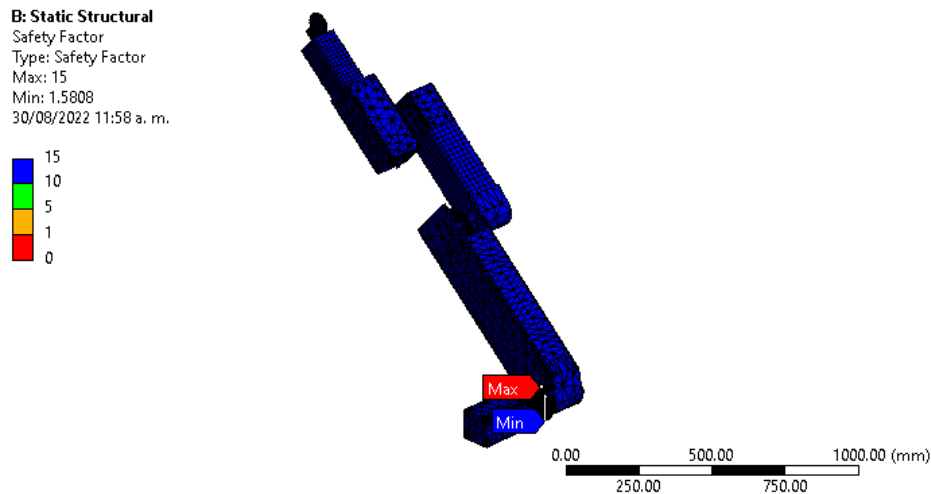
El modelo CAD a continuación considera un ensamblaje más realista y considera mucho más la resistencia a deformación y esfuerzos.

Imagen 15. Modelo CAD de la cuarta iteración del brazo robótico articulado.



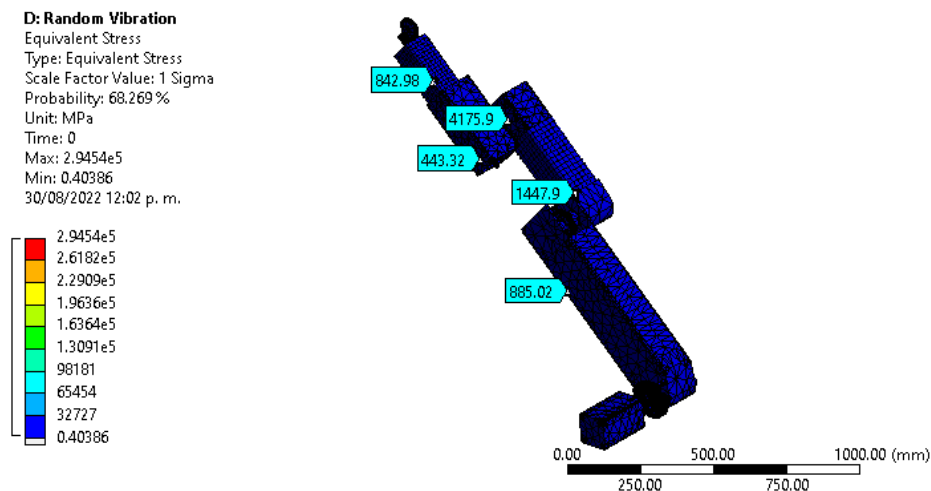
La mejoría es evidente la mejoría para el factor de seguridad en fatiga, aunque cuenta hay mucho que se puede compactar y reducir. En esta iteración se incorporó engranajes de tornillo sin fin, y engranajes rectos, en este aspecto puede seguir reducirse aún más.

Imagen 16. Resultado de resistencia a la fatiga de la tercera iteración expuesta a las cargas hecho en elementos finitos



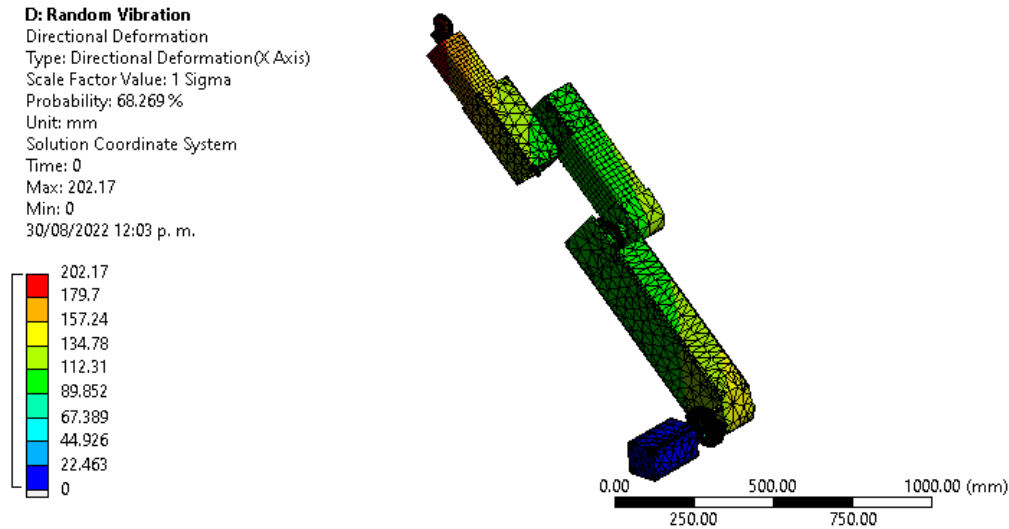
Los esfuerzos se reducen casi por la mitad y la geometría cuenta con una mayor firmeza, así como se ve en la siguiente página.

