PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

MODALIDAD: PROYECTO TECNOLÓGICO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO DE 3 GRADOS DE LIBERTAD EN EL HOMBRO PARA APOYAR LOS BRAZOS

PRESENTAN:

MARTÍNEZ JIMÉNEZ JOSHUA
2152003400

VENEGAS ANAYA JUAN ABRAHAM
2153035595

ASESOR: ING. ROMY PÉREZ MORENO

CO-ASESOR: ING. MIGUEL EDUARDO RANGEL CORDERO

TRIMESTRE 21-I

CIUDAD DE MÉXICO A 23 JULIO DE 2021.

Yo, Romy Pérez Moreno, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco

Romy Pérez Moreno

Yo, Miguel Eduardo Rangel Cordero, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco

Miguel Eduardo Rangel Cordero

Yo, Joshua Martínez Jiménez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Joshua Martínez Jiménez

Yo, Juan Abraham Venegas Anaya, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Juan Abraham Venegas Anaya

Universidad Autónoma Metropolitana
Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

CBI DIVISIÓN CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: 20-P Fecha: 13/noviembre/2020 PI-A-MEC 017-20

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: Joshua Martínez Jiménez Matrícula: 2152003400

Correo personal: joshuam9616@gmail.com

Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa: Romy Pérez Moreno

No. económico: 23812 Adscripción/Departamento/Sección: Departamento de Energía

Área de investigación: Grupo Mécanica de Frontera

Correo institucional: romy@azc.uam.mx

Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal: Miguel Eduardo Rangel Cordero

No. económico/Teléfono: 42087 Adscripción/Puesto: Departamento de Energía

Área de investigación/Departamento:

Correo electrónico: merc@azc.uam.mx

Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

(●) Proyecto tecnológico ( ) Proyecto de investigación ( ) Estancia profesional ( ) Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto de 3 grados de libertad en el hombro para apoyar los brazos.

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: (●) No ( ) Sí Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un exoesqueleto de 3 grados de libertad para reducir el riesgo de sufrir afecciones musculoesqueléticas en brazos al operar una herramienta de peso no mayor a 2.5 kg para las tareas de pintura e instalaciones eléctricas.

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	SI	Inicio: 20-O
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II		Término: 21-I
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica		

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

Ing. Romy Pérez Moreno

Universidad Autónoma Metropolitana Casa abierta al tiempo Azcapotzalco CBI DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
18 NOV 2020
COORDINACIÓN DE MECÁNICA

Sello de la Coordinación de Estudios

Revisión: Febrero 2016

Originales: Coordinador de Estudios; Coordinación de Sistemas Escolares.
Copias: Alumno; Asesor(es).

Universidad Autónoma Metropolitana
Casa abierta al tiempo Azcapotzalco

AUTORIZACIÓN DE INSCRIPCIÓN A PROYECTO DE INTEGRACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA

CBI DIVISIÓN CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

PI-A-MEC

Trimestre en que se autoriza la propuesta: 20-P Fecha: 13/NOVIEMBRE/2020 PI-A-MEC 017-20

DATOS DEL ALUMNO

Nombre: JUAN ABRAHAM VENEGAS ANAYA Matrícula: 2153035595

Correo personal: al2153035595@azc.uam.mx

Firma

ASESOR RESPONSABLE / DATOS DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Empresa: ROMY PÉREZ MORENO

No. económico: 23812 Adscripción/Departamento/Sección: ENERGÍA

Área de investigación: GRUPO MECÁNICA DE FRONTERA

Correo institucional: romy@azc.uam.mx

Firma

COASESOR O ASESOR EXTERNO / JEFE O RESPONSABLE LEGAL DE LA EMPRESA

Nombre del asesor/Jefe o Responsable legal: MIGUEL EDUARDO RANGEL CORDERO

No. económico/Teléfono: 42087 Adscripción/Puesto: ENERGÍA

Área de investigación/Departamento:

Correo electrónico: merc@azc.uam.mx

Firma

MODALIDAD DEL PROYECTO

(•) Proyecto tecnológico ( ) Proyecto de investigación ( ) Estancia profesional ( ) Experiencia profesional

TÍTULO DEL PROYECTO

Diseño y construcción de un prototipo de exoesqueleto de 3 grados de libertad en el hombro para apoyar los brazos.

Proyecto de Integración asociado a un Proyecto de Investigación: (•) No ( ) Sí Clave (?):

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un exoesqueleto de 3 grados de libertad para reducir el riesgo de sufrir afecciones musculoesqueléticas en brazos al operar una herramienta de peso no mayor a 2.5 kg para las tareas de pintura e instalaciones eléctricas.

UNIDADES DE ENSEÑANZA APRENDIZAJE ASOCIADAS AL PROYECTO DE INTEGRACIÓN

Clave	UEA	UEA Autorizada	Vigencia
1100118	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I	SÍ	Inicio: 20 O
1100128	Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica II		Término: 21 I
1100138	Introducción al Trabajo de Investigación en Ingeniería Mecánica		

Nombre y firma del Coordinador de Estudios

Ing. Romy Pérez Moreno

Universidad Autónoma Metropolitana Casa abierta al tiempo Azcapotzalco CBI DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
18 NOV 2020
COORDINACIÓN DE MECÁNICA

Sello de la Coordinación de Estudios

Revisión: Febrero 2016

Originales: Coordinador de Estudios; Coordinación de Sistemas Escolares.
Copias: Alumno; Asesor(es).

DEDICATORIA

Joshua Martínez Jiménez:

A Dios le doy gracias por brindarme la fortaleza y concederme "la serenidad para aceptar todo aquello que no puedo cambiar, valor para cambiar lo que soy capaz de cambiar y la sabiduría para entender la diferencia."

A mi Madre, por apoyarme en todo momento de mi vida, sin ti, esto no hubiera sido posible, gracias por enseñarme a ser un luchador y persistir por lo que se anhela. Por ponerme en tus oraciones y bendiciones.

A mi Padre, por inculcarme de desde pequeño la perseverancia y paciencia para luchar contra cualquier adversidad. Al formar el tipo de hombre que soy hoy en día, enseñándome que "Todo a su tiempo y todo a su momento". Y que todo en esta vida tiene un motivo por el cual existe.

A mi tía, por apoyar a mi madre emocional y económicamente. Este logro se lo dedico en nombre de Brando mi primo que siempre estará en nuestros corazones.

A mi hermana, por escucharme y comprenderme, eres una parte importante en mi vida, gracias por presumir mis logros.

A mi amiga Paulina, gracias por acompañarme en gran parte de la carrera, por motivarme a nunca rendirme y a no conformarme con poco.

A mis amigos, por compartir este corto periodo de mi vida, gracias por siempre acompañarme y brindarme su amistad y confianza, siempre los recordaré, me dejan grandes enseñanzas, espero que esta amistad perdure y no se pierda el contacto.

RESUMEN

Este proyecto presenta el desarrollo de un prototipo de exoesqueleto pasivo para la parte superior del cuerpo con apoyo específico a los brazos. El desarrollo de este trabajo contempla tres etapas que se describen a continuación:

1. Etapa de Investigación: En esta etapa se hizo una recopilación de algunos de los exoesqueletos comerciales con más presencia en el mercado con el fin de analizar y definir qué elementos de estos servirían de base para proponer y desarrollar un prototipo propio.
2. Etapa de Diseño: Aquí se desarrollaron tres propuestas de diseño que darían forma al prototipo final del exoesqueleto. En esta etapa se propusieron dos diseños iniciales de los cuales se obtuvo un tercero que fungiría como prototipo final. Al prototipo final se le hicieron los cálculos pertinentes a cada una de sus piezas para dar certeza de su funcionalidad.
3. Etapa de construcción: Considerando cada uno de los elementos que conformarían al prototipo final, en esta etapa se hizo un análisis de cómo se maquinaría y ensamblaría cada elemento, con el fin de estimar costos, definir materiales, así como los modos y tipos de maquinado.

Al final del documento se describe la propuesta final del prototipo construido, se hace un análisis de los resultados obtenidos y de su funcionamiento colocando el exoesqueleto en un usuario disponible al momento para simular las tareas de pintar o las propias de un electricista. Se exponen las conclusiones obtenidas según los objetivos y parámetros esperados.

CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN 9

II. ANTECEDENTES 10

III. JUSTIFICACIÓN 11

IV. OBJETIVOS 12

OBJETIVO GEN ERAL 12

OBJETIVOS PARTICULARES 12

V. MARCO TEÓRICO 13

TEORÍA DE FALLA MECÁNICA ANTE CARGAS ESTÁTICAS 13

Concentración de esfuerzo 14

Carga estática 14

Teoría de Energía de Distorsión para materiales dúctiles (Esfuerzo de Von Mises) 15

MECANISMO DE GINEBRA 15

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES 15

Diseño asistido por computadora (CAD) 15

Ingeniería asistida por computadora (CAE) 15

Análisis de Elementos Finitos 16

VI. DESARROLLO 17

ETAPA DE INVESTIGACIÓN 17

ETAPA DE DISEÑO 19

PROPUESTA I 20

PROPUESTA II 23

PROPUESTA III 26

ANÁLISIS DE ESFUERZOS 31
Descripción de fuerzas 31
Sistema rotacional de niveles de fuerza 31
Simulación de esfuerzos de las piezas 36
ENSAMBLE GENERAL DEL EXOESQUELETO (PROTOTIPO FINAL) 71
Amplitud y rango de movimiento en eslabones y caja de torque 72

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN 83
PROCESO DE FABRICACIÓN 83
ESTIMACIÓN DE COSTOS 88
Costos directos de fabricación 88
Gastos indirectos de fabricación 89

VII.RESULTADOS 90

SUBENSAMBLE INFERIOR 90

SUBENSAMBLE CENTRAL 92

SUBENSAMBLE SUPERIOR 93

SUBENSAMBLE DE CAJA DE TORQUE 94

ENSAMBLE FÍSICO 96

ANÁLISIS DE RESULTADOS 98

ANÁLISIS CUANTITATIVO 98

ANÁLISIS CUALITATIVO 99

VIII. CONCLUSIONES 102

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104

X. DIBUJOS DE DEFINICIÓN 105

OBTENCIÓN DE TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS.....104

XII. ANEXOS.....129

ENTREGABLESS..... 129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Exoesqueletos pasivos comerciales. 17
Figura 2. CAD de Prototipo I. Vista isométrica. 20
Figura 3. Prototipo I. Vista posterior. 21
Figura 4. Prototipo I. Vista lateral derecha. 21
Figura 5. Grados de libertad (revolutas) en prototipo I. 22
Figura 6. Grados de libertad (prismáticas) en prototipo I. 22
Figura 7. CAD de Prototipo II. Vista isométrica. 23
Figura 8. Prototipo II. Vista posterior. 24
Figura 9. Prototipo II. Vista lateral derecha. 24
Figura 10. Grados de libertad (revolutas) en prototipo II. 25
Figura 11. Grados de libertad (prismáticas) en prototipo II. 25
Figura 12. CAD de Prototipo III. Vista isométrica. 26
Figura 13. Prototipo III. Vista posterior. 27
Figura 14. Prototipo III. Vista lateral derecha. 27
Figura 15. Grados de libertad (prismáticas) en prototipo III. 28
Figura 16. Grados de libertad (revolutas) en prototipo III. 28
Figura 17, Piezas que conforman Propuesta III de exoesqueleto. 30
Figura 18. Piezas que conforman la Caja de torque. 30
Figura 19. Faja (propuesta inicial). 37
Figura 20. Faja (Primera modificación). 37
Figura 21. Faja (segunda y última modificación). 37
Figura 22. Faja (propuesta final). Propiedades volumétricas de la pieza. 38
Figura 23. Esfuerzos de Von-Mises generado en la placa. 39
Figura 24. Deformación total presente en la placa. 39

Figura 25. Soporte de tubo (primera propuesta). 40
Figura 26. Soporte de tubo (segunda propuesta). 40
Figura 27. Soporte de tubo (tercera propuesta). 41
Figura 28. Soporte de tubo (propuesta final). Propiedades volumétricas de la pieza. 41
Figura 29. Esfuerzos de Von-Mises generados en la pieza. 43
Figura 30. Deformación total presente en la pieza. 44
Figura 31. Soporte lumbar (primera propuesta) 44
Figura 32. Soporte lumbar (segunda propuesta). 44
Figura 33. Soporte lumbar alternativo a segunda propuesta. 45
Figura 34. Soporte lumbar (tercera propuesta). 45
Figura 35. Soporte lumbar (propuesta final): Propiedades volumétricas de la pieza. 46
Figura 36. Esfuerzos de Von-Mises generados en el soporte lumbar. 48
Figura 37. Deformación total presente en el soporte lumbar. 48
Figura 38. Torso (primera propuesta) 49
Figura 39. Torso (segunda propuesta) 49
Figura 40. Torso (tercera propuesta). 49
Figura 41, Torso (propuesta final): Propiedades volumétricas de la pieza. 50
Figura 42. Esfuerzos de Von-Mises generados en la pieza torso. 52
Figura 43. Deformación total presente en la pieza torso. 52
Figura 44. Muelle (primera propuesta). 53
Figura 45. Muelle (segunda propuesta). 53
Figura 46.. Muelle (tercera propuesta). 53
Figura 47. Muelle (propuesta final): Propiedades volumétricas de la pieza. 54
Figura 48. Esfuerzos de Von-Mises generados en el muelle. 54
Figura 49. Deformación total presente en el muelle. 55
Figura 50. Eslabón intermedio (propuesta inicial). 55
Figura 51. Eslabón intermedio (primera modificación): 55
Figura 52. Eslabón intermedio (propuesta final): Propiedades volumétricas. 56
Figura 53. Esfuerzos de Von-Mises generados en el eslabón intermedio. 58
Figura 54. Deformación total presente en Eslabón intermedio. 59
Figura 55. Acoplador: Propiedades volumétricas. 59
Figura 56. Esfuerzos de Von-Mises generados en el acoplador. 61

Figura 57. Deformación total presente en el acoplador. 61
Figura 58. Eslabón exterior: propiedades volumétricas..... 62
Figura 59. Esfuerzos de Von-Mises generados en el eslabón exterior. 64
Figura 60. Deformación total presente en el eslabón exterior. 64
Figura 61. Caja de resorte 65
Figura 62. Deformación total presente en la caja de resorte. 66
Figura 63. Resorte del mecanismo de Ginebra. 66
Figura 64. Esfuerzos de Von-Mises generados en el resorte. 69
Figura 65. Deformación total presente en el resorte de espiral. 69
Figura 66. Mecanismo de Ginebra. 70
Figura 67. Deformación total presente en el mecanismo de Ginebra. 70
Figura 68. Representación gráfica del uso del exoesqueleto (vista posterior en modelo de alambre). 71
Figura 69. Representación gráfica del uso del exoesqueleto (vista isométrica en modelo de alambre). 72
Figura 70. Grados de amplitud alcanzados por la caja de torque. 73
Figura 71. Amplitud alcanzada en eslabones superiores. 74
Figura 72. Grados de amplitud en eslabones (acoplador, eslabón central y exterior). 75
Figura 73. Faja. 76
Figura 74. Soporte de tubo. 76
Figura 75. Tubo lumbar. 76
Figura 76. Abrazadera 76
Figura 77. Torso. 77
Figura 78. Abrazadera torso. 77
Figura 79. Muelle..... 77
Figura 80. Tubo vertical. 77
Figura 81. Acoplador. 77
Figura 82. Eslabón interno. 77
Figura 83. Eslabón externo..... 77
Figura 84. Caja de torque. 78
Figura 85. Componentes de caja de torque. 78
Figura 86. Base de carcasa 79

Figura 87. Carcasa posterior. 79
Figura 88. Carcasa frontal. 79
Figura 89. Resorte de espiral. 79
Figura 90. Mecanismo de rueda de Ginebra. 79
Figura 91. Rueda indicadora. 80
Figura 92. Tornillo de mecanismo. 80
Figura 93. Tornillo de eje de centro. 80
Figura 94. Eje de centro. 80
Figura 95. Corredera móvil. 80
Figura 96. Corredera fija. 80
Figura 97. Perno de bloqueo. 80
Figura 98. Esfera de acero. 80
Figura 99. Soporte para brazo. 80
Figura 100. Pivote de carcasa. 80
Figura 101. Vistas del exoesqueleto diseñado en Inventor (a-d). 82
Figura 102. Diagrama de operación para la faja. 83
Figura 103. Diagrama de operación para el soporte de tubo. 84
Figura 104. Diagrama de operación para tubo lumbar. 84
Figura 105. Diagrama de operación para torso. 85
Figura 106. Diagrama de operación para el muelle. 85
Figura 107. Diagrama de operación para el acoplador. 86
Figura 108. Diagrama de operación para eslabón central. 86
Figura 109. Diagrama de operación para eslabón exterior. 87
Figura 110. Diagrama de operación para tubo vertical. 87
Figura 111. Diagrama de operación para caja de torque. 88
Figura 112. Subensamble inferior. 90
Figura 113. Subensamble central. 92
Figura 114. Subensamble superior. 93
Figura 115. Subensamble de Caja de torque. 94
Figura 116. Vista lateral de exoesqueleto armado. 96
Figura 117. Vista frontal de exoesqueleto armado. 97
Figura 118. Vista posterior de exoesqueleto armado. 97

Figura 119. Ajuste del exoesqueleto puesto en algún voluntario..... 98
Figura 120. Exoesqueleto durante el proceso de maquinado y ensamble.....129
Figura 121. Exoesqueleto armado.....130
Figura 122. Piezas obtenidas mediante impresión 3D (caja de torque).....131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de los exoesqueletos analizados..... 18
Tabla 2. Criterios de diseño considerados para el prototipo. 19
Tabla 3. Masa de cada elemento que compone al mecanismo. 33
Tabla 4. Niveles de fuerza considerados por el brazo. 33
Tabla 5. Niveles de fuerza considerados por la herramienta de trabajo. 34
Tabla 6. Descripción de niveles de fuerza (masa de herramienta vs masa del brazo). 34
Tabla 7. Niveles de fuerza considerados para ajustar el exoesqueleto. 34
Tabla 8. Niveles de fuerza aplicados según altura y peso del operario. 35
Tabla 9. Ajuste de tallas en cintura y torso según operario. 35
Tabla 10. Ajuste de talla en brazo según operario. 36
Tabla 11. Evolución de modificaciones en pieza faja. 37
Tabla 12. Evolución en pieza Soporte de tubo. 40
Tabla 13. Evolución pieza soporte lumbar 44
Tabla 14. Evolución en pieza torso. 49
Tabla 15. Evolución de modificaciones en pieza muelle. 53
Tabla 16. Evolución de modificaciones en pieza Eslabón Intermedio. 55
Tabla 17. Parámetros del resorte. 67
Tabla 18. Propiedades físicas de partes que componen el prototipo. 82
Tabla 19. Costos para la creación del prototipo. 89
Tabla 20. Partes maquinadas que conforman al subensamble inferior. 91
Tabla 21. Partes que conforman el subensamble central. 92
Tabla 22. Partes que conforman el subensamble superior. 94
Tabla 23. Partes que conforman el subensamble de la caja de torque. 95
Tabla 24. Descripción física de partes (experimental). 99
Tabla 25. Formato piloto para prueba de voluntario del prototipo. 101
Tabla 26. Tolerancias y dimensiones geométricas entre piezas. 106

INTRODUCCIÓN

Hoy en día muchos puestos de trabajo aún siguen requiriendo de operaciones complejas para desarrollar ciertos procesos productivos en los que no es posible implementar la automatización de estos. Aunque por un lado se logra mejorar el proceso de producción al emplear operarios en ciertas actividades, por otro lado, se descompensa el mismo proceso al exponer a los trabajadores a lesiones físicas, debido a que, para realizar las tareas, es necesario emplear contracciones musculares isométricas y movimientos repetitivos de escasa duración donde las manos se sitúan a la altura o por encima del espacio acromio-humeral. De esta forma, estas actividades suelen provocar trastornos músculo-esqueléticos en un alto porcentaje de los trabajadores [1].

De acuerdo con la Ocupacional Safety and Health Administration (OSHA) de Estados Unidos, las afecciones musculoesqueléticas (Musculoskeletal Disorders MSD, por sus siglas en inglés) afectan músculos, nervios, vasos sanguíneos, ligamentos y tendones [2].

En Europa, según la Sexta Encuesta sobre las Condiciones de Trabajo, las MSD relacionadas con el trabajo son las enfermedades profesionales más frecuentes en ese continente [3], generando en los operarios trastornos de espalda, cuello y miembros superiores; lo que conlleva importantes problemas de salud y costos para las organizaciones.

De acuerdo con una evaluación hecha a un exoesqueleto comercial, para atender los problemas de salud y económicos que conllevan las MSD dentro de las empresas se consideraron algunas soluciones alternativas, entre las que se destacaron: reestructuración del área de trabajo para ser más confortable para el operario; integrar estratégicamente rotación de personal para ciertas actividades, capacitación del personal, así como integrar periodos de descanso obligatorios [4].

En el área de trabajo, los exoesqueletos son una de las herramientas que buscan mejorar la calidad de vida de las personas. Consisten en un mecanismo estructural externo acoplado a la fisionomía de la persona y cuyas junturas y eslabones corresponden a las de la parte del cuerpo humano que emula [5]. Pueden ser estructuras pasivas o activas (sin o con que para realizar su movimiento requieran energía externa, respectivamente), que se adaptan al cuerpo del portador con el objeto de facilitar un movimiento tanto en esfuerzo como en trayectoria [6].

En este proyecto se diseñó y construyó un exoesqueleto pasivo con una movilidad semejante a los que ya que existen en el mercado para el área industrial (figura 1, página 17), con el fin de contribuir a reducir los riesgos de lesiones en tareas de recubrimiento con pintura en techos e instalaciones eléctricas. Este exoesqueleto cuenta con 3 grados de libertad (GDL) en la articulación correspondiente al hombro, implementada con pares inferiores. El mecanismo brinda soporte al movimiento del brazo, que es el segmento ubicado entre el hombro y el codo de las extremidades superiores.

I. ANTECEDENTES

En el año 2019, la empresa COMAU S.p.A., en colaboración con IUVO SRL, sacó al mercado un diseño de un exoesqueleto MATE. Dicho exoesqueleto proporciona un mecanismo generador de torque con una compensación de la gravedad reduciendo la carga en los músculos de los miembros superiores [8]. Se analizó en este producto el principio de funcionamiento mecánico que almacena y transforma la energía elástica de un conjunto de resortes paralelos, así como el soporte lumbar. Ambas ideas guiaron el diseño del exoesqueleto.

En el año 2019, la empresa Ottobock SE & Co. KGaA., sacó al mercado el diseño de un exoesqueleto llamado Paexo para miembros superiores. Paexo es un exoesqueleto usado en el cuerpo, es pasivo y particularmente ligero (1.9 kg) [9]. Cuenta con una estructura flexible y práctica, permitiendo rangos de movilidad amplios. Estos parámetros fueron analizados para el diseño del exoesqueleto.

En el año del 2015, la empresa EksoBionics, especializada en desarrollar tecnología con exoesqueletos para emplearse, tanto en el área de la salud como en la industria militar y manufacturera, lanzó al mercado un exoesqueleto al cual llamaron EksoVest; teniendo a la fecha su más reciente modelo: EksoEVO. El EksoVest es un exoesqueleto puramente mecánico (no requiere una fuente de alimentación) en forma de chaleco que fue diseñado para elevar y dar apoyo a los brazos de los trabajadores cuyas tareas se llevan a cabo a la altura del pecho y por encima de éste [10]. En dicho producto su estructura consiste en un

mecanismo de eslabones y articulaciones mecánicas, permitiendo rangos de movilidad amplios. Este principio de funcionamiento se revisó para guiar el diseño del exoesqueleto.

La empresa Levitate Technologies, INC, desarrolló un dispositivo en forma de exoesqueleto que reduce la tensión muscular y articular de los operarios en la industria. Este dispositivo, al que se le llamó Airframe®, ayuda a los trabajadores que estén expuestos a realizar esfuerzo físico cuya posición requiere que tengan los brazos elevados, durante periodos prolongados y repetitivos. Este exoesqueleto se ofrece en un diseño de tecnología ligera y ergonómica. Ofrece una reducción del esfuerzo físico de hasta un 80%; asegurando de esta forma una mejor productividad en los trabajadores, al mismo tiempo que se mitigan costos de atención médica y discapacidad [11]. Cuenta con una estructura que se adapta al usuario, lo que permite que el dispositivo se ajuste cómodamente a cualquier tipo o tamaño de cuerpo. Esta característica se tomó como base para el diseño del soporte lumbar del exoesqueleto.

Skelex 360-XFR es un exoesqueleto liviano y compacto fabricado en el año 2017 por la compañía Skelex. Cuenta con soporte para brazos que ayudan al descanso de estos. Funciona con energía almacenada en resortes que compensan la gravedad. Proporciona asistencia óptima mientras trabaja con las manos a la altura de los hombros o más, y admite el 80% del rango de movimiento del brazo humano [7]. En la revisión de este producto se identificaron algunos materiales ligeros con alto coeficiente de rigidez y flexibilidad, los cuales sirvieron como referencia en la selección de los materiales para el diseño del exoesqueleto.

II. JUSTIFICACIÓN

Los problemas de salud ocasionados por lesiones musculoesqueléticas afectan a una cantidad sustancial de trabajadores en diferentes tipos de organizaciones productivas, mismas que generan pérdidas económicas considerables.

Contar con exoesqueletos accesibles, ayuda a mejorar las condiciones de seguridad en el trabajo [3], así como la calidad de vida de los trabajadores.

El exoesqueleto que se diseñó y construyó cuenta con 3 GDL en la articulación del hombro para apoyar el movimiento natural del brazo, dejando libre el resto del miembro superior. Los sistemas de almacenamiento de energía se diseñaron de forma que permiten operar herramientas propias de un pintor o un electricista.

III. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un exoesqueleto de 3 grados de libertad en el hombro para reducir el riesgo de sufrir afecciones musculoesqueléticas en brazos al operar una herramienta de peso no mayor a 2.5 kg para las tareas de pintura e instalaciones eléctricas.

OBJETIVOS PARTICULARES

Elaborar una tabla comparativa de los diferentes prototipos comerciales.

Diseñar el exoesqueleto para auxiliar los miembros superiores.

Simular en un programa CAE el exoesqueleto para determinar las magnitudes de las principales fuerzas y torques.

Elegir y evaluar la deformación de los materiales en el diseño propuesto.

Estimar los costos para el maquinado del exoesqueleto.

Construir la estructura del exoesqueleto.

Validar la operación del exoesqueleto con un voluntario.

IV. MARCO TEÓRICO

El estudio preliminar y conceptos generales que son necesarios para materializar un prototipo mecánico funcional y eficiente requiere de conocimientos relacionados con el diseño de elementos mecánicos y análisis de mecanismos. Dentro de los conceptos específicos que abarcan los campos de aplicación para realizar este proyecto incluyen el conocimiento de propiedades de los materiales en ingeniería, teorías de esfuerzos mecánicos y prevención de fallas (criterios de fluencia y criterios de fractura), diseño de uniones y sujetadores mecánicos en ensamble de piezas, diseño de resortes, análisis de cargas estáticas y dinámicas, así como lo relacionado a esfuerzos de torsión generados por elementos elásticos como resortes.

Así mismo, es necesario conocer de manera general lo relacionado a los diferentes procesos de manufactura para el mecanizado de piezas, entre lo que se destaca: calidad de superficies y tolerancias geométricas, diagramas de operación para conformado de piezas y especificación de montaje de piezas con técnicas computacionales y de dibujo mecánico.

A continuación, se exponen algunos conceptos teóricos importantes para un mejor entendimiento en la descripción del desarrollo de este proyecto. Para la explicación de las deformaciones que se generan en los elementos mecánicos sometidos a cargas estáticas se describe el criterio de falla utilizado para las piezas diseñadas. A su vez, se explica también el funcionamiento del mecanismo de ginebra utilizado en una parte esencial del diseño del exoesqueleto. Por último, se exponen las herramientas computacionales utilizadas para hacer el proceso de diseño y determinación de esfuerzos y torques una tarea más práctica en el desarrollo de este proyecto.

TEORÍA DE FALLA MECÁNICA ANTE CARGAS ESTÁTICAS

La falla puede significar que una parte o elemento mecánico se ha separado en dos o más piezas; se ha distorsionado permanentemente, arruinando de esta manera su geometría; se ha degradado su confiabilidad, o se ha comprometido su función, por cualquier razón.

En elementos metálicos se pueden identificar dos tipos de comportamiento: dúctil o frágil; normalmente, los materiales se clasifican como dúctiles cuando su deformación $e_f > 0.05$ y cuando tienen una resistencia a la fluencia (S_y) identificable que a menudo es la misma en compresión que en tensión ($S_{yt} = S_{yc} = S_y$). Los materiales frágiles, $e_f < 0.05$, no presentan una resistencia a la fluencia identificable y típicamente se clasifican por resistencias últimas a la tensión y la compresión, S_{ut} y S_{uc}, respectivamente (donde S_{uc} se da como una cantidad positiva).

Criterios de fluencia:

- Materiales dúctiles
    - Esfuerzo Cortante Máximo (ECM)
    - Energía de Distorsión (ED)
    - Mohr-Coulomb para Materiales Dúctiles (CMD)
- Materiales frágiles
    - Esfuerzo Normal Máximo (ENM)
    - Mohr-Coulomb para Materiales Frágiles (CMF)
    - Mohr Coulomb Modificada (MM)

Concentración de esfuerzo

La concentración del esfuerzo es un efecto muy localizado. En algunos casos puede deberse a una rayadura superficial. Si el material es dúctil y la carga estática, la carga de diseño puede causar fluencia en el punto crítico sobre la muesca. Esta fluencia implica endurecimiento por deformación del material y un incremento de la resistencia de fluencia en el punto crítico de la muesca. Como las cargas son estáticas, esa parte las soporta de manera satisfactoria, sin presentar una fluencia general.

Carga estática

Fuerza estacionaria o un par de torsión que se aplica a un elemento. Para ser estacionaria, la fuerza o el par de torsión no deben cambiar su magnitud, ni el punto o los puntos de aplicación, ni su dirección. Una carga estática produce tensión o compresión axial, una carga cortante, una carga flexionante, una carga torsional o cualquier combinación de éstas.

Teoría de Energía de Distorsión para materiales dúctiles (Esfuerzo de Von Mises)

La teoría de la energía de deformación máxima predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material.

MECANISMO DE GINEBRA

Este mecanismo es usualmente requerido para convertir un movimiento circular constante en un movimiento circular intermitente. Para el prototipo diseñado no se tendrá un movimiento circular constante, pero se requiere que la torsión del resorte en espiral sea intermitente y este se logre torcer cada 60° hasta llegar a dar 1 vuelta completa sin que el resorte regrese a su posición inicial. De esta forma la rueda de ginebra nos permite avanzar y retroceder la misma distancia angular.

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Diseño asistido por computadora (CAD)

El software para el diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) permite el desarrollo de modelos tridimensionales (3D) a partir de los cuales pueden producirse vistas ortográficas convencionales en dos dimensiones con dimensionamiento automático. Las bases de datos tridimensionales permiten cálculos rápidos y exactos de ciertas propiedades como la masa, la localización del centro de gravedad y los momentos de inercia de masa. Del mismo modo, se obtienen con facilidad otras propiedades como áreas y distancias entre puntos [12].

Algunos ejemplos de software CAD son: AutoCAD. Inventor, SolidWorks, Creo Elements/Pro, por mencionar algunos.

Ingeniería asistida por computadora (CAE)

El término ingeniería asistida por computadora (CAE) describe todas las aplicaciones de ingeniería relacionadas con la computadora. Un proceso típico de CAE consta de una serie

de pasos de preprocesamiento, resolución y postprocesamiento. En la fase de preprocesamiento, los ingenieros modelan la geometría (o una representación del sistema) y las propiedades físicas del diseño, así como el entorno en forma de cargas o limitaciones aplicadas. A continuación, el modelo se resuelve aplicando una fórmula matemática adecuada de la física subyacente [13]. Entre los beneficios de la CAE se encuentran la reducción de los costos y del tiempo de desarrollo del producto, con una mejora de la calidad y de la durabilidad del mismo.

Algunos ejemplos de programas basados en ingeniería para aplicaciones en ingeniería mecánica son los programas para el análisis del elemento finito (FEA), para el análisis del esfuerzo y la deflexión, la vibración y la transferencia de calor (por ejemplo, ANSYS y MSC/NASTRAN); programas para la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el análisis del flujo de fluidos y la simulación (por ejemplo, CFD++, FIDAP y Fluent), y programas para la simulación de fuerzas dinámicas y el movimiento en mecanismos (por ejemplo, MCS ADAMS y Working Model).

Análisis de Elementos Finitos

El Análisis de Elementos Finitos (FEA, por sus siglas en inglés) es un método computarizado para predecir cómo reaccionará un producto ante las fuerzas, la vibración, el calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. La simulación de elementos finitos permite comprobar si un producto se romperá, desgastará o funcionará como se espera. Se denomina análisis, pero en el proceso de desarrollo de productos, se utiliza para predecir qué ocurrirá cuando se utilice un producto. El análisis de elementos finitos descompone un objeto real en un gran número (entre miles y cientos de miles) de elementos finitos, como pequeños cubos. Las ecuaciones matemáticas permiten predecir el comportamiento de cada elemento. Luego, una computadora suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto [14].

Existe una gran cantidad de aplicaciones del FEA tales como análisis estático y dinámico, lineal y no lineal, de esfuerzo y de deflexión; vibraciones libres y forzadas; transferencia de calor (que se puede combinar con el análisis de esfuerzo y de deflexión para proporcionar esfuerzos y deflexiones térmicamente inducidos); inestabilidad elástica (pandeo); acústica; electrostática y magnetismo (que se puede combinar con transferencia de calor); dinámica de fluidos; análisis de tuberías y física múltiple

V. DESARROLLO

ETAPA DE INVESTIGACIÓN

Como quedó estipulado en el cronograma de actividades para la realización de este proyecto; en primera instancia se realizó una tabla comparativa con 4 de los exoesqueletos más identificables que existen en el mercado. En la tabla 1 se sintetizan los detalles analizados y tomados en cuenta para el diseño del prototipo de nuestro exoesqueleto.

a) Mate

b) Paexo

c) EksoVest

d) Airframe

Figura 2. Exoesqueletos pasivos comerciales.

Tabla 1. Comparativa de los exoesqueletos analizados

CARÁCTERÍSTICAS	MATE	PAEXO	EKSOVEST	SKELEX 360-XFR
COSTO	-	$145,000.00	$100,000.00	$150,000.00
PRINCIPIO DE MECANISMO QUE ALMACENA ENERGÍA	Cadena mecánica en el hombro, Caja generadora de torque que almacena y libera la energía potencial. Diseño ergonómico en la espalda.	Su diseño transfiere la carga de los hombros directamente a la cadera. Funciona gracias a la extracción de un cable inteligente. Su diseño permite amplia movilidad en la espalda.	Transfiere la carga de los brazos desde los hombros hasta el marco de la espalda. Soporte ergonómico en la zona lumbar.	Principio de equilibrio de gravedad. Con su tecnología FlexFrame. Almacena y libera energía hacia la parte baja del cuerpo.
NIVELES DE AJUSTE	7	-	4	4
PESO DE ESTRUCTURA	4.0 kg	2 kg	3.7 kg/brazo	2.5
CARGA QUE SOPORTA	No mencionada	No mencionada	2.2 a 6.8 kg	1 - 4.9 kg
NÚMERO DE ESLABONES	2 pares de revoluta y 1 par prismático.	Pares de revoluta y par esférico	3 pares de revoluta	1 par de revoluta, 1 par prismático
AJUSTE DE TALLA	S/M & L/XL	De 160 a 190 cm.	S/M & L/XL	S, M & L
MATERIALES	Aluminio, Nylon, fibra de carbono	Aluminio	-	Nylon, muelles de fibra de carbono y aleaciones de acero.
TIPO DE SOPORTE EN ESPALDA	Soporte en espalda desde el trapecio a la espalda baja. Ajuste lumbar.	Correa que cruza a lo largo de la espalda. Ajuste tipo faja en la zona lumbar.	Soporte lumbar y en espalda alta.	Soporte lumbar y en dorsales.
AMPLITUD (GRADOS) EN HOMBROS	90° de manera vertical.	Total rango de movimiento	Total rango de movimiento	Total rango de movimiento (360°); 180° en vertical y horizontal

De las características descritas en la tabla 1, para cada exoesqueleto comercial analizado se estipularon los criterios a considerar para crear un exoesqueleto propio que cumpliera con los objetivos propuestos. A continuación, se presenta otra tabla que describe los parámetros de diseño considerados para conformar el diseño del prototipo.