Imagen 17. Resultado de esfuerzos de la tercera iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.



La deformación por vibración, así como los esfuerzos se reducen a la mitad y a diferencia de la iteración anterior, esta deformación esta más dirigida por la unión entre la base y la extensión del brazo, como lo ilustra la siguiente imagen:

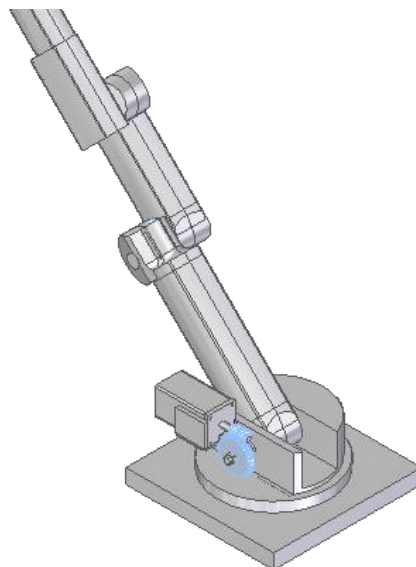
Imagen 19. Resultado de simulación de vibraciones aleatorias



7.5. Cuarta iteración

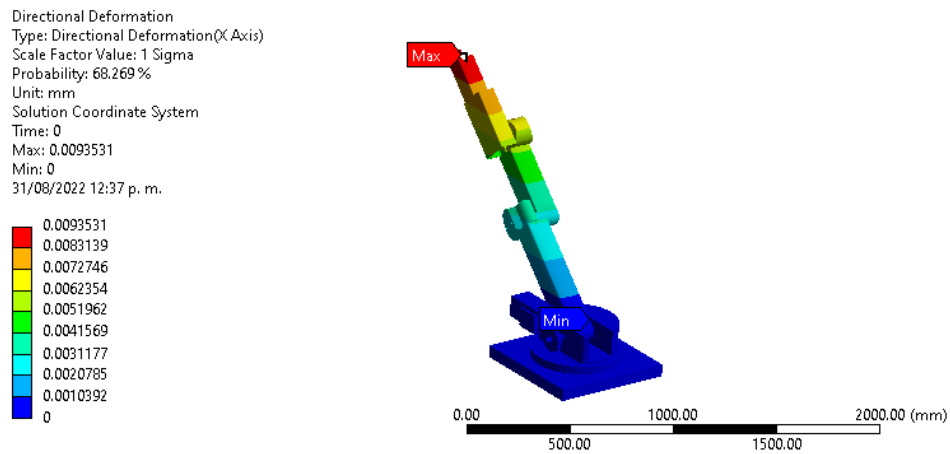
La siguiente iteración provee una imagen más apegada a todos los aspectos necesarios y mejorado la geometría con una masa total de 31.6 kg de masa en los eslabones y 82 kg incluyendo la base, reforzando las uniones y reduciendo en lo posible los concentradores de

Imagen 20. Modelo CAD de la cuarta iteración del brazo articulado.



esfuerzo esta iteración represento reducción del 63.3% de peso, cambiando mecanismos de transmisión de potencia. (explicación de la razón en la elección de engranes sin fin)

Imagen 22. Resultado de deformación de la cuarta iteración expuesta a vibraciones aleatorias hecho en elementos finitos.



7.6. Quinta iteración

La quinta iteración es la última que contempla el movimiento, ensamble, construcción final y relaciona todo lo que refiere a optimización. Así fue posible obtener una mejoría sustancial de reducción de peso, contemplando el menor tiempo posible de fabricación y refinamiento.

Imagen 23. modelo CAD de la sexta iteración del brazo robótico

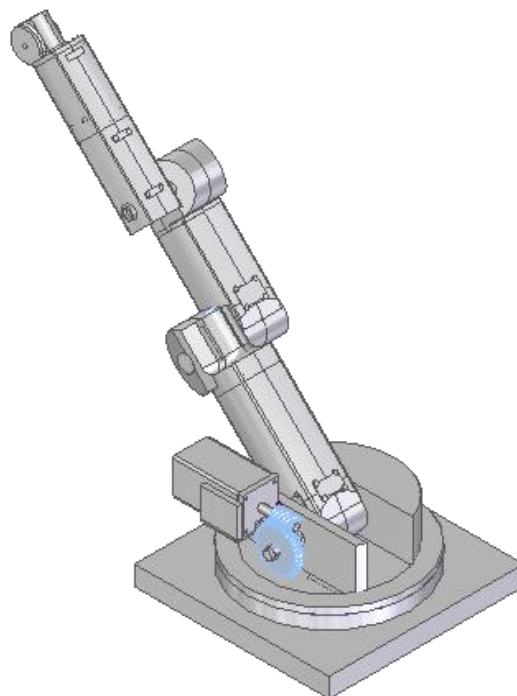


Imagen 21. Resultado del factor de seguridad expuesta a fatiga de la cuarta iteración hecho en elementos finitos.