Tabla 2. Criterios de diseño considerados para el prototipo.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Principio de funcionamiento	Mecanismo con caja de torque en hombros que contrarresta el peso generdo en los hombros a causa de la fuerza de la gravedad al mantener los hombros en una posición elevada. Muelles de aluminio en la parte posterior de la espalda alta para redistribuir la carga desde los hombros hasta la parte lumbar del cuerpo	Número de eslabones	3 eslabones: 3 pares de recoluta en hombros que permitan un amplio rango de movimiento según la anchura de los hombros de diferentes usuarios.
Niveles de ajuste	6 Niveles de ajuste en la caja de torque que actúan en función de la masa del objeto sostenido y la masa muscular en los hombros del operario.	Ajuste de talla	3 ajustes de talla que comprenden: Chica (S-M), Grande (L), Extragrande (XL)
Peso aproximado de la estructura principal	Se estima contar con un peso aproximado de 3 kg como máximo, contemplando partes metálicas, elementos de la caja de torque, así como elementos de sujeción (faja, arnés y correas de seguridad).	Materiales	Materiales ligeros en su mayoría elementos metalicos de aluminio, así como partes impresas en 3D y nylon.
Carga que soporta	Se considera una herramienta manual con un peso promedio de 2.5 kg como máximo.	Soporte en espalda	Faja sujeta a la espalda baja del usuario que reciba la carga distribuida a través de la zona lumbar del cuerpo.

ETAPA DE DISEÑO

En esta parte del proyecto se tomaron los criterios de diseño expuestos en la tabla 2. Mediante herramientas de Dibujo Asistido por Computadora, CAD, (*Computer Aided Design,* por sus siglas en inglés) se elaboraron tres propuestas para la obtención de un prototipo final. En primera instancia, se trabajó en dos propuestas iniciales, obteniendo una tercera con los elementos que más destacaron de las dos primeras. A continuación, se describen las 3 propuestas dibujadas resaltando los elementos y grados de libertad que caracterizan a cada una.

PROPUESTA I

Descripción: Exoesqueleto para miembros superiores con tres grados de libertad en hombros. Cuenta con una caja de torque que utiliza el principio de funcionamiento de un resorte plano helicoidal y la transferencia de energía mediante un mecanismo de rueda de Ginebra. Presenta un diseño ergonómico que se asemeja a la forma de la espalda.

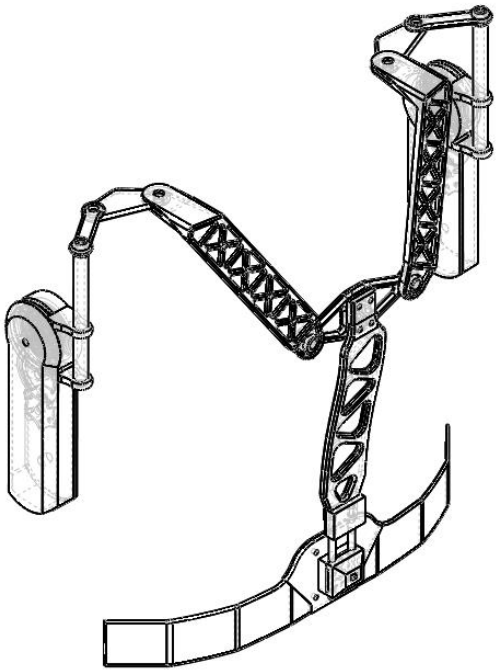


Figura 3. CAD de Prototipo I. Vista isométrica.

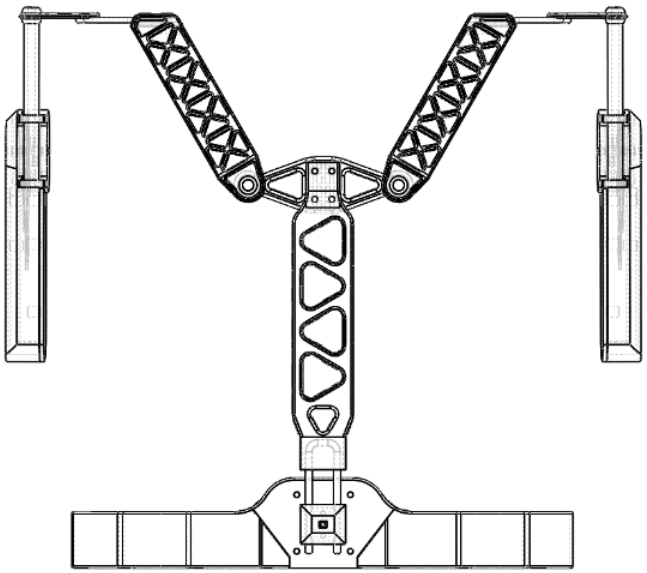


Figura 4. Prototipo I. Vista posterior.

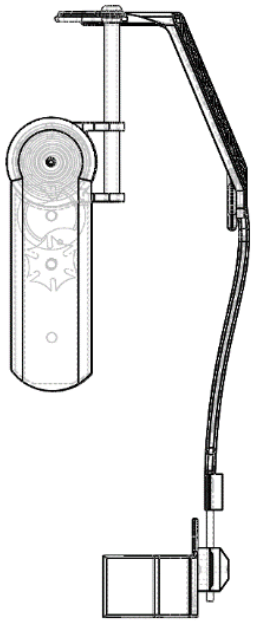


Figura 5. Prototipo I. Vista lateral derecha.

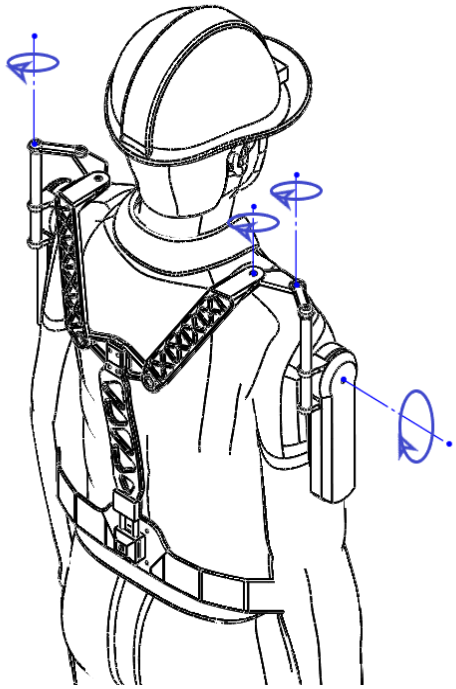


Figura 6. Grados de libertad (revolutas) en prototipo I.

Figura 7. Grados de libertad (prismáticas) en prototipo I.

PROPUESTA II

Descripción: Exoesqueleto pasivo para miembros superiores. Posee un diseño que permite ajustarse a diferentes fisionomías del cuerpo según el usuario que lo porte. Su mecanismo de apoyo en brazos se basa en el principio de almacenamiento de energía potencial en resortes longitudinales que, al bajar los hombros, éstos distribuyen la carga potencial y la depositan en la parte baja de la espalda mediante muelles planos que van desde la espalda hasta la parte de los hombros.

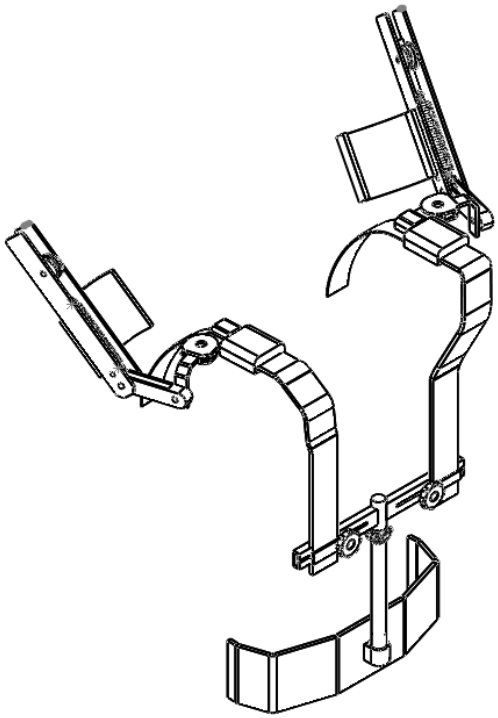


Figura 8. CAD de Prototipo II. Vista isométrica.

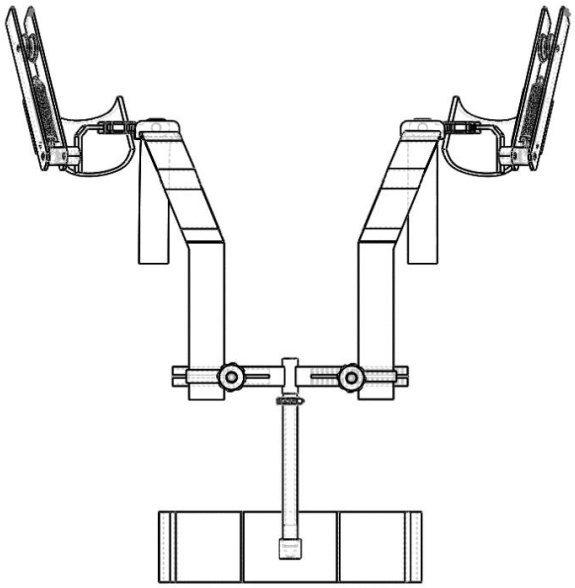


Figura 9. Prototipo II. Vista posterior.

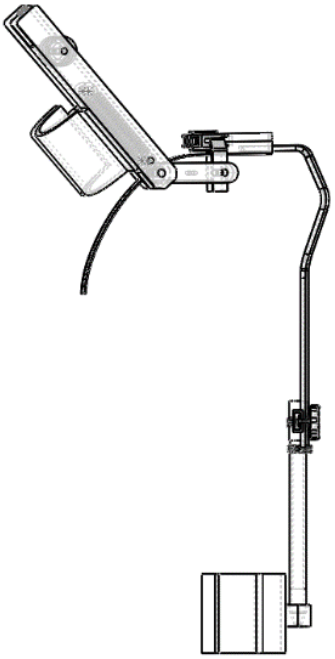


Figura 10. Prototipo II. Vista lateral derecha.

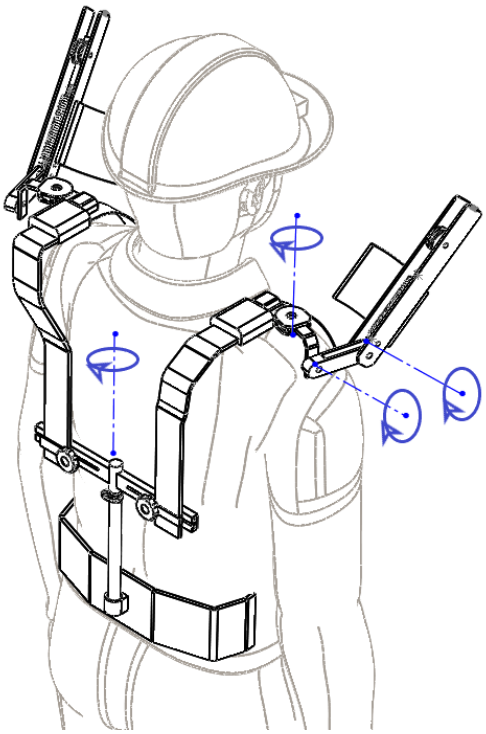


Figura 11. Grados de libertad (revolutas) en prototipo II.

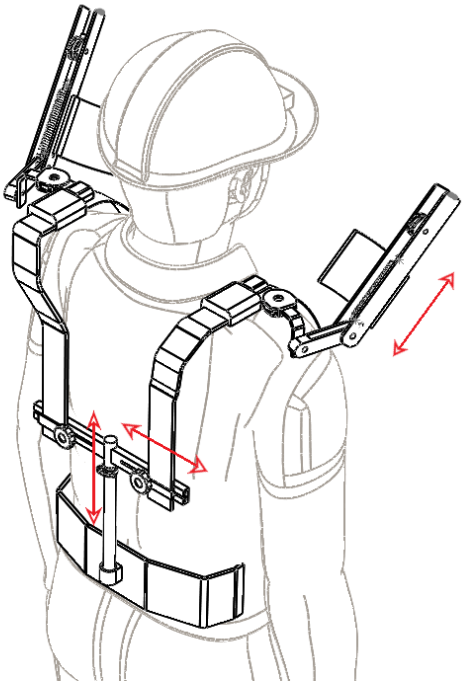


Figura 12. Grados de libertad (prismáticas) en prototipo II.

PROPUESTA III

Descripción: Exoesqueleto pasivo para miembros superiores. Cuenta con un mecanismo de rueda de Ginebra en las cajas de torque ubicadas en los brazos. Dicho mecanismo transmite el torque que genera un resorte helicoidal plano al levantar y bajar los brazos. Posee una serie de eslabones a la altura de la articulación del hombro que transmiten la carga desde los brazos hasta la parte lumbar del cuerpo, pasando por un par de muelles planos que ayudan a darle cierta rigidez al prototipo.

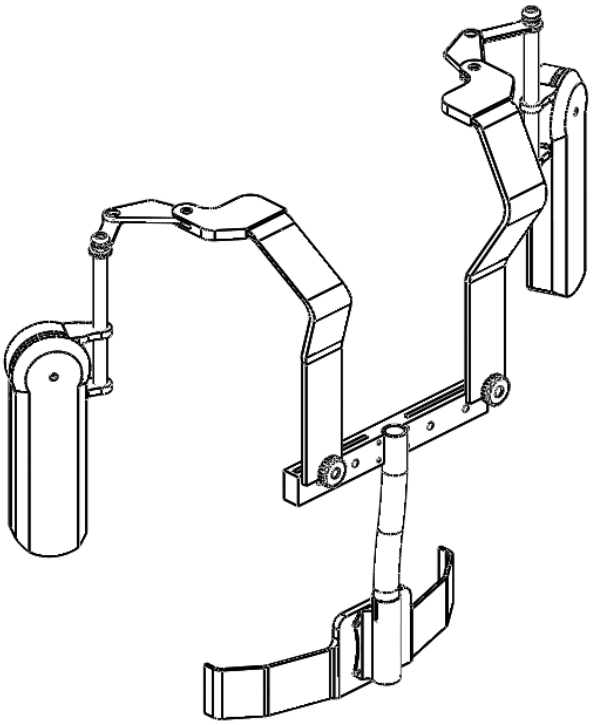


Figura 13. CAD de Prototipo III. Vista isométrica.

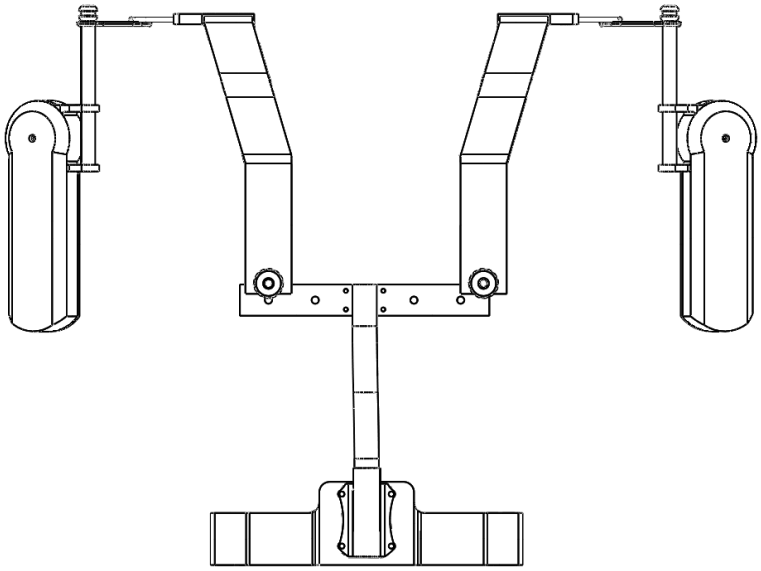


Figura 14. Prototipo III. Vista posterior.

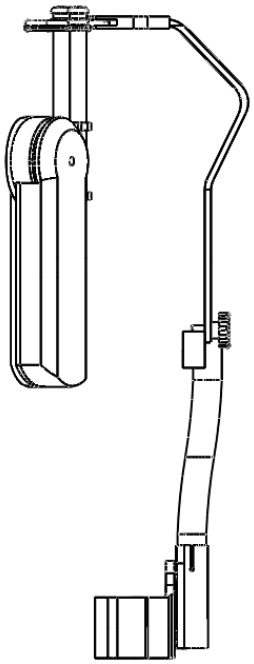


Figura 15. Prototipo III. Vista lateral derecha.

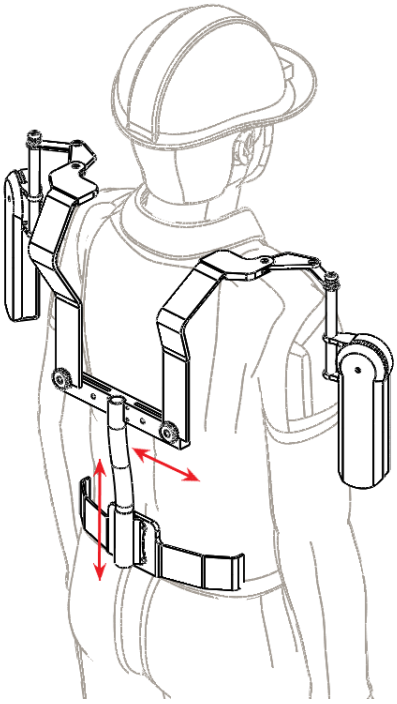


Figura 16. Grados de libertad (prismáticas) en prototipo III.

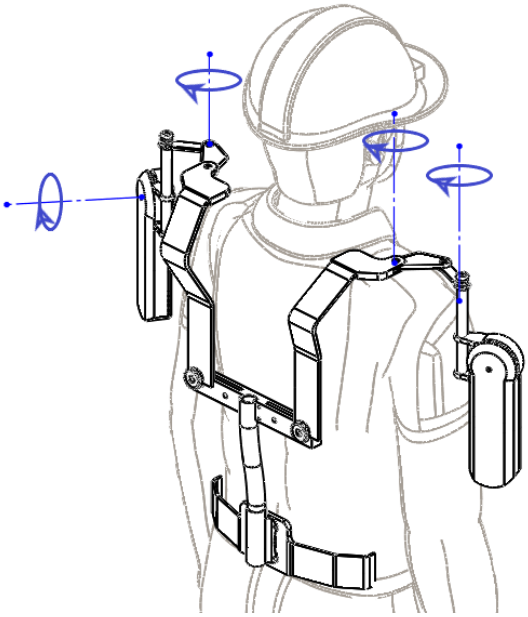


Figura 17. Grados de libertad (revolutas) en prototipo III.

De las imágenes anteriores que abarcan desde la figura 2 a la 16, se destacan las piezas más representativas de los prototipos propuestos. Las imágenes que pertenecen al prototipo III dan una idea amplia del aspecto que tendría el exoesqueleto ya puesto en algún usuario. En la siguiente sección se muestran y se describen a detalle cada una de estas piezas que conformarían en primera instancia el prototipo del exoesqueleto por construir (ver figuras 17 y 18).

Listado de piezas que conforman el exoesqueleto:

1. Faja
2. Soporte de tubo
3. Tubo lumbar
4. Torso superior
5. Muelle
6. Acoplador
7. Eslabón central
8. Eslabón exterior
9. Tubo vertical
10. Caja de torque

Dadas las características con las que cuenta la caja de torque para su funcionamiento, se considera ésta como un subensamble dentro del ensamble general de lo que sería el exoesqueleto. A continuación se describen también sus piezas:

Listado de piezas que conforman la caja de torque:

1. Carcasa
2. Mecanismo de rueda de Ginebra
3. Resorte plano de espiral
4. Pivote
5. Tornillo de ajuste
6. Rueda indicadora
7. Correderas

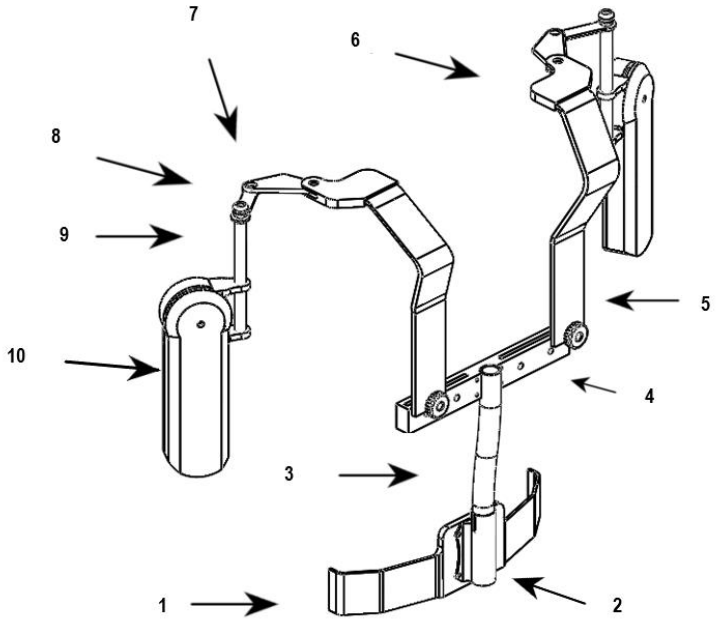


Figura 18, Piezas que conforman Propuesta III de exoesqueleto.

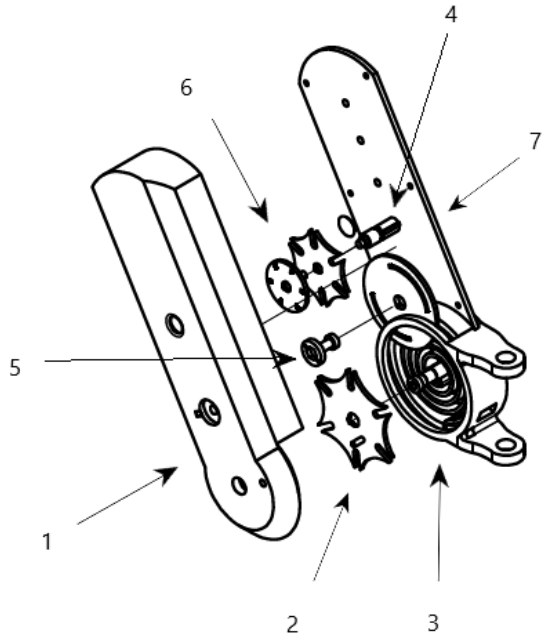


Figura 19. Piezas que conforman la Caja de torque.

De todas las piezas propuestas, se realizó un análisis de las principales partes que estarían sometidas a esfuerzos (que para el caso se consideraron estáticos) según la cinemática presente en cada una de las juntas que componen al prototipo.

ANÁLISIS DE ESFUERZOS

Esta etapa del procedimiento comprendió el análisis y experimentación de esfuerzos estáticos de ciertas piezas del exoesqueleto mediante un software para estudios CAE. Con ayuda del software de dibujo mecánico *Autodesk Inventor Professional 2020,* se exportaron las piezas para analizarlas en el software de simulación *Ansys Student 2020 R2*. De esta forma, se valoraron las piezas propuestas y se hicieron las modificaciones pertinentes para asegurar la efectividad del prototipo al ser utilizado para los fines propuestos.

Descripción de fuerzas

La descripción de fuerzas se realizó contemplando la masa y el peso del operario disponible como características físicas obtenidas en el software de dibujo para cada pieza. Se hizo una tabla que comprende la sumatoria del peso ejercido en cada elemento del prototipo a efecto de la fuerza de gravedad, del peso de los miembros superiores y del peso de la herramienta de trabajo utilizada.

En la tabla 3 se puede apreciar un listado de las piezas preliminares que conforman el diseño del exoesqueleto por construir. En ésta se especifica el material propuesto para su fabricación, la masa que posee cada pieza diseñada dadas las dimensiones de estas, así como la sumatoria de los pesos según la carga que soportan. Para determinar la fuerza ejercida en cada elemento del mecanismo se consideró el peso ejercido en cada una de ellas tomando como referencia la que está a menor distancia respecto al nivel del suelo; es decir, empezando desde la faja y subiendo hasta la pieza de la corredera que está a la altura de los bíceps.

Sistema rotacional de niveles de fuerza

Dado que el prototipo está diseñado con diferentes tipos de tallas, éste deberá permitir diferentes ajustes de fuerza para contrarrestar el efecto de la gravedad (cansancio en

músculos de miembros superiores); esto debido a que la masa de cada brazo cambia según la fisonomía del individuo.

Ajustar los niveles de fuerza mediante un mecanismo rotacional permite variar la tensión del resorte de una manera proporcional a los grados de torsión. Para ello, se implementó un mecanismo de Ginebra dentro de la caja de torque que facilita cambiar entre un nivel de fuerza y otro. Se instaló un indicador en la parte superior de la caja para que el usuario pueda ajustar la rigidez del resorte según las necesidades de éste.

De modo inicial se planteó una estrella o cruz de Malta de 6 posiciones como primera variable a considerar. A partir de esto, los cálculos para el desarrollo e implementación de este mecanismo se centraron básicamente en el análisis cinemático de los esfuerzos de tensión generados por la fuerza que genera el resorte.

Ahora, para la obtención de los niveles de fuerza que proporcionarán la reducción del peso ejercido en el brazo del operario, se propusieron seis niveles en función de 6 rangos de masa para las extremidades del cuerpo (brazos) y la herramienta de trabajo utilizada. En las tablas siguientes (tablas 4 y 5) se puede ver que para el brazo se consideró un rango que va desde 2 kg hasta 4.5 kg. Para el peso de la herramienta se consideró una masa que alcanza los 2.5 kg.

Tabla 3. Masa de cada elemento que compone al mecanismo.

# de pieza	Nombre de las piezas	Material	Masa (kg)	Numero de elementos	Sumatoria de masas (kg)
1	Faja	Alumninio 6061	0.190	1	0.19
2	Soporte lumbar	Alumninio 6061	0.054	1	0.054
3	Tubo lumbar	Alumninio 6061	0.081	1	0.081
4	Soporte de torso	Alumninio 6061	0.180	1	0.18
5	Abrazadera	Alumninio 6061	0.017	1	0.017
6	Muelle	Acero al medio carbono	0.219	2	0.438
7	Acoplador	Alumninio 6061	0.067	2	0.134
8	Eslabon interno	Alumninio 6061	0.016	2	0.032
9	Eslabon externo	Alumninio 6061	0.012	2	0.024
10	Tubo vertical	Acero Inoxidable	0.083	2	0.166
11	Base de la caja de torque	Alumninio 6061	0.130	2	0.26
12	Carcasa posterior	Alumninio 6061	0.083	2	0.166
13	Carcasa frontal	Plástico ABS	0.090	2	0.18
14	Perno de bloqueo	Acero Inoxidable	0.002	2	0.004
15	Tornillo de sujecion de eje central	Acero Inoxidable	0.002	2	0.004
14	Eje de centro	Acero al carbon	0.007	2	0.014
16	Tornilllo de ajuste de torque	Acero Inoxidable	0.006	2	0.012
17	Resorte de torsion en espiral	Acero Inoxidable	0.130	2	0.26
18	Cruz de Malta superior	Acero Inoxidable	0.029	2	0.058
19	Disco impulsor	Acero Inoxidable	0.049	2	0.098
20	Cruz de Malta inferior	Acrílico	0.003	2	0.006
21	Acoplador	Acero Inoxidable	0.004	2	0.008
22	Rueda indicadora	Acrílico	0.001	2	0.002
23	Base de corredera	Acero Inoxidable	0.046	2	0.092
24	Corredera	Acero Inoxidable	0.020	2	0.040
				TOTAL	2.520

Tabla 4. Niveles de fuerza considerados por el brazo.

Masa del brazo (kg)	Fuerza (N)
2	19.62
2.5	24.525
3	29.43
3.5	34.335
4	39.24
4.5	44.145

Tabla 5. Niveles de fuerza considerados por la herramienta de trabajo.

Masa de herramienta (kg)	Fuerza (N)
Sin herramienta	0
0.5	4.905
1	9.81
1.5	14.715
2	19.62
2.5	24.525

Tabla 6. Descripción de niveles de fuerza (masa de herramienta vs masa del brazo).

	Masa de la herramienta (kg)					
Masa del brazo (kg)	Sin herramienta (0 kg)	0.5	1	1.5	2	2.5
2	19.62	24.52	29.43	34.33	3924	44.14
2.5	24.525	29.43	34.33	39.24	44.14	49.05
3	29.43	34.33	39.24	44.14	49.05	53.95
3.5	34.335	39.24	44.14	49.05	53.95	58.86
4	39.24	44.14	49.05	53.95	58.86	63.76
4.5	44.145	49.05	53.95	58.86	63.76	68.67

Tabla 7. Niveles de fuerza considerados para ajustar el exoesqueleto.

Fuerza implicada (N)	Fuerza aplicada (N)	Nivel
19.62	10	1
24.525	12	2
29.43	14	3
34.335	16	4
39.24	18	5
44.145	20	6

Con las fuerzas obtenidas y mostradas en las tablas 4 y 5, se obtuvieron los rangos de valores que se ejercen con los niveles de fuerza propuestos. En la tabla 6 se pueden apreciar las fuerzas que contrarrestan cada nivel según la configuración de masa en brazo y en herramienta de trabajo utilizada (ver tabla 7). Dado que el objetivo del prototipo es contrarrestar la fuerza que ejerce el brazo para realizar ciertas actividades de trabajo, la fuerza que se aplica en la caja de torque irá relacionada directamente con los niveles propuestos, con el fin de ayudar a disminuir la fuerza de trabajo generada, reduciendo así un promedio de 47% de la fuerza necesaria para realizar las operaciones.

De igual forma al cómo se ajustaron los niveles de fuerza considerando la masa de los brazos y la masa de la herramienta, ahora se consideró la altura y el peso del usuario. En la tabla 8 se puede apreciar tal configuración explicando con diferentes escalas de colores qué nivel de fuerza se recomienda utilizar para que el exoesqueleto funcione de mejor manera.

Para tener una idea más clara de qué configuración de fuerza utilizar según la altura y peso del usuario, se proponen las tallas que se muestran en la tabla 9 y 10, según la complexión del operario.

Tabla 8. Niveles de fuerza aplicados según altura y peso del operario.

		Peso (Kg)											
		45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Altura (cm)	150	1	1	1	2								
	155	1	1	2	2	2							
	160	1	2	2	2	3							
	165	1	2	2	2	3	4	4					
	170		2	3	3	3	4	4	5				
	175				3	3	4	4	5	5			
	180				3	4	4	5	5	5	6		
	185					4	5	5	5	6	6	6	
	190					4	5	5	6	6	6	6	6
	195						5	5	6	6	6	6	6

Tabla 9. Ajuste de tallas en cintura y torso según operario.

Cintura	Tamaño	
	XS-S/M	M/L
Centimetros	50 - 66	66 - 92

Tubis del torso	Tamaño	
	XS-S/M	M/L
Centimetros	37 - 47	47 - 59

Tabla 10. Ajuste de talla en brazo según operario.

Soporte de brazo		Longitud de antebrazo		
		20 - 25 (cm)	25 - 30 (cm)	27 - 30+ (cm)
Diámetro del bícep	26 - 32 (cm)	S	S	M
	32 - 37 (cm)	S	S or M	M
	37 - 42 (cm)	M	M	L

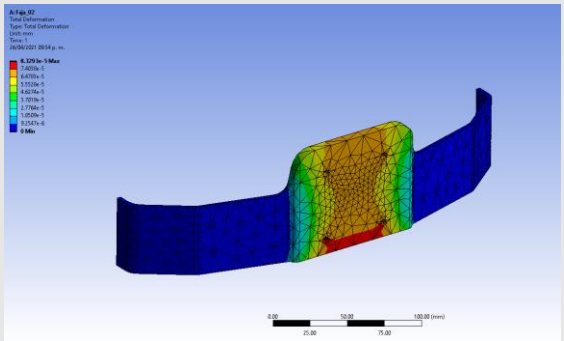
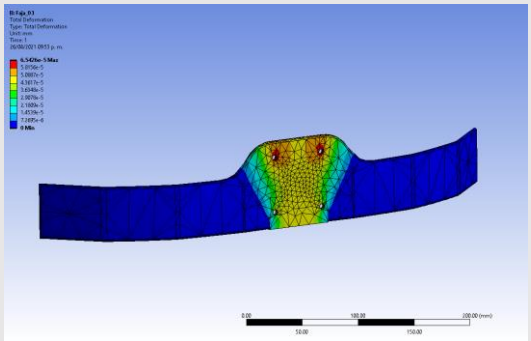
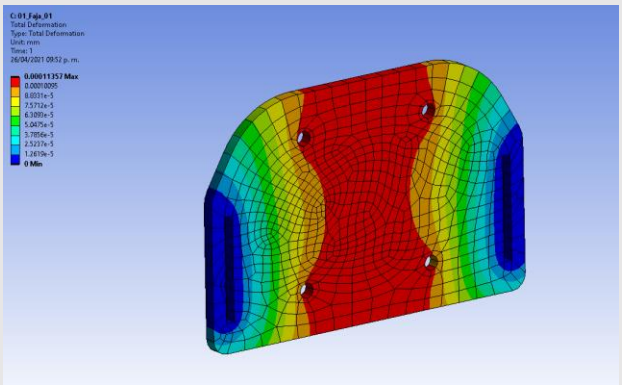
Simulación de esfuerzos de las piezas

Esta etapa del procedimiento comprendió el análisis experimental de esfuerzos estáticos de ciertas piezas del exoesqueleto mediante un software para estudios de ingeniería. En las imágenes siguientes se muestran las piezas que conforman el prototipo de exoesqueleto. También se muestran una serie de imágenes que expresan las diferentes ideas que se tenían para algunas piezas en específico. Después de realizar algunas simulaciones experimentales, varias piezas sufrieron modificaciones considerables, y otras tantas apenas perceptibles.

Para el análisis de las piezas por medio de elemento finito usaremos la teoría Energía de distorsión (Von-Mises) comúnmente empleada para materiales dúctiles, la cual predice que la falla pro-fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material.

- **Pieza: Faja**

Tabla 11. Evolución de modificaciones en pieza faja.

<table>
<tr>
<td> 
Figura 20. Faja (propuesta inicial).</td>
<td> 
Figura 21. Faja (Primera modificación).</td>
</tr>
<tr>
<td>Faja metálica con una placa central unida a un conjunto de láminas externas con un grosor de 6 mm. Se observa una deformación mínima que no sobrepasa el esfuerzo y el límite elástico.</td>
<td>Disminución de grosor en extremos laterales y redondeo superior en placa central. Se observó una acumulación de esfuerzos en los agujeros en donde va a ir montado el siguiente elemento con una deformación mínima. Esto favorece la disminución de masa del elemento conservando el rango de límite elástico.</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2"> 
Figura 22. Faja (segunda y última modificación).</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">En el anterior diseño se observa que en las láminas externas no se presenta acumulación de esfuerzos. Al ser de aluminio existe el riesgo de que, ante la generación de esfuerzos</td>
</tr>
</table>

de torsión, estas lleguen al punto de fractura; por este motivo se realizó la extinción de los extremos de la placa para disminuir material, contemplando la nula aportación dinámica al mecanismo. Se hizo un redondeo de la pieza en la parte superior y se propuso la implementación (o uso) de una faja de cuero, para el sistema de sujeción se elaboran ranuras en los extremos. Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.

Figura 23. Faja (propuesta final). Propiedades volumétricas de la pieza.