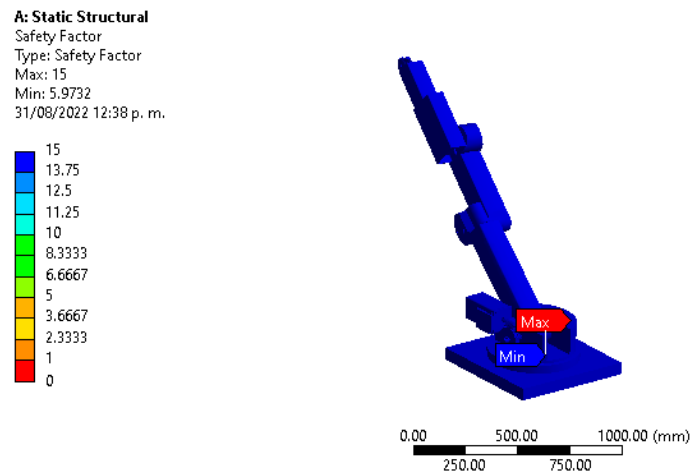
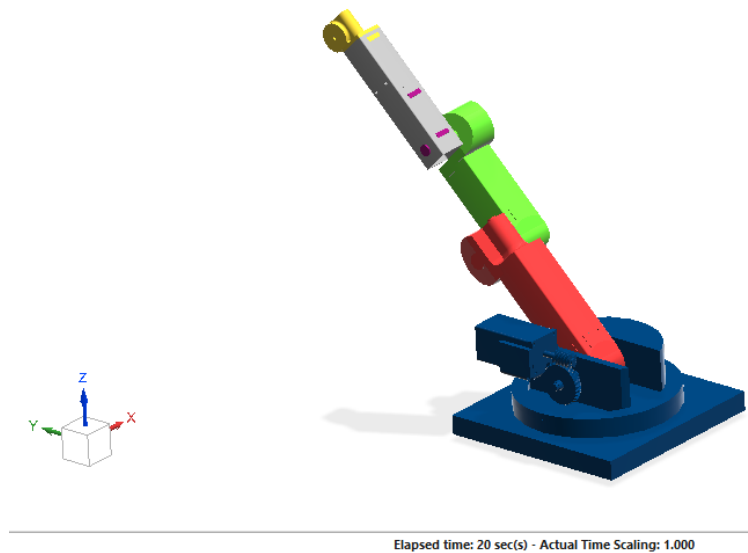
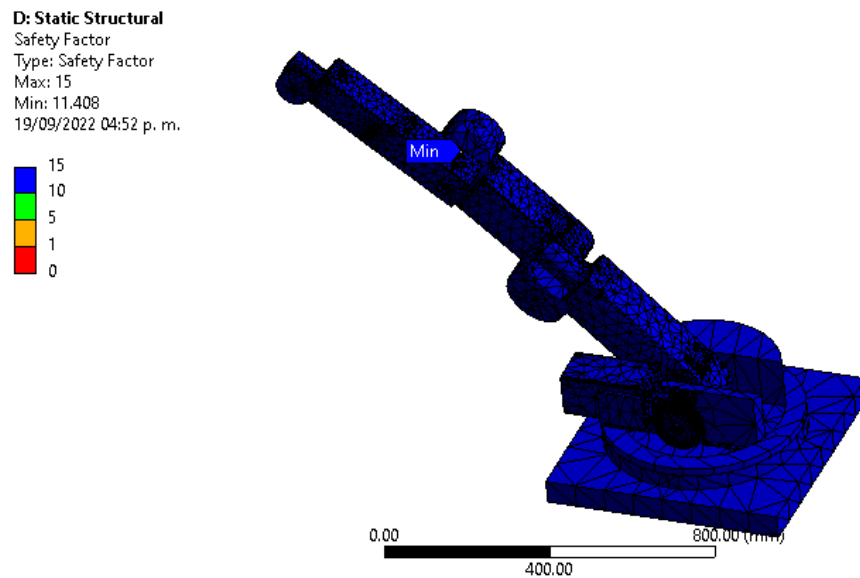