La pieza se somete a una carga de 40 N y un grosor de 4 mm. Esta propuesta final nos permitió usar una faja de cuero o sujetarla a un arnés por medio de las ranuras en los costados. Los bordes redondos en los extremos superiores garantizan una mejor distribución de la fuerza aplicada.

Como la fuerza es aplicada en el área transversal paralela a su base, se garantiza que los esfuerzos y deformaciones serán mínimos con valores por debajo de uno. El ranurado lateral se diseñó para anclar las correas que funcionan como sistema de sujeción a la espalda del operario.

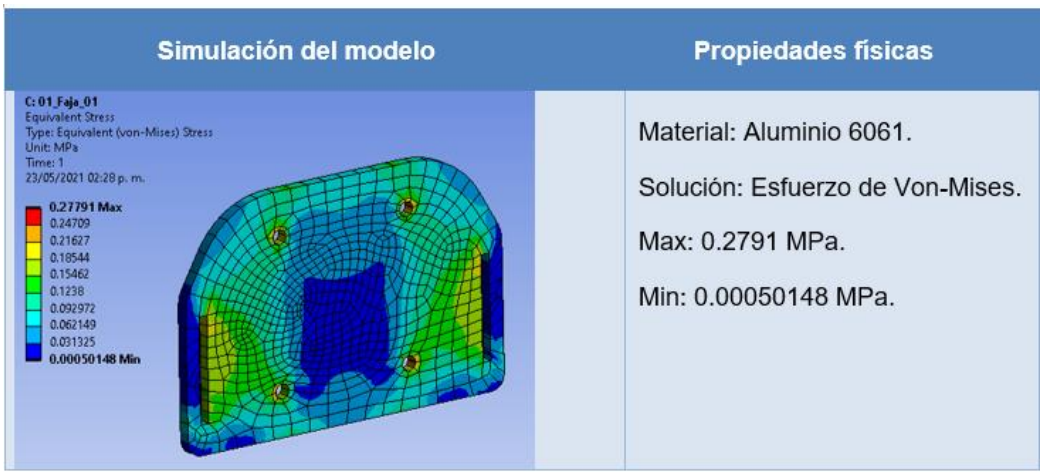


Figura 24. Esfuerzos de Von-Mises generado en la placa.

El elemento presenta una acumulación de esfuerzos de tensión y compresión que se extienden en la parte central. Empleando la teoría de distorsión se calculó el factor de seguridad obteniendo un valor superior a 15, por lo que la pieza adquiere un alto coeficiente de resistencia.

En la siguiente imagen se aprecia cómo la máxima deformación se encuentra en la zona central debido a que en ese lugar estaría montado el soporte del tubo lumbar. Esta deformación es despreciable ya que no excede el límite de elasticidad.

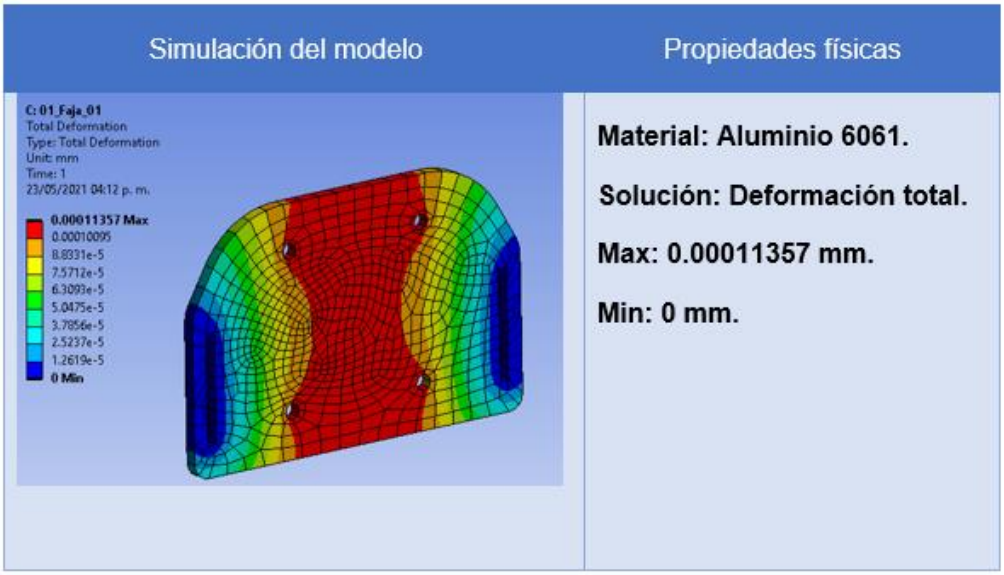
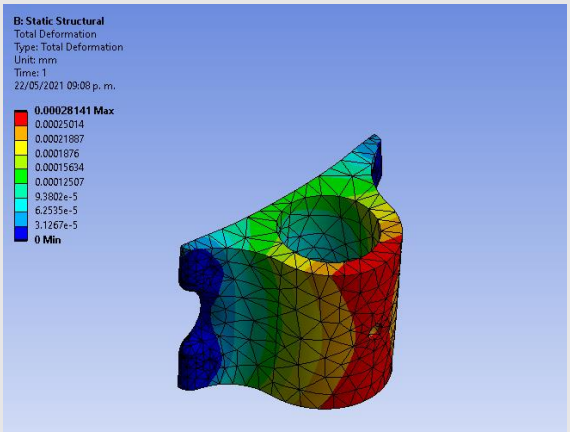
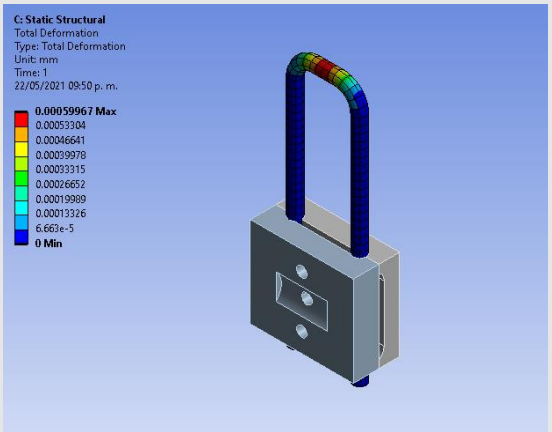


Figura 25. Deformación total presente en la placa.

- **Pieza: Soporte de tubo**

Tabla 12. Evolución en pieza Soporte de tubo.

 **Figura 26. Soporte de tubo (primera propuesta).**	 **Figura 27. Soporte de tubo (segunda propuesta).**
Soporte metálico. Cuenta con barrenos laterales para sujetarlo a la faja y un barreno central para sujetar verticalmente un tubo. Carece de superficie de sujeción para el tubo que se va a montar, lo cual se puede reflejar como una posible falla al momento de estar en operación.	Soporte metálico con tensores que permiten cierta elasticidad al ensamblar la faja y el tubo vertical para la parte lumbar. Este mecanismo es comúnmente empleado en asientos para bicicletas debido a que los tensores aportar cierta flexibilidad que funge como muelle.

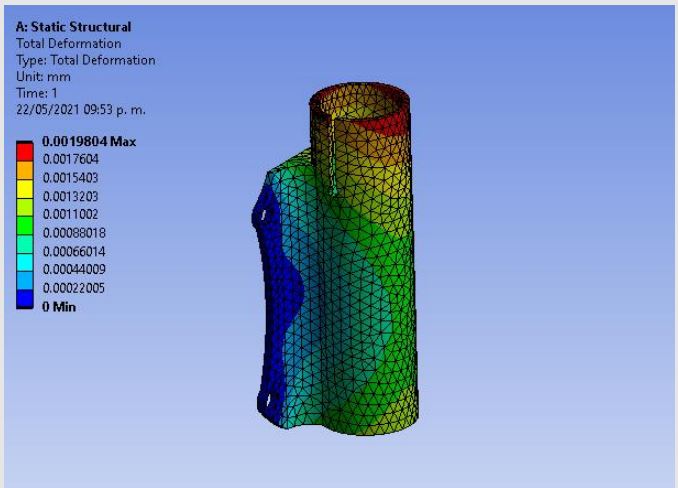


Figura 28. Soporte de tubo (tercera propuesta).

Soporte metálico estilizado con una placa posterior para anclarse firmemente a la placa que comprende la faja mediante cuatro barrenos laterales. Esta propuesta de diseño es la que se eligió debido a las propiedades volumétricas y a la alta resistencia a esfuerzos que presenta, así como a la facilidad de poder ensamblar otro elemento y sujetarlo mediante una abrazadera, permitiendo su fácil ajuste según la dimensión deseada.

Figura 29. Soporte de tubo (propuesta final). Propiedades volumétricas de la pieza.

El diseño del soporte parte del principio de funcionamiento del sistema de sujeción de sillín en una bicicleta, cuenta con una cavidad cilíndrica vertical la cual ofrece una mayor área de sujeción para el tubo lumbar y con una ranura superior para ensamblar otro tubo y sujetarlo mediante una abrazadera usada también en bicicletas; por este motivo el tubo tiene un diámetro exterior de una pulgada (D = 25.4 mm).

Para encontrar el grosor de pared mínimo a utilizar se calculó el esfuerzo normal. Se propone una deformación del 0.025% para tener un factor de seguridad amplio.

$$\boldsymbol{\sigma = E\epsilon} \qquad (1)$$

Al ser un material dúctil se propone un porcentaje de deformación:

$$\boldsymbol{\epsilon = \frac{\delta}{l_0}} \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{\epsilon = \frac{0.00025 * l}{l} = 0.00025}$$

Utilizando el módulo de elasticidad se calcula el esfuerzo de compresión con (1):

$$\boldsymbol{\sigma = E\epsilon = 68.9\ GPa(0.00025) = 17.22\ GPa}$$

Conociendo el esfuerzo de compresión, se puede encontrar el espesor mínimo del tubo:

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{P}{A}} \qquad (3)$$

Despejando *A* de (3), se tiene:

$$\boldsymbol{A = \frac{P}{\sigma} = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - d^2\right)} \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{A = \frac{50\ N}{17.22\ GPa} = 3x10^{-6}\ m^2}$$

De la ecuación 4 se obtiene la siguiente igualdad para obtener el valor de *d:*

$$D^2 - d^2 = 3.9x10^{-6}m^2$$

$$d = \sqrt{6.4126x10^{-4}} = 0.02332\ m\ \rightarrow 23.32\ mm$$

Ahora, para el espesor del tubo:

$$t = \frac{D - d}{2} \qquad (5)$$

$$t = \frac{(25.4 - 23.32)mm}{2} = 1.04\ mm$$

Se tiene como resultado un espesor de 1.04 mm. Comercialmente se encontró un tubo IPS con un grosor de pared de 3.05 mm con el cual el factor de seguridad aumentó, disminuyendo a su vez, la acumulación de esfuerzos en la pieza. En las figuras 29 y 30 se muestran los resultados de la simulación de los esfuerzos de Von-Mises y la deformación, respectivamente. se tiene que el valor de σ' es menor al S_y por lo cual no existe un riesgo a la falla crítico. Al no haber incremento del esfuerzo a compresión la deformación unitaria es prácticamente despreciable; la deformación se acerca al valor propuesto. El espesor de la pared del tubo cambió, ya que el diámetro interno es de 21 mm, puesto que se acopló a lo encontrado en el mercado. Se observa una acumulación de esfuerzos en la parte superior derecha el tubo debido a la forma del tubo lumbar.

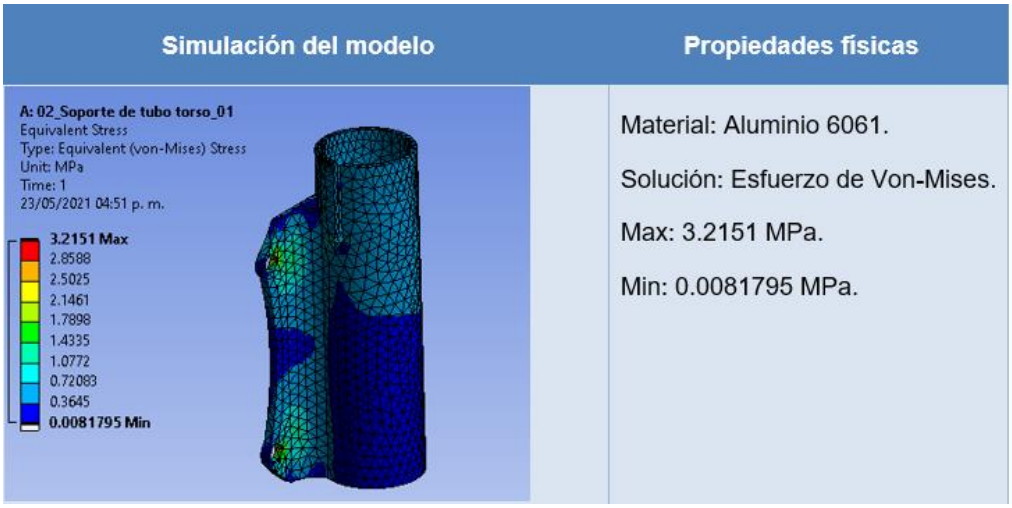


Figura 30. Esfuerzos de Von-Mises generados en la pieza.

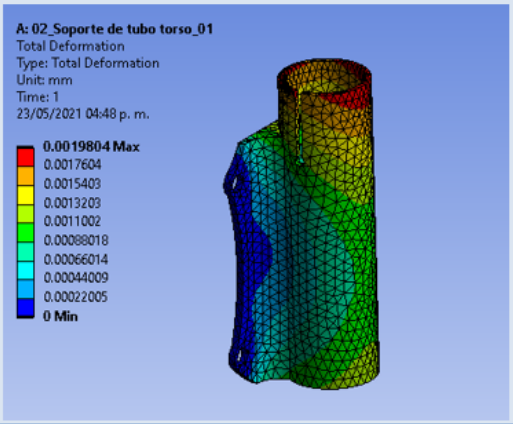
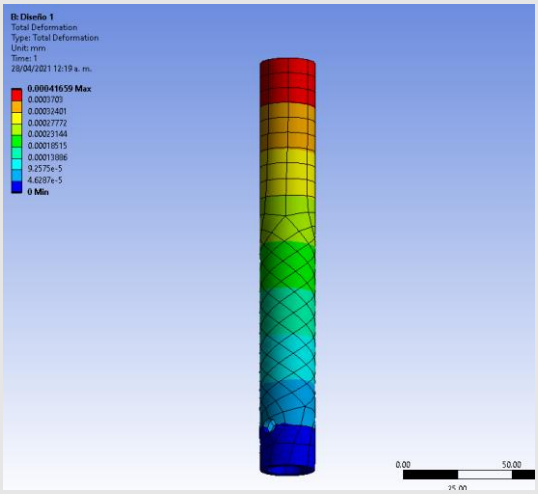
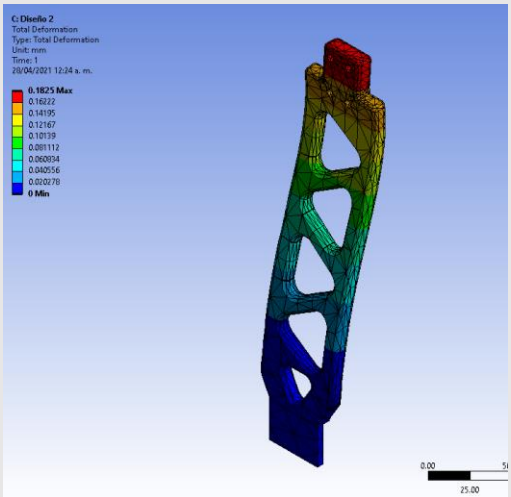
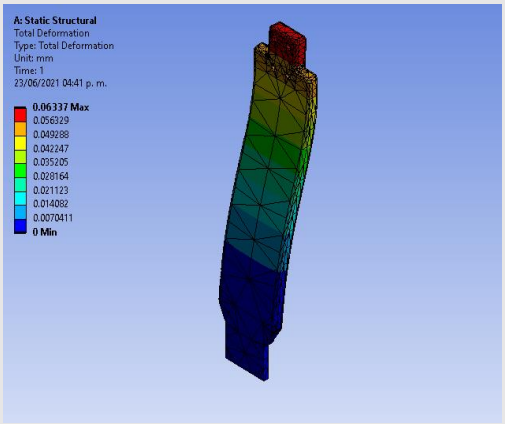
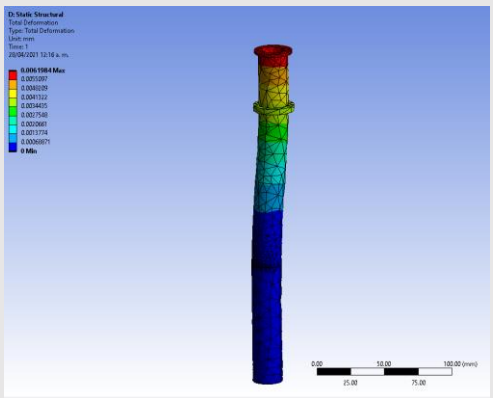
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Deformación total. Max: 0.0019804 mm. Min: 0 mm.

Figura 31. Deformación total presente en la pieza.

- **Pieza: Soporte lumbar**

Tabla 13. Evolución pieza soporte lumbar

 **Figura 32. Soporte lumbar (primera propuesta)**	 **Figura 33. Soporte lumbar (segunda propuesta).**
Tubo metálico recto de ½ pulgada de diámetro aproximadamente que iría ensamblado en el soporte de la figura 25 (ver página 40).	Soporte metálico diseñado con una estructura con agujeros triangulares utilizados en estructuras, los cuales distribuyen bien las cargas y no sufren deformación, con esto se aligera el peso de

	la pieza con el fin de usar la menor cantidad de material sin afectar la resistencia a la deformación del elemento. Esta pieza Iría ensamblada en el soporte que se muestra en la figura 26.
 **Figura 34. Soporte lumbar (alternativo a segunda propuesta).**	 **Figura 35. Soporte lumbar (tercera propuesta).**
Para el segundo diseño se realizó una optimización. El valor de la deformación no es tan alejado del diseño que no posee los agujeros triangulares. La ventaja radica en que se logró reducir alrededor de 100 g. con lo cual se necesitaría menos aluminio para su realización; al no tener las máquinas-herramientas necesarias el diseño no pudo ser viable.	Se propuso un nuevo diseño debido a que el segundo, a pesar de no poseer fallas estructurales, el mecanizado de dicha pieza requiere un proceso complicado y laborioso dadas las máquinas-herramientas disponibles para su realización. Este diseño se compone de un tubo metálico de 13/16 de pulgada de diámetro (aproximadamente 21 mm) diseñado con dos dobleces de ángulos de 10° para emular la posición de la columna y proporcionar una ergonomía en el diseño de la parte posterior. Cuenta con dos topes en la parte superior para ensamblar el componente que unirá los elementos de la parte superior del exoesqueleto Con el propósito de que esta parte nos permita una rotación del soporte superior,

	aumentado los grados de libertad. La parte inferior de este tubo está diseñada para ensamblarse en el soporte mostrado en la figura 27 (página 41). Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.

Figura 36. Soporte lumbar (propuesta final): Propiedades volumétricas de la pieza.

La acumulación de esfuerzos ocurre en los dobleces del tubo. La fuerza generada de 40 N genera un torque de 5.2 Nm. El tubo que se utilizó para la pieza anterior en el diámetro interno tiene un diámetro de 21 mm, por lo tanto, se utiliza este valor como diámetro externo. Se calcula el grosor mínimo que se debe tener para soportar un esfuerzo de 40 N, proponiendo un factor de seguridad de 15. Se realiza un estudio por deformación ante una carga axial:

$$\boldsymbol{M = Pd} \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{M = 40\ N(0.13\ m) = 5.2\ Nm}$$

Para el diseño del tubo lumbar se busca el esfuerzo último. Con este dato se propone utilizar un factor de seguridad alto (F.S. =15) para descartar deformaciones en la pieza.

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_u}{F.S.} \qquad (7)$$

$$\sigma_{perm} = \frac{3.1x10^8}{15} = 20.66\ MPa$$

Con el esfuerzo permisible se puede encontrar las deformaciones de la carga axial para así calcular el área del tubo y encontrar el espesor *t*. De la ecuación 3 se despeja el valor de A:

$$A = \frac{P}{\sigma_{perm}} = \frac{40\ N}{20,66\ MPa} = 1.9354x10^{-6} m^2$$

Calculando el área de un tubo, del cual se conoce el diámetro externo (diámetro interno del soporte lumbar = 21 mm), solo queda encontrar el diámetro interno del tubo lumbar. Con (4) se obtiene:

$$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 1.9354x10^{-6}\ m^2 \quad \rightarrow \quad d^2 = 0.021^2 - 2.4643x10^{-6}$$

$$d = 0.020\ m \quad \rightarrow \quad 20\ mm$$

Con los datos utilizados se obtiene un diámetro interno de 20 mm, lo cual indica que el espesor mínimo para soportar las cargas axiles es de 1 mm. Entonces, el valor mínimo para la pared del tubo es 1 mm; comercialmente los más cercano a eso es un tubo IPS con una pared de 3 mm. Se consigue así que los esfuerzos sean mucho menores debido al nuevo grosor de pared (ver figura 36). La deformación es despreciable debido al factor de seguridad propuesto dando como resultado una deformación del 0.6% con lo cual el factor de seguridad es superior al de 15 (ver figura 37).

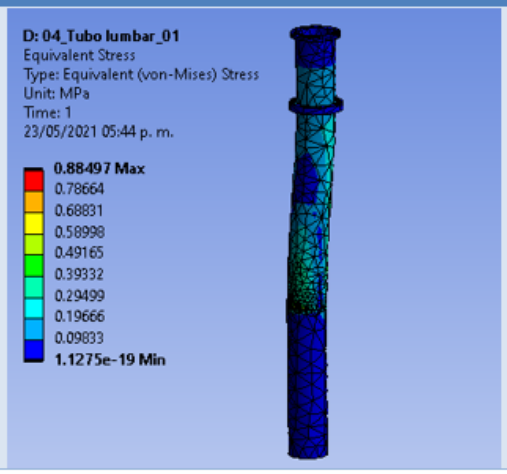
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Esfuerzo de Von-Mises. Max: 0.88497 MPa. Min: 1.1275e-19 MPa.

Figura 37. Esfuerzos de Von-Mises generados en el soporte lumbar.

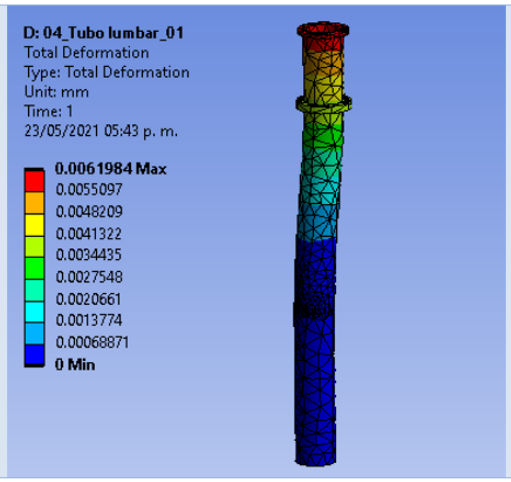
	Material: Aluminio 6061. Solución: Deformación total. Max: 0.0061984 mm. Min: 0 mm.

Figura 38. Deformación total presente en el soporte lumbar.

- **Pieza: Torso superior**

Tabla 14. Evolución en pieza torso.

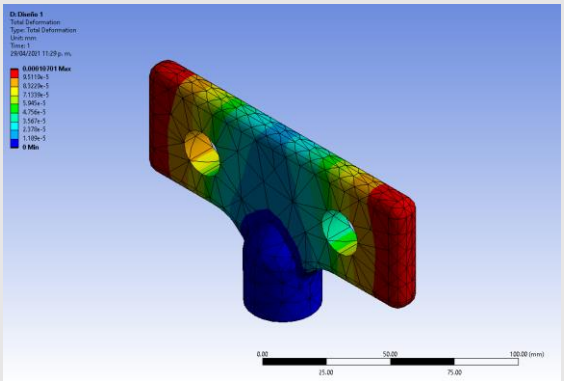
<table>
<tr>
<td> 

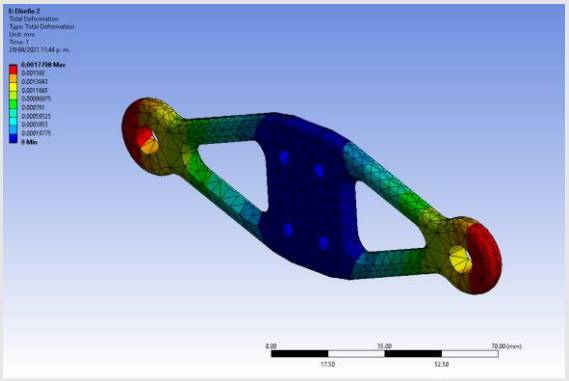
Figura 39. Torso (primera propuesta)</td>
<td> 

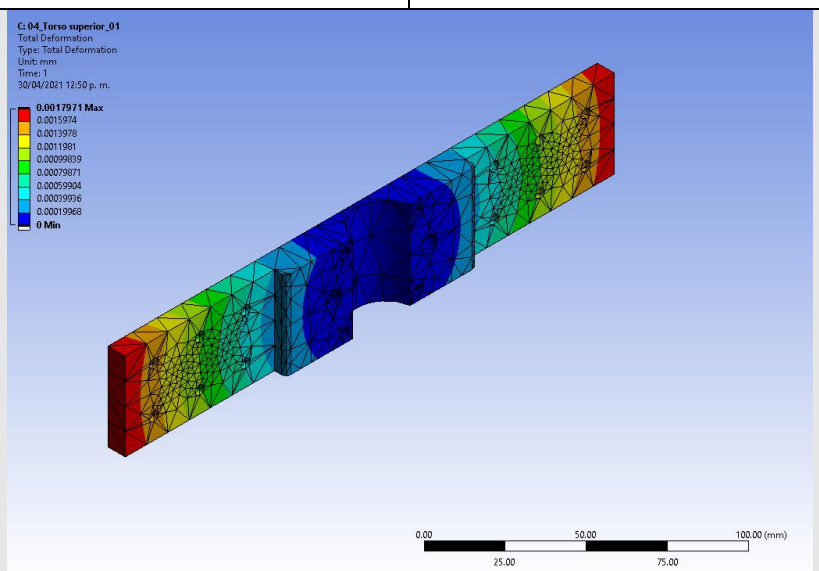
Figura 40. Torso (segunda propuesta)</td>
</tr>
<tr>
<td>Pieza metálica con dos barrenos para ensamblar la parte superior del soporte lumbar y la parte inferior de los muelles de la espalda. Se cambió el diseño debido a la nueva propuesta que aporta ergónoma al exoesqueleto.</td>
<td>Pieza metálica con orificios triangulares; esta forma es la menos propensa a sufrir deformaciones y logra eliminar material para reducir peso. Sus barrenos laterales permiten la sujeción de los muelles y los cuatro barrenos centrales la sujeción del soporte lumbar.</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2"> 

Figura 41. Torso (tercera propuesta).</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">Barra metálica con ancho promedio a las tallas de espalda baja, con barrenos laterales y una cavidad de semicírculo en la parte central que se ajusta a una abrazadera</td>
</tr>
</table>

comúnmente usadas en potencias de bicicleta de medida estándar (una pulgada). Los barrenos laterales permiten la sujeción de los muelles. La cavidad central permite el ensamble del torso en el soporte lumbar permitiendo cierto grado de giro y estabilidad a la parte superior del exoesqueleto. Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.

Figura 42, Torso (propuesta final): Propiedades volumétricas de la pieza.

Aplicando los conceptos de flexión pura, se identifican las fuerzas que están influyendo en la pieza.

$$\boldsymbol{F}y = -muelle_{izq} + soporte\ de\ torso - muelle_{der} = 0 \qquad (8)$$

Se propone un porcentaje de deformación unitaria del 0.2% ($\boldsymbol{\delta = 0.002}$) para calcular los esfuerzos en la sección transversal.

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{Mc}{I}} \qquad (9)$$

Utilizando los valores de las propiedades físicas del material, con el módulo de Young y el porcentaje de deformación se calcula el esfuerzo axial mediante la fórmula de la ley de Hooke.

$$\boldsymbol{\sigma = E\epsilon = 68.9\ GPa(0.0002) = 13.78\ MPa}$$

Se considera que las cargas axiales están en los extremos, lo cual genera un momento flector que provoca esfuerzos de tensión en la parte superior y esfuerzos de compresión en la parte inferior. Mediante ecuación 6 se tiene:

$$\boldsymbol{M = 40\ N(0.75\ m) = 30\ Nm}$$

Se considera una altura h = 38 mm de la pieza dado que la abrazadera utilizada es la que se emplea en la potencia estándar de una bicicleta, la cual tiene una altura aproximada de 37 mm y se necesita tener cierta superficie para realizar los agujeros en donde ésta irá sujeta. Como la pieza tiene una geometría rectangular se utiliza la siguiente fórmula para calcular el momento de inercia:

$$\boldsymbol{I = \frac{bh^3}{12}} \qquad (10)$$

$$\boldsymbol{I = \frac{b * (0.038\ m)^3}{12} = b(4.5726x10^{-6}m^3)}$$

$$\boldsymbol{I = (4.5726x10^{-6}m^3)b} \qquad (11)$$

Se conoce el esfuerzo que hay en la pieza, el momento que la fuerza genera y el momento de inercia. Considerando las igualdades de la expresión (9) y (11), se obtiene el valor de *b:*

$$\boldsymbol{b = \frac{30\ N * 0.019\ m}{4.5726x10^{-6}(13.78\ MPa)} = \frac{0.57}{63.0113} = 9.0459\ x\ 10^{-3} = 9\ mm}$$

El ancho del torso superior se determina del promedio del ancho de la espalda de los datos recabados. La acumulacion de esfuerzos se encuentran en los barrenos generados que sirvieron como punto de anclaje entre el tubo lumbar y el torso.

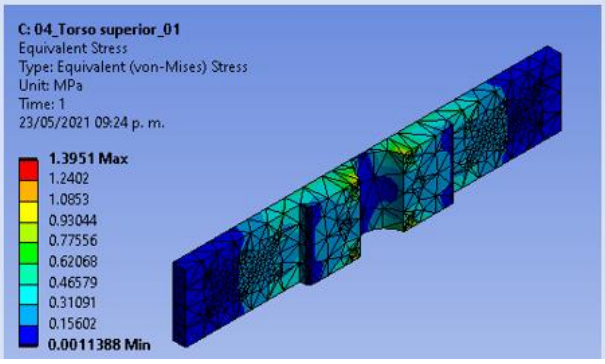
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Esfuerzo de Von-Mises. Max: 1.3951 MPa. Min: 0.0011388 MPa.

Figura 43. Esfuerzos de Von-Mises generados en la pieza torso.

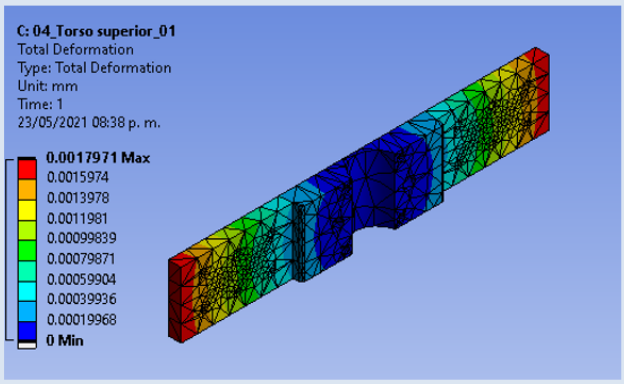
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Deformación total. Max: 0.0017971 mm. Min: 0 mm.

Figura 44. Deformación total presente en la pieza torso.

A pesar de tener una deformación despreciable como se muestra en la figura 43, se observa que dicha deformación se encuentra en los extremos, los cuales están en contacto con la carga unitaria de 40 N.

- **Pieza: Muelle**

Tabla 15. Evolución de modificaciones en pieza muelle.

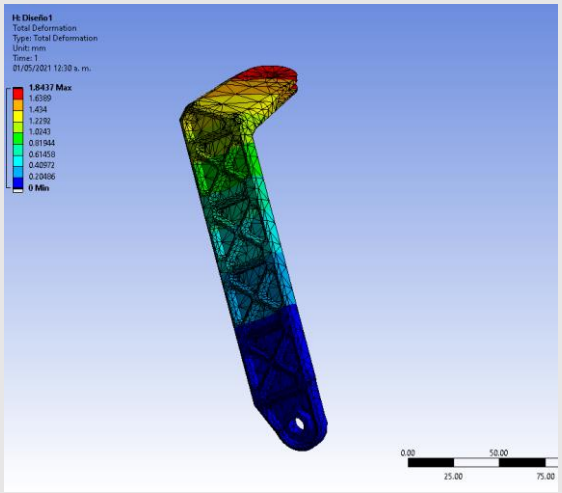
<table>
<tr>
<td> 

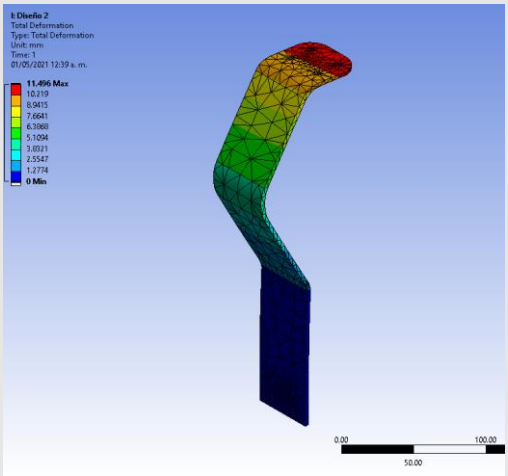
Figura 45. Muelle (primera propuesta).</td>
<td> 

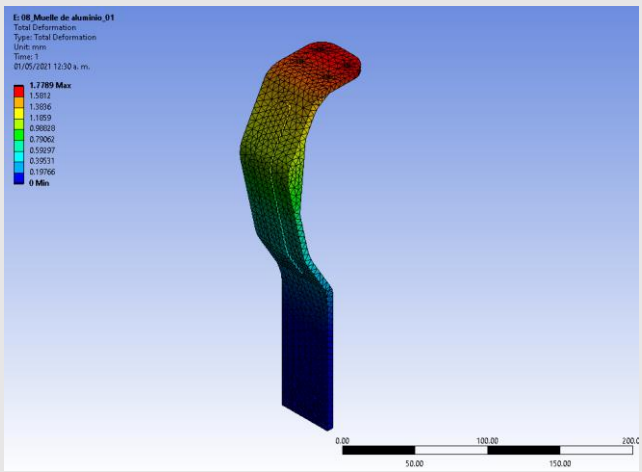
Figura 46. Muelle (segunda propuesta).</td>
</tr>
<tr>
<td>Muelle metálico delgado que cruza la zona que va desde la espalda baja hasta la parte superior de los hombros.</td>
<td>Muelle metálico delgado con dobleces redondeados que permiten un movimiento más libre en la zona de la espalda y cuello del usuario.</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2"> 

Figura 47.. Muelle (tercera propuesta).</td>
</tr>
<tr>
<td colspan="2">Muelle metálico diseñado a partir de la segunda propuesta. Cuenta con nervios y protrusiones metálicas que sobresalen en distintas partes del muelle, con el fin de aportar mayor rigidez a la pieza. Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.</td>
</tr>
</table>

Figura 48. Muelle (propuesta final): Propiedades volumétricas de la pieza.

Con la eliminación de los ángulos pronunciados en la pieza se disminuye el momento flector que la fuerza de 40 N produce en el elemento, de la misma forma en que la implementación de los nervios en la zona intermedia ayuda a que el esfuerzo de Von-Mises disminuya.