Imagen 24. Simulación de movimiento en NX del brazo estirado a 45 ° sin carga



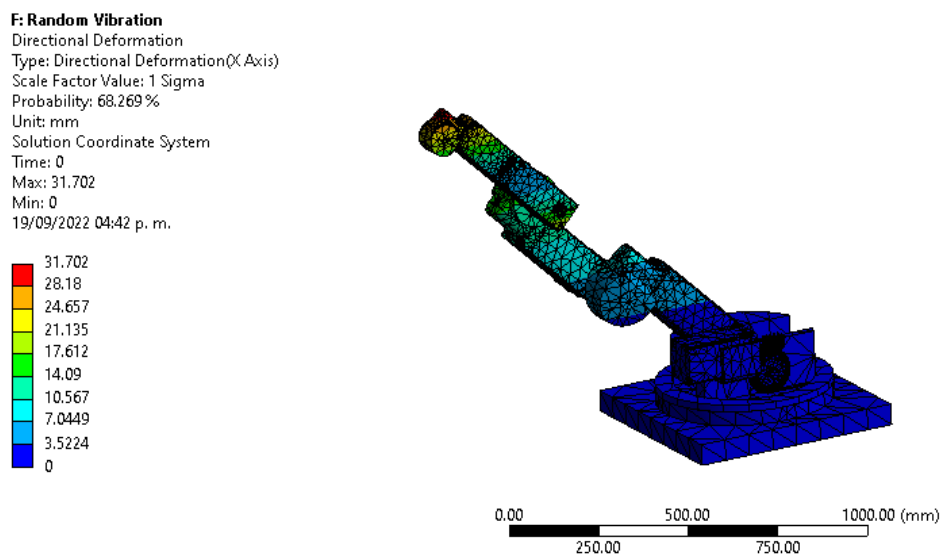
La simulación por MCD arroja el estado de la quinta iteración el brazo es capaz de sostenerse y moverse sin ninguna restricción, aunque fue necesario realizar correcciones para la fluidez y soporte en general del dispositivo (Rodríguez, 2015).

Imagen 25. Resultado del factor de seguridad por fatiga.



El factor de seguridad aumenta, aunque la sección transversal no haya sido modificada, esto se debe a que la sección con menor factor de seguridad fue reforzada a razón de un error de diseño identificado en la simulación en NX.

Imagen 26. Resultado de deformación por vibraciones aleatorias.



7.7. Simulación en NX:

La simulación en MCD reconoce todos los aspectos relacionados al movimiento y reconoce las variables como velocidad angular, torque, aplicación de perfiles de motores, relación de engranajes, una gran variedad de sistemas de sistemas de control.

- Inicialmente se incorpora el sistema de cuerpo rígido para definir la masa, material e inercia dentro de cada componente del brazo robótico.
 - El pasado de la base al eslabón AC deberá añadirse al eslabón AC para funcionar en las siguientes uniones.
 - Es necesario que en el eslabón CD se añada el pasador C que servirá como base para las siguientes uniones.
 - Es necesarios que el eslabón DE se añada el pasado D que servirá como base para las siguientes uniones.