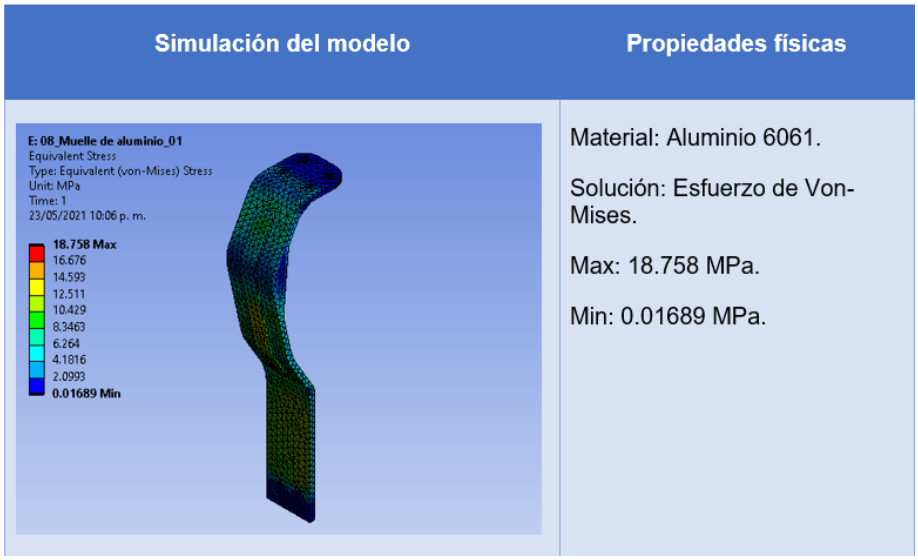


Figura 49. Esfuerzos de Von-Mises generados en el muelle.

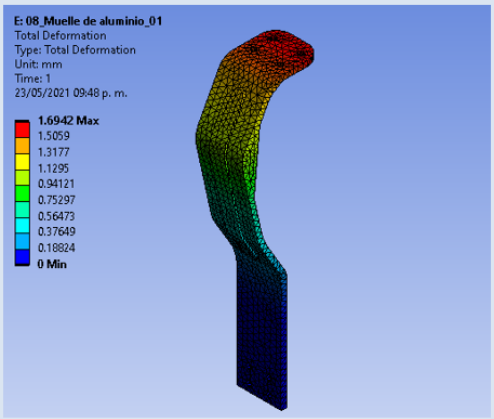
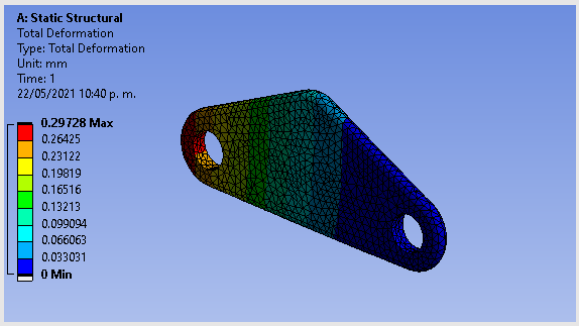
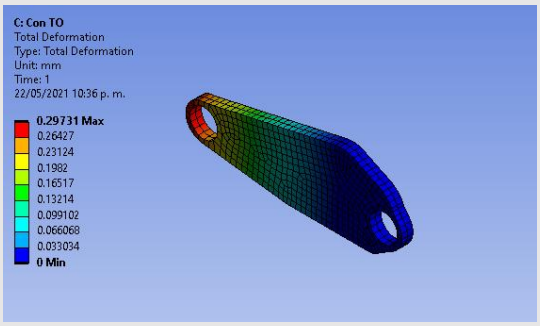
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Deformación total. Max: 1.6942 mm. Min: 0 mm.

Figura 50. Deformación total presente en el muelle.

El valor de la deformación disminuyó de 11.5 mm a 1.6942 mm, con la de los nervios y del relieve realizado en la parte posterior de la pieza. La posición de los agujeros con los cuales irá sujeta al torso, se hicieron ligeramente más separados de la parte inferior con el propósito de disminuir el brazo flector que producía un mayor momento.

- **Pieza: Eslabón intermedio**

Tabla 16. Evolución de modificaciones en pieza Eslabón Intermedio.

 **Figura 51. Eslabón intermedio (propuesta inicial).**	 **Figura 52. Eslabón intermedio (primera modificación):**
Eslabón triangular metálico con dos barrenos laterales para unir dos piezas distintas y	Eslabón sometido a una optimización topológica logrando una reducción

permitir una junta de revoluta. La forma triangular es para deformación en la parte intermedia de la pieza y también funciona como límite geométrico al giro del elemento.	material sin sacrificar el límite elástico con una forma más estilizada con el fin de disminuir peso y volumen a la pieza; tal como se observa en ambas figuras. Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.

Figura 53. Eslabón intermedio (propuesta final): Propiedades volumétricas.

Para encontrar el valor de la base del eslabón, se propone que la pieza tenga un espesor de 5 mm y un largo máximo de 60 mm. Esta es una de 3 piezas que ayudan con el movimiento de la zona de los hombros, conociendo esto, se calcula el esfuerzo utilizando un factor de seguridad, N = 3.

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{Sy}{N}} \qquad (12)$$

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{110\ MPa}{3} = 36.66\ MPa}$$

La pieza está expuesta a cargas axiales por lo que se genera un momento en el elemento. Éste se calcula a continuación con ayuda de la ecuación 6:

$$\boldsymbol{M = 40N(0.065m) = 2.6\ Nm}$$

Utilizando la teoría de flexión pura en elementos sometidos a una carga axial, y dado que se conocen los valores del esfuerzo y el momento que están en la pieza; se calcula su momento de inercia para encontrar el valor mínimo que se requiere en la base de la pieza para soportar dichos esfuerzos. Con (10) y (9), respectivamente se tiene el valor de *b*:

$$\boldsymbol{I = \frac{b\,(0.005)^3}{12} = b(1.0416x10^{-8})}$$

$$\boldsymbol{\sigma = \ 36.66\ Mpa = \frac{2.6\ N\ (0.0025m)}{b(1.0416x10^{-9})}}$$

$$\boldsymbol{b = \frac{6.5x10^{-3}}{36.66x10^{6}\ (1.0416x10^{-8})} = 17.05\ m}$$

Se tiene que el valor mínimo es de 17 mm para la zona en donde es más probable que la pieza alcance el valor de esfuerzo último.

Se calcula el valor para el diámetro mínimo del agujero para el eslabón. Se utiliza la teoría de torsión que se ejerce en el perno que permite unirlo con otras piezas.

$$\boldsymbol{F = \frac{1}{2}P} \qquad (13)$$

$$\boldsymbol{F = \frac{40}{2} = 20\ N}$$

Se calcula el valor del diámetro *d* utilizando (14) en (15)

$$A = \boldsymbol{\frac{\pi d^2}{4}} \qquad (14)$$

$$\boldsymbol{\tau = \frac{F}{A}} \qquad (15)$$

$$\boldsymbol{\tau = \frac{20\ N}{\frac{\pi d^2}{4}}\ \rightarrow\ 100\ Kpa = \frac{20\ N(4)}{\pi d^2}}$$

$$\boldsymbol{d^2 = \frac{80\ N}{7\ MPa(\pi)}\ \rightarrow d = 0.01062\ m\ \rightarrow 10\ mm}$$

Se obtiene un resultado con valor de 10 mm, por lo que se utiliza una broca de 3/8 de pulgada (medida más aproximada al valor calculado).

Como se trata del eslabón más cercano al punto de anclaje, se propone que el diseño sea con forma de triángulo para que la pieza sea más robusta, disminuyendo así los valores del esfuerzo de Von-Mises. Se sometió la pieza a una optimización topológica en *Ansys* para disminuir la masa de ésta, logrando una reducción de material sin sacrificar su resistencia a una fuerza de 40 N. Tal como se aprecia en la figura 53, el valor del esfuerzo de Von-Mises es menor al eslabón que le sigue en la cadena cinemática. En la figura 54 se describe que la pieza presenta deformaciones en la punta que está en contacto con la carga o el eslabón externo; aunque la deformación es mínima, no se compromete la pieza a un rango de falla critica.

Figura 54. Esfuerzos de Von-Mises generados en el eslabón intermedio.

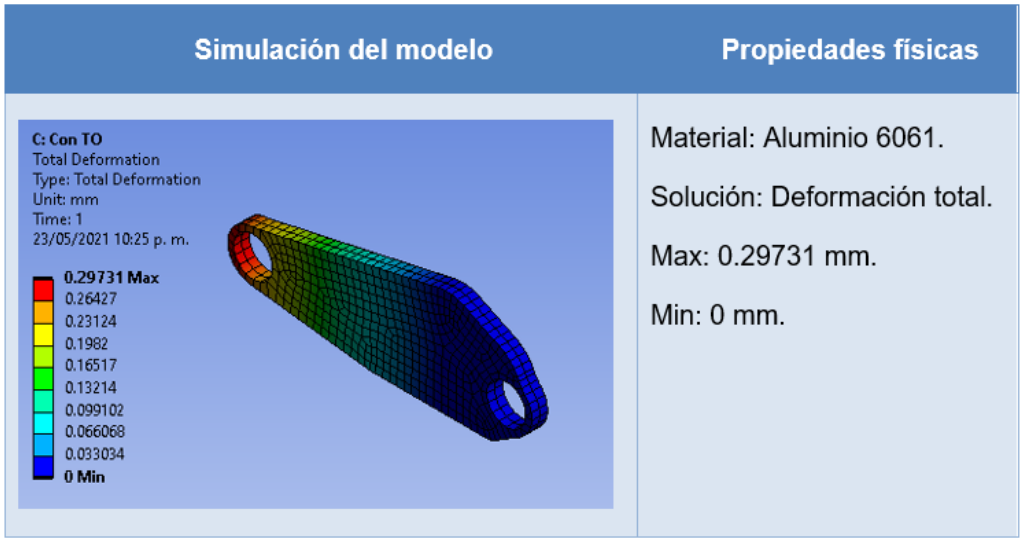


Figura 55. Deformación total presente en Eslabón intermedio.

- **Pieza: Acoplador**

En la pieza acoplador no hay una evolución del elemento.

Figura 56. Acoplador: Propiedades volumétricas.

En el diseño del Acoplador, el cual está sometido a una carga de 40 N, se parte de que el diseño al menos requiere un largo de 800 mm con el fin de abarcar la longitud necesaria de las tallas chica (CH) hasta la grande (G), por lo que se utilizará un mecanismo en cadena.

Se propuso un factor de seguridad de 15. Como se conoce el esfuerzo de fluencia se calcula el esfuerzo de compresión. Con la ecuación 12 se tiene que:

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{110\ MPa}{15} = 7.33\ MPa}$$

Como la fuerza genera un momento en el extremo, se calcula dicho momento y se utiliza la ecuación del esfuerzo en función del momento de inercia (ecuación 9).

Con la ecuación 6 se tiene:

$$\boldsymbol{M = Pd = 40\ N(0.0395\ m) = 1.58\ Nm}$$

Se calcula el valor de *I* para una forma rectangular utilizando la siguiente expresión:

$$\boldsymbol{I = \frac{b^3 h}{12}} \qquad (16)$$

$$\boldsymbol{I = \frac{(0.0125)^3 h}{12} = h(1.6276x10^{-7} m^3)}$$

Se despeja el valor de la altura del momento de inercia para un área transversal rectangular obteniendo un resultado de 16 mm de grosor. Considerando que este valor es un poco elevado dado que resulta algo brusco, se vuelve a recalcular todo. Esta vez se usa un factor de seguridad más pequeño para la reducción de tamaño y masa:

$$\boldsymbol{h = \frac{1.58\ N(0.0125\ \ m)}{1.6276x10^{-7} m^3 (7.33\ MPa)} = 0.01655 = 16.55\ mm}$$

Usando un factor de seguridad con valor de 10 se obtiene un valor de h = 11 mm:

$$\boldsymbol{h = \frac{1.58\ N * 0.0125\ \ m}{1.6276x10^{-7} m^3 (11\ MPa)} = 0.01103 = 11\ mm}$$

El acoplador se sujeta al muelle y se extiende el punto de anclaje para el eslabón interno, por ello se necesita conocer cuál es el espesor mínimo que se requiere para que éste no llegue al punto de fractura por la generación de momentos. Tal como se muestra en la figura 56 donde la acumulación del esfuerzo de Von-Mises se da en el extremo.

En la figura 57 se puede observar que la deformación es muy pequeña, por lo que se puede considerar despreciable gracias a tener un factor de seguridad superior a la unidad. La deformación solo se restringe en el extremo lo cual no afecta la integridad de la pieza completa. Los bordes redondeados también ayudan a proporcionar una mejor distribución de la carga.

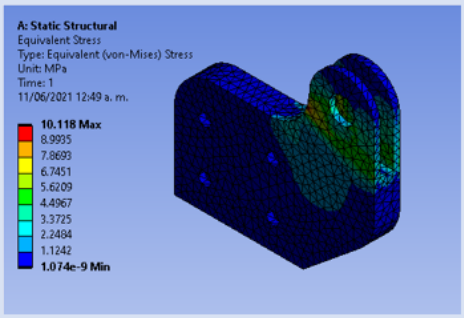
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Esfuerzo de Von-Mises. Max: 10.118 MPa. Min: 1.074e-9 MPa.

Figura 57. Esfuerzos de Von-Mises generados en el acoplador.

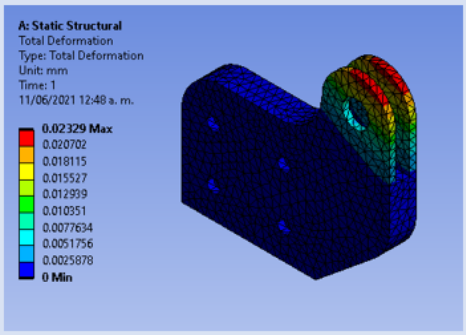
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Deformación total. Max: 0.02329 mm. Min: 0.0 mm.

Figura 58. Deformación total presente en el acoplador.

- **Pieza: Eslabón exterior**

En la pieza eslabón exterior no hay evolución del elemento.

Figura 59. Eslabón exterior: propiedades volumétricas.

Para encontrar el valor de la base del eslabón se propone que la pieza tenga un espesor de 5 mm y un largo máximo de 60 mm. Esta es una de 3 piezas que ayudan con el movimiento de la zona de los hombros. Conociendo estos valores, se calcula el esfuerzo utilizando un factor de seguridad igual a tres. Con (12) se obtiene:

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{110\ Mpa}{3} = 36.66\ MPa}$$

La pieza está expuesta a cargas axiales, hecho que genera un momento flector en el elemento. Se tiene el cálculo a continuación con ayuda de la ecuación 6:

$$\boldsymbol{M = 40N(0.06\ m) = 2.4\ Nm}$$

Utilizando la teoría de flexión pura en elementos sometidos a una cara axial, y conociendo los valores del esfuerzo y el momento que están en la pieza, se calcula su momento de inercia (ecuación 3) para encontrar el valor mínimo que se requiere en la base de la pieza para soportar dichos esfuerzos:

$$I = \frac{b(0.005m)^3}{12} = b(1.0416x10^{-8}m^3)$$

Se despeja el valor de la base de la ecuación del esfuerzo principal que se genera en la pieza:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \rightarrow 36.66\ MPa = \frac{2.4\ N\ (0.0025m)}{b * 1.0416x10^{-8}m^3}$$

$$b = \frac{6x10^{-3}\ Nm}{36.66x10^6\ Pa\ (1.0416x10^{-8}m^3)} = 0.01579\ m$$

$$0.01579\ m\ \rightarrow 15.79\ mm$$

Ahora se calcula el valor para el diámetro mínimo del agujero para el eslabón. Se utiliza la teoría de torsión (ecuación 13) que se ejerce en el perno que permite unirlo con otras piezas.

$$F = \frac{40}{2} = 20\ N$$

El torque en el perno es de 7 MPa localizado en las áreas transversales que están en contacto con él:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{20\ N}{\frac{\pi d^2}{4}} \rightarrow 7\ MPa = \frac{4(20\ N)}{\pi d^2}$$

$$d^2 = \frac{80\ N}{7\ MPa(\pi)} \rightarrow d = 0.01062\ m\ \rightarrow 10\ mm$$

Se tiene un valor de 10 mm, por lo que se utiliza una broca de 3/8 de pulgada siendo la medida más aproximada al valor obtenido.

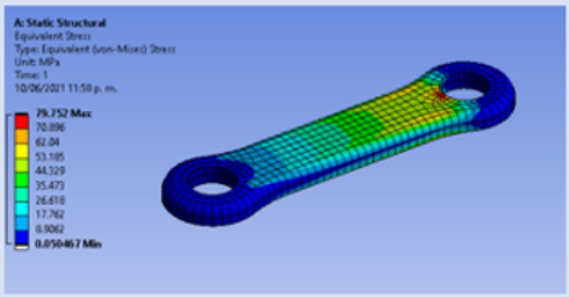
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Esfuerzo de Von-Mises. Max: 79.752 MPa. Min: 0.050467 MPa.

Figura 60. Esfuerzos de Von-Mises generados en el eslabón exterior.

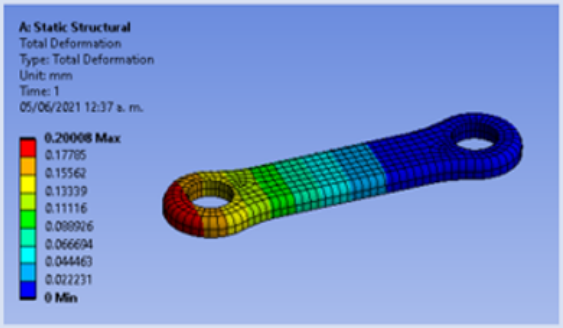
Simulación del modelo	Propiedades físicas
	Material: Aluminio 6061. Solución: Deformación total. Max: 0.20008 mm. Min: 0.0 mm.

Figura 61. Deformación total presente en el eslabón exterior.

Obtener un factor de seguridad de 3 provoca que los esfuerzos de Von-mises se concentren en el agujero de sujeción y se van disipando hacia el otro extremo de la pieza

La deformación es mínima mas no despreciable y se encuentra localizada en el extremo donde está localizada una carga puntual de 40 N. Los bordes redondeados en la parte superior donde se encuentran los esfuerzos de tensión ayudan a que la deformación sea menor.