imagen 26. Inserción de masa e inercia en simulación MCD

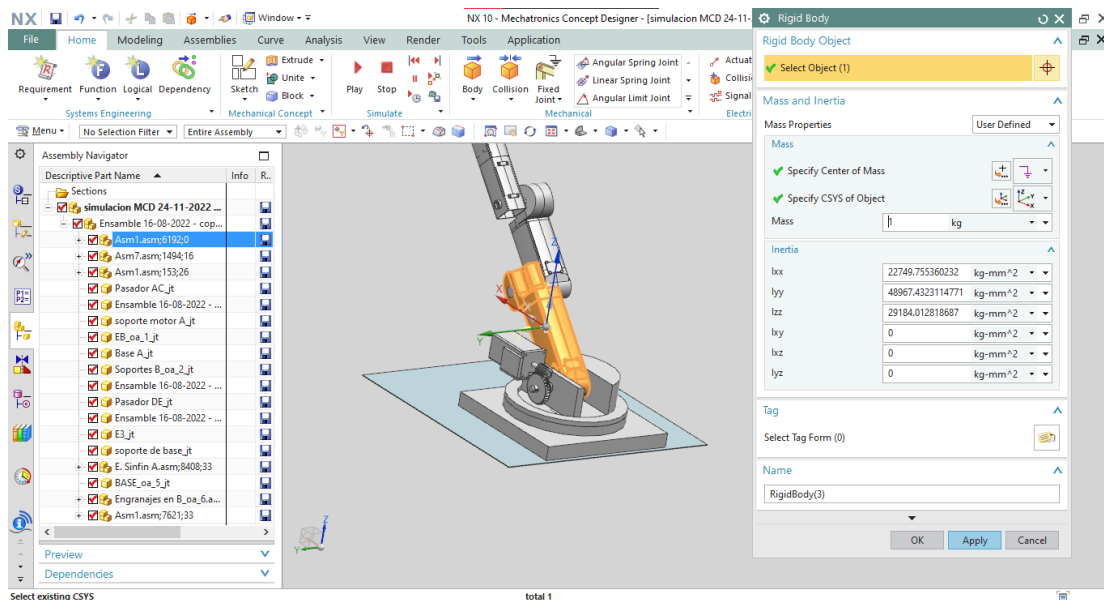
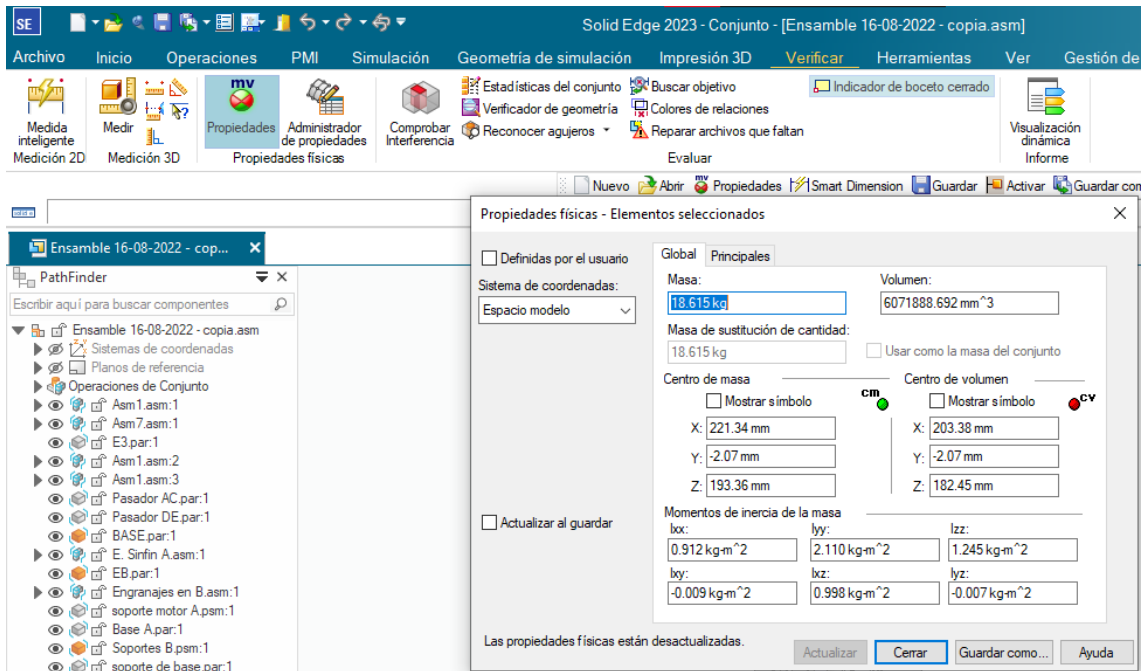
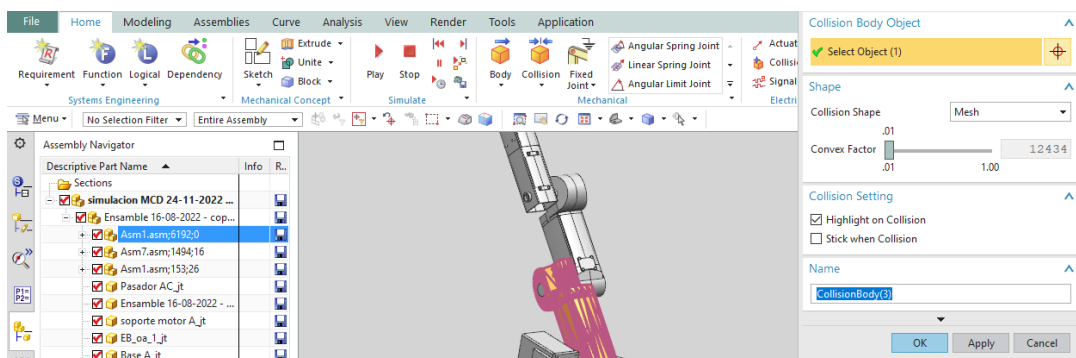


imagen 27. Datos de masa e inercia



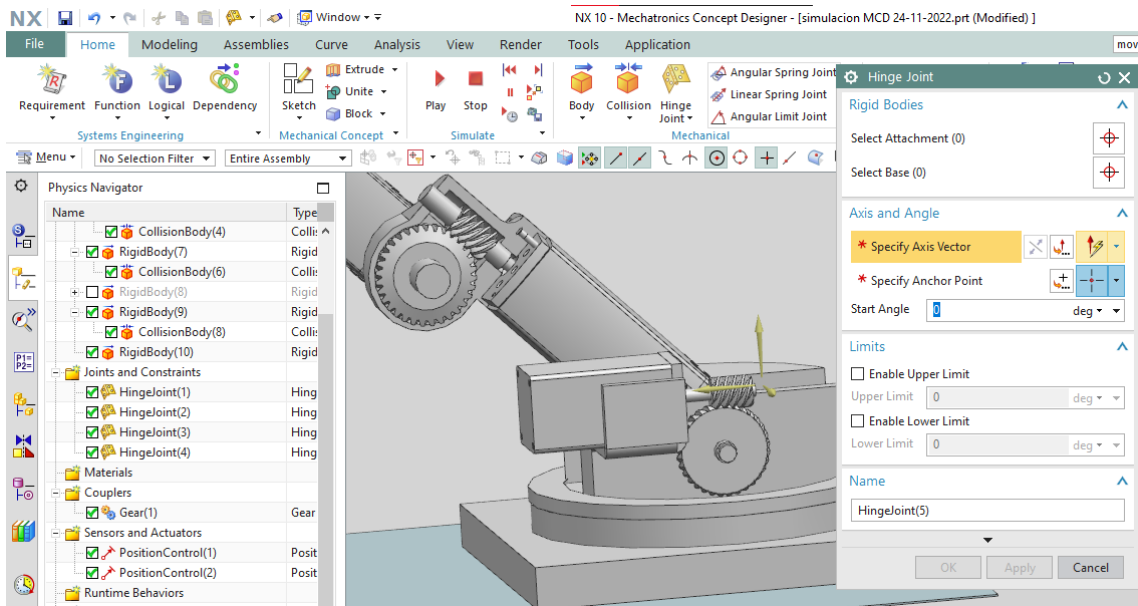
- Sobre el sistema de cuerpo rígido se incorpora el sistema de colisión, así el brazo puede sostener y evitar atravesarse entre los componentes.
 - El tipo de modelado de colisión debe ser enmallado para que el programa amolde la superficie de colisión sobre el modelo.
 - El enmallado de lo posible debe ser el mas pequeño para evitar posibles movimientos no deseados como extracciones o elementos disparados fuera del modelo.

Imagen 29. Inserción de función de colisión



- Posteriormente se ajustan las juntas de bisagra, ya que le brazo funciona con este tipo de juntas se inicia con:
 - Como se expuso anteriormente la base será el eslabón AC y la junta será el pasador C que está unido al eslabón CD.
 - La junta ED se añadirá directamente con el eslabón EF ya que están en el mismo plano de movimiento no es necesario realizar más procedimientos.

imagen 30. Inserción de juntas de bisagra



- El movimiento puede realizarse a partir de dos posibilidades, directo e indirecto:
 - El directo se refiere a incorporar el torque sobre las partes móviles finales, evadiendo cosas como sistemas de transmisión de potencia, este a su vez fue el usado debido a la baja capacidad de cómputo que requiere.
 - El indirecto incorpora todas las partes móviles y requiere que cada parte móvil sea independiente en cuerpo rígido como sistema de colisión, este usa mucho poder computacional y pueden surgir problemas con el enmallado que no permitan mover el dispositivo.

- Finalmente se define el tipo de actuador en este caso de posicionamiento:
 - Este provee la capacidad de insertar los perfiles de torque y velocidad, en este caso se limito a incorporar el torque y velocidad de diseño.

Presupuesto de piezas

Tabla 6. Presupuesto aproximado de piezas y materiales necesarios

Controladores	referencia	Precio (COP)	subtotal	Total
1	STP-DRV-80100 ⁹	\$1,409,198	\$1,409,198	
5	STP-DRV-6575 ¹⁰	\$455,008	\$2,275,038	\$3,684,237
Motores				
2	STP-MTRH-34127 ¹¹	\$817,247	\$1,634,494	
2	STP-MTRACH-42100 ¹²	\$1,038,124	\$2,076,249	
1	STP-MTRACH-42151 ¹³	\$1,736,097	\$1,736,097	
1	STP-MTRACH-42202 ¹⁴	\$2,129,259	\$2,129,259	\$7,576,098
Añadidos				
3	tornillería ¹⁵	\$23,192	\$69,576	
4	STP-EXTH-020 ¹⁶	\$161,241	\$644,962	
8	STP EXT42H-020 ¹⁷	\$189,955	\$1,519,637	\$2,234,176
Material				
96	piezas de aluminio/kg ¹⁸	\$11,044	\$1,060,212	
80	láminas de aluminio /kg ¹⁹	\$11,044	\$883,510	\$1,943,722
				\$15,438,233

⁹ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 22

¹⁰ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 22

¹¹ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 1

¹² SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 2

¹³ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 2

¹⁴ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 2

¹⁵ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 2

¹⁶ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 22

¹⁷ SureSteep. 2015. "Stepping System Motors." Pag 22

¹⁸ Yiwanhong International Trading Co., Ltd (https://es.made-in-china.com/co_yiwanhong/product_Aluminum-6061-T6-Prices-Per-Kg_reysensng.html)

¹⁹ Yiwanhong International Trading Co., Ltd (https://es.made-in-china.com/co_yiwanhong/product_Aluminum-6061-T6-Prices-Per-Kg_reysensng.html)

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La optimización de la geometría pasa por varias configuraciones desde el diseño conceptual hasta el diseño final el objetivo de obtener la mayor resistencia y el menor peso posible, además de requerir de ajustar segmentos para conservar espacio para los elementos móviles. La limitación de diseño convencional no retrato la imagen final, por lo que el criterio de ingeniería para materiales y geometrías fue fundamental para el proceso.

El uso de softwares CAE y MCD permitieron resaltar características y fallas en el diseño de manera clara, a su vez resaltaron espacios de trabajo para reducir y ajustar en el modelo. Como resultado la geometría requiere menos material sin comprometer la resistencia, a su vez al comprobar el movimiento y mecanismos facilitaron todo tipo de correcciones aspecto fundamental en el proyecto.

Los sistemas de reducción y transmisión de potencia deben siempre considerar todas las opciones posibles, considerando también las limitaciones de dichos tipos. Las herramientas CAD (como Solid Edge) ofrecen herramientas de diseño de una gran variedad de tipos de engranes, así pues, los motores y la distribución de peso como también de inercias se deben de contemplar para obtener el diseño que mas se ajuste a la necesidad.

El control es un aspecto que fue foco para el diseño de este brazo robótico, los motores elegidos se enfocaron en facilitar este aspecto. Aun así, pueden usarse motores de otro tipo, esto puede provocar complicaciones para el desarrollo de mecanismos y controladores, sin embargo, es posible obtener la misma funcionalidad y capacidad de hacer sistemas inteligentes.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Santos, M. 2011. "Un Enfoque Aplicado Del Control Inteligente." *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial* 8(4):283–96.
- Lamb, Frank. 2013. *Industrial Automation Hands-On*.
- Malzahn, Jörn, and Torsten Bertram. 2014. "Collision Detection and Reaction for a Multi-Elastic-Link Robot Arm." *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 19:320–25.
- G. Díaz, 2019 "No Title."
- Duran, Mario, and Nestor Arenas. 2016. "control de un brazo robótico industrial basado en procesamiento de imágenes para la manipulación de piezas."
- Camacho, Edgar, and Fabian Perez. 2016. "Aprendizaje Por Refuerzo Para Manipulación de Objetos Con Actuador Robótico." 1–15.
- Salvucci, Valerio, Yasuto Kimura, Sehoon Oh, and Yoichi Hori. 2011. "BiWi: Bi-Articularly Actuated and Wire Driven Robot Arm." *2011 IEEE International Conference on Mechatronics, ICM 2011 - Proceedings* 827–32.
- Amaya-González, Manuel. 2017. "diseño, simulación y control de un asistente robótico para cirugía laparoscópica."
- Kolbert, Roman, Nikhil Chavan-Dafle, and Alberto Rodriguez. 2017. "Experimental Validation of Contact Dynamics for In-Hand Manipulation." *ArXiv* 1–12.
- Cort, Reyes, Alfaomega Grupo Editor, and Alfaomega Grupo Editor. n.d. "Robótica. Control de Robots Manipuladores - Fernando Reyes Cortés - 1ra Edición." *AlfaOmega* 1–592.
- Crowder, Richard. 2013. *Electric Drives and Electromechanical Systems*. Vol. 53.
- Passino, Kevin M. 2010. "Intelligent Control." *The Control Systems Handbook: Control System Advanced Methods, Second Edition* 10:1213–24.
- Massie, Mason, Maria Yang, and Mason Massie. 2020. "Desing Architecture for Dynamic Low Inertia Multi DOF Robotic Manipulators."
- Cheung, Edward, and Vladimir J. Lumelsky. 1989. "Proximity Sensing in Robot Manipulator Motion Planning: System and Implementation Issues." *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5(6):740–51.

- Chocron, O. 2008. “Evolutionary Design of Modular Robotic Arms.” *Robotica* 26(3):323–30.
- Pérez-D’arpino, Claudia, and Julie A. Shah. 2018. “Observational and Self-Learning of Multi-Step Robotic Manipulation with Unknown Physical Properties.” (NeurIPS).
- Norton, Robert. 2011. *Diseño de Máquinas*. edited by Pearson.
- Ozesmi, M., T. E. Patisroglu, G. Hillerdal, and C. Ozesmi. 1985. “Peritoneal Mesothelioma and Malignant Lymphoma in Mice Caused by Fibrous Zeolite.” *British Journal of Industrial Medicine* 42(11):746–49.
- Anon. n.d. “ABS Material Properties - Food-Grade Plastic.” 130.
- Anon. 2015. “TECAPEEK ® PVX Black - Stock Shapes.” 4029.
- Eli, Sn. 2000. “KS40 KS50 KS70 Ti-6Al-4V.”
- Stichel, W. 1997. *Handbook of Comparative World Steel Standards; USA-United Kingdom-Germany-France-Russia-Japan-Canada-Australia-International*. Hrsg.: Albert & Melilli, 552 Seiten. ASTM Data Series DS 67, American Society for Testing and Materials, PA, USA 1996, £ 195.00, ISBN 0-8031-1825-2. Vol. 48.
- Manjunath, K. T., B. N. Aruna, and Mithun V Kulkarni. 2014. “Tribological Behaviors of ABS Polymer – Metal Sliding Combinations under Dry Friction and Electroplated Conditions.”
- The European Stainless Steel Development Association (Euro Inox). 2007. “Stainless Steel: Tables of Technical Properties.” *Materials and Applications Series* 5:24.
- Severstal. n.d. “Steel Products Catalogue.”
- Al., W. E. Luecke et. 2005. “Mechanical Properties of Structural Steels.” *National Institute of Standards and Technology* 1–288.
- Tensile, Minimum. n.d. “Engineering-CC2015.”
- Tecnol, Talogo D. E. Servicios. 2008. “Alustock, Aluminio Para La Industria.” 1–23.
- Massie, Mason, Maria Yang, and Mason Massie. 2020. “Desing Architecture for Dynamic Low Inertia Multi DOF Robotic Manipulators.”
- Rodríguez, Antonio. 2015. “simulación de un brazo robótico en simmechanics.”
- SureSteep. 2015. “Stepping System Motors.” 2:14–19.

industrial intelligence 4.0_beyond automation _ KUKA AG. (n.d.).

Gonzalez-De-Santos, P., Fernández, R., Sepúlveda, D., Navas, E., Emmi, L., & Armada, M. (2020). Field robots for intelligent farms—inhering features from industry. In *Agronomy* (Vol. 10, Issue 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111638>

Grau, A., Indri, M., lo Bello, L., & Sauter, T. (2017). Industrial robotics in factory automation: From the early stage to the Internet of Things. *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017-January*, 6159–6164. <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217070>

Shariatee, M., Akbarzadeh, A., Mousavi, A., & Alimardani, S. (2014). Design of an economical SCARA robot for industrial applications. *2014 2nd RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics, ICRoM 2014*, 534–539. <https://doi.org/10.1109/ICRoM.2014.6990957>

El-Sayegh, S., Romdhane, L., & Manjikian, S. (2020). A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. In *Archives of Civil and Mechanical Engineering* (Vol. 20, Issue 2). Springer. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>

Barrientos., A., Peñin, L., Balaguer, C., Aracil, R. (1997) Fundamentos de robótica. Universidad politécnica de Madrid, segunda edición. McGraw-Hill

Universal Robots. (2022). *Contacte con un experto en automatización.* <https://www.universal-robots.com/es/>.

KUKA. (2022). *industrial intelligence 4.0_beyond automation _ KUKA AG.* <https://www.kuka.com/es-es>.

Dobot. (2022). *Robot Arm – Dobot Store.* <https://en.dobot.cn/>.

FANUC. (2022). *Robots industriales FANUC para una automatización más inteligente.* <https://www.fanuc.eu/es/es/robots>.

ABB. (2022). *ABB Líder en tecnologías digitales para la industria.* <https://new.abb.com/south-america>.

9. LISTADO DE ANEXOS

- Base A.dft
- Base A.pdf
- Base B.dft
- Base B.pdf
- Base C.dft
- Base C.pdf
- Base.dft
- CAD (Engranajes 07-07-2022)
- CAD (eslabones 02-05-2022)
- CAD (eslabones 17-03-2022)
- CAD (eslabones 26-03-2022)
- Definitivo
- Eje A.dft
- Eje A.pdf
- Eje B.dft
- Eje B.pdf
- Eje de transmision.dft
- Eje de transmision.pdf
- Engranaje A .dft
- Engranaje A .pdf
- Engranaje B.dft
- Engranaje B.pdf
- Engrane C.dft
- Engrane C.pdf
- Engrane cicloidal.dft
- Engrane cicloidal.pdf
- Engrane D.dft
- Engrane F.dft
- Engrane F.pdf
- Engrane fijo cicloidal.dft
- Ensamble eslabon AC.dft
- Ensamble eslabon AC.pdf
- Ensamble eslabon CD.dft
- Ensamble eslabon CD.pdf
- Ensamble eslabon DE.dft
- Ensamble eslabon DE.pdf
- Ensamble eslabon EF.dft
- Ensamble eslabon EF.pdf
- Ensamble explosivo.dft
- Ensamble explosivo.pdf
- Ensamble.dft
- Ensamble.pdf

- Eslabon AC (A).dft
- Eslabon AC (A).pdf
- Eslabon AC (B).dft
- Eslabon AC (B).pdf
- Eslabon AC (C1) .dft
- Eslabon AC (C1) .pdf
- Eslabon AC (C2).dft
- Eslabon AC (C2).pdf
- Eslabon AC pasador.dft
- Eslabon AC pasador.pdf
- Eslabon CD (A).dft
- Eslabon CD (A).pdf
- Eslabon CD (B).dft
- Eslabon CD (B).pdf
- Eslabon CD (C1).dft
- Eslabon CD (C2).dft
- Eslabon CD (C2).pdf
- Eslabon DE (B1).dft
- Eslabon DE (B1).pdf
- Eslabon DE (B2) .dft
- Eslabon DE (B2) .pdf
- Eslabon EF (B) .dft
- Eslabon EF (B) .pdf
- Eslabon EF (C1) .dft
- Eslabon EF (C1) .pdf
- Eslabon EF (C2).dft
- Eslabon EF (C2).pdf
- Explosivo AC.dft
- Explosivo AC.pdf
- Explosivo CD.dft
- Explosivo CD.pdf
- Explosivo DE.dft
- Explosivo DE.pdf
- Explosivo EF.dft
- Explosivo EF.pdf
- lista.txt
- Pasador C.dft
- Pasador C.pdf
- Pasador D.dft
- Pasador D.pdf
- Simulacion 16-08-2022
- Simulacion de carcaza 04-08-2022
- Simulacion de carcaza 22-03-2022
- Simulacion de carcaza 28-03-2022)

- Soporte A .dft
- Soporte A .pdf
- STP-MTRAC-42100.pdf
- STP-MTRAC-42151.pdf
- STP-MTRH-34127D.pdf
- Tornillo A.dft
- Tornillo A.pdf
- Tornillo B.dft
- Tornillo B.pdf
- Tornillo C.dft
- Tornillo C.pdf
- Tornillo D.dft
- Tornillo F.dft
- Tornillo F.pdf