- **Pieza: Caja de resorte**

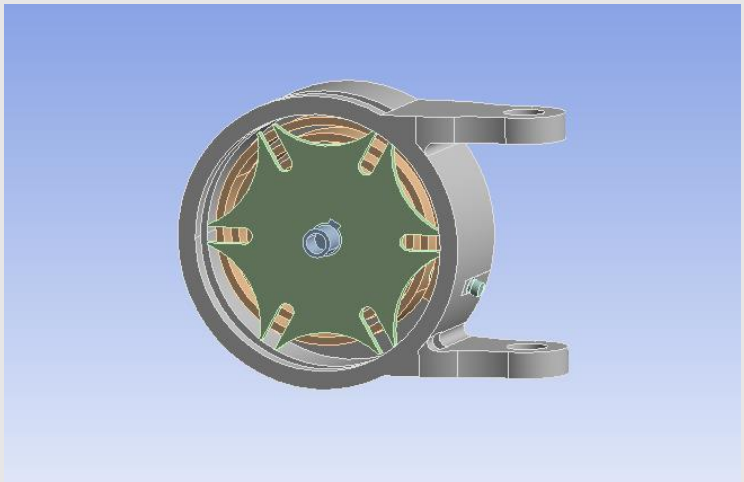


Figura 62. Caja de resorte

Mecanismo propuesto para el ajuste de la tensión del resorte metálico diseñado a partir de la segunda propuesta. Cuenta con una cruz de Malta y el disco impulsor. El disco impulsor posee protrusiones metálicas que sobresalen en posiciones opuestas con el fin de que la tensión del resorte se ajuste cada 60°. En el mecanismo de Ginebra se cuenta con 6 posiciones de fuerza para el resorte a utilizar. Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.

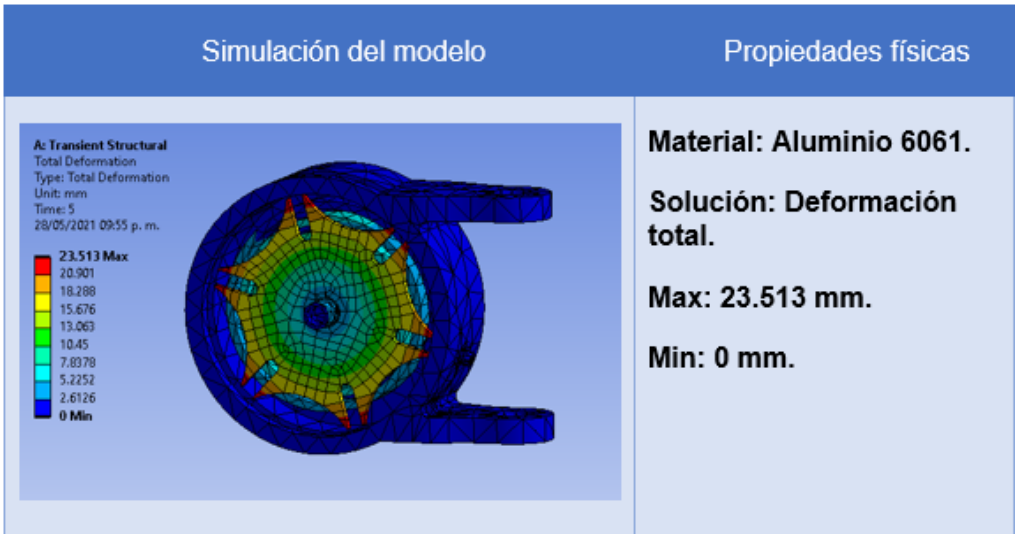


Figura 63. Deformación total presente en la caja de resorte.

- **Pieza: Resorte de espiral**

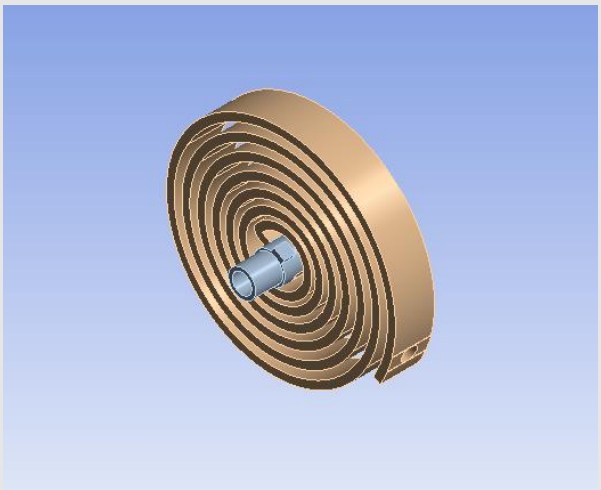


Figura 64. Resorte del mecanismo de Ginebra.

Diseño propuesto para la sujeción del resorte a la base de la caja de torque en donde se montará el resorte en forma espiral metálico diseñado a partir de la segunda propuesta. Este diseño se utilizó para el exoesqueleto.

Para obtener un resorte de espiral con las características deseadas, se utilizó el siguiente modelo de diseño con los parámetros descritos en la tabla 17. Cabe resaltar que para poder obtener los valores de la constante del resorte y los esfuerzos de tensión generados en el

mismo se tuvieron que proponer ciertos valores, considerando los parámetros de diseño ya presentes en las piezas que tendrán contacto con el resorte al momento de ensamblarse en la caja de torsión. Suponiendo D=59 mm, d = 15 mm, y número de espiras del resorte, (n), tenemos:

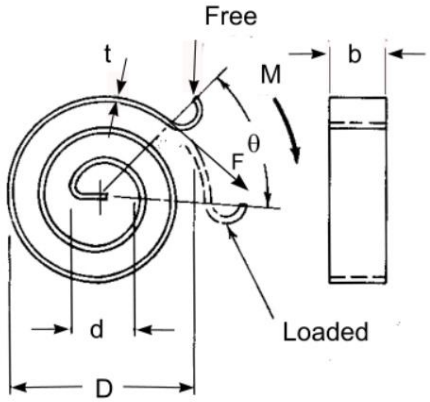


Tabla 17. Parámetros del resorte.

Símbolo	Descripción	Valor	Unidades
E	Módulo elástico longitudinal	186 x 10^3	N/mm^2
b	Ancho de material	10	mm
t	Grosor	2	mm
L	Longitud	¿?	mm
M	Momento de torsión	¿?	Nmm
K	Constante del resorte	¿?	Nmm/rad
σ	Tensión	¿?	N/mm^2
Material del Resorte		Valor de Módulo elástico	
Acero Inoxidable	SUS304	186 x 10^3	

Longitud del resorte

$$\boldsymbol{L = \frac{\pi n(D+d)}{2}} \qquad (17)$$

$$\boldsymbol{L = \frac{3\pi(5.9+1.5)cm}{2}}$$

$$\boldsymbol{L =} \text{ 34.87 cm}$$

Se utiliza la fórmula para calcular la constante del resorte (*k*):

$$k = \frac{Ebt^3}{12l} \qquad (18)$$

$$k = \frac{(186\ x10^3\ \mathrm{N/mm2})10\ mm(2\ mm)^3}{12(348.7\ mm)}$$

$$k = 3556\ \mathrm{Nmm/rad}$$

Ahora se calcula el momento de torque por cada vuelta de 360°:

$$M = 3556\ Nmm/rad * 2\pi$$
$$M = 22343\ Nmm$$

Con una relación de regla de tres, dividiendo el momento de torque entre cada nivel de fuerza (60° por nivel), se tiene el siguiente resultado:

$$M_{60°} = 3723.83\ Nmm$$

Para la tensión del resorte generada por el momento de torsión para cada nivel:

$$\sigma = \frac{6M}{bt^2} \qquad (19)$$

$$\sigma = \frac{6(3723.83\ Nmm)}{10\ mm(2\ mm)^2}$$

$$\sigma = 558.57\ N/mm^2$$

Se observa en los resultados que la variable que influye en la magnitud de la contante y la tensión del resorte es el valor de la longitud del mismo (*L);* siendo así, el número de espiras (n) el factor de diseño clave para ajustar el resorte a los valores deseados.

Figura 65. Esfuerzos de Von-Mises generados en el resorte.

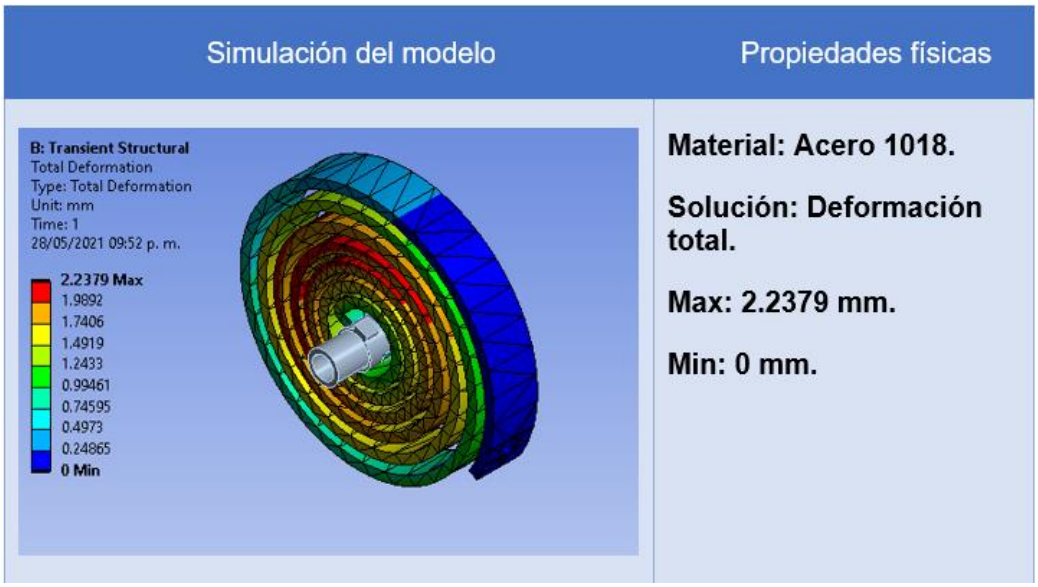


Figura 66. Deformación total presente en el resorte de espiral.

- **Pieza: Mecanismo de Ginebra**

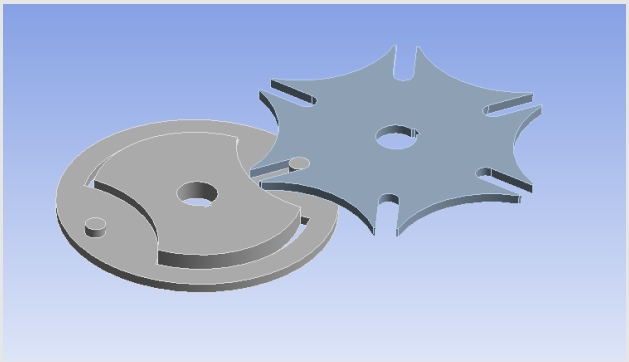


Figura 67. Mecanismo de Ginebra.

Mecanismo propuesto para el ajuste de la tensión del resorte metálico diseñado a partir de la segunda propuesta. Cuenta con una cruz de Malta y el disco impulsor. En el disco impulsor posee protrusiones metálicas que sobresalen en posiciones opuestas con el fin de que la tensión del resorte sea cada 180°. En el mecanismo de Ginebra cuenta con 6 posiciones de fuerza para el resorte a utilizar. Este diseño se utilizará para el exoesqueleto.

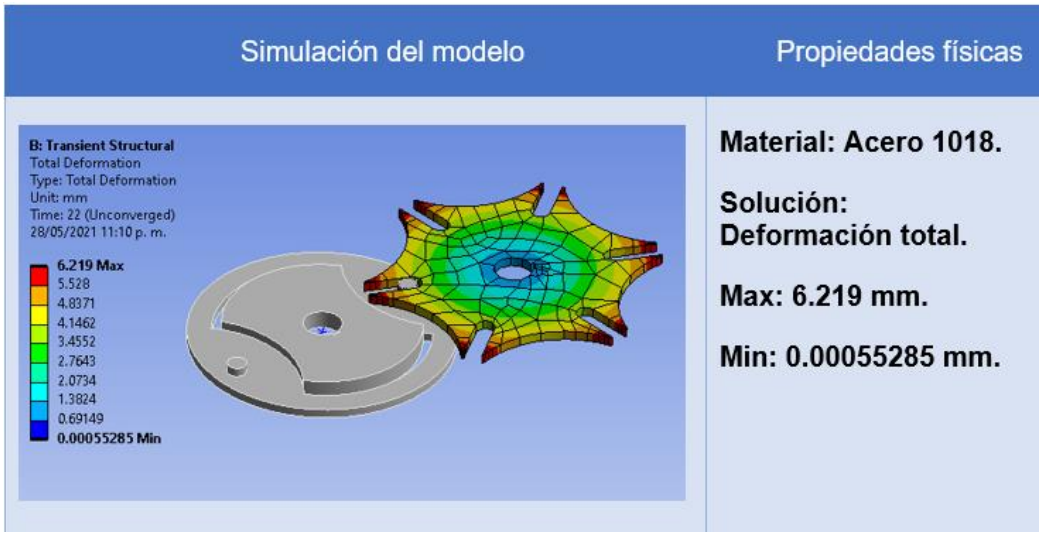


Figura 68. Deformación total presente en el mecanismo de Ginebra.

ENSAMBLE GENERAL DEL EXOESQUELETO (PROTOTIPO FINAL)

Después de haber presentado los resultados de la simulación estática de esfuerzos de las piezas que, por su naturaleza cinemática, requieren mejores criterios de diseño para su óptimo funcionamiento; en las imágenes que comprenden las figuras 73 a 100 (página 75), se enlistan gráficamente la mayoría de las piezas que conforman el ensamble general del exoesqueleto propuesto. Del listado de imágenes presentadas, se tienen también una serie de representaciones gráficas del uso del exoesqueleto puesto en un usuario, así como de las amplitudes que permite el ensamble de los eslabones superiores del exoesqueleto (ver figuras 68 a 71).

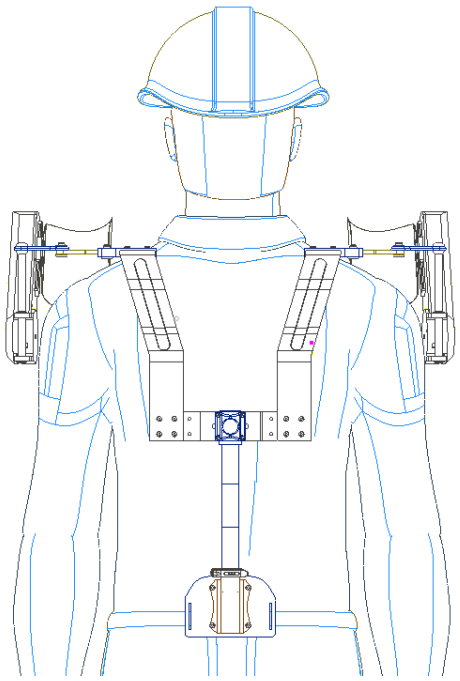


Figura 69. Representación gráfica del uso del exoesqueleto (vista posterior en modelo de alambre).

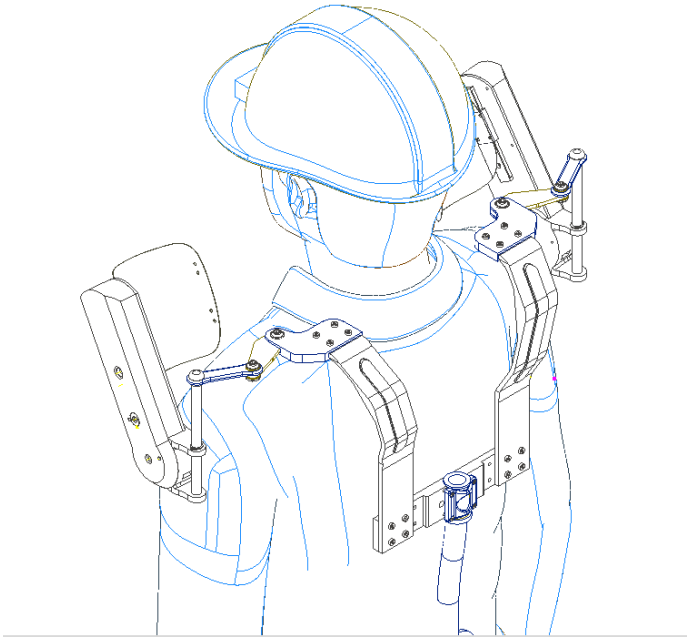


Figura 70. Representación gráfica del uso del exoesqueleto (vista isométrica en modelo de alambre).

Amplitud y rango de movimiento en eslabones y caja de torque

La amplitud y rango de movimiento en cada una de las piezas móviles que componen al exoesqueleto van relacionadas directamente con los grados de libertad que posee éste, así como las limitaciones dimensionales con las que se diseñaron las piezas implicadas en las diferentes juntas.

En la figura 70 se puede observar que el par de revoluta presente en la caja de torque permite un rango de movimiento en dos dimensiones, teniendo así una amplitud de 148.8 grados con respecto a la vertical y de forma ascendente.

Respecto a los pares cinemáticos que comprenden el conjunto de eslabones que forman parte del subensamble superior del prototipo, se muestran imágenes de las configuraciones de movimiento que permiten una amplitud de movimiento máxima y mínima (medidas en mm); La configuración propuesta permite que usuarios con distintas medidas de ancho de hombros puedan portarlo sin ninguna restricción.

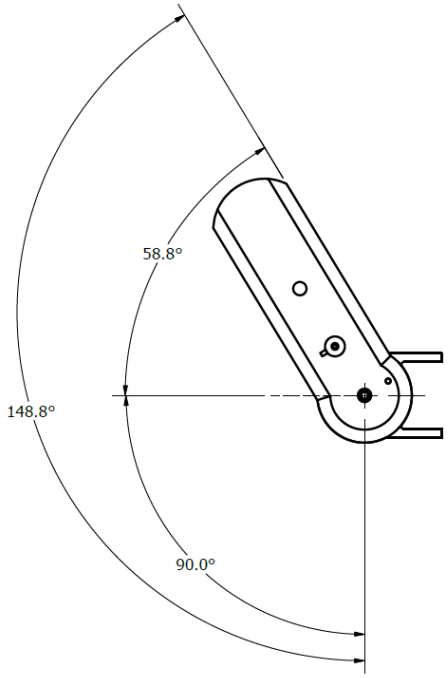


Figura 71. Grados de amplitud alcanzados por la caja de torque.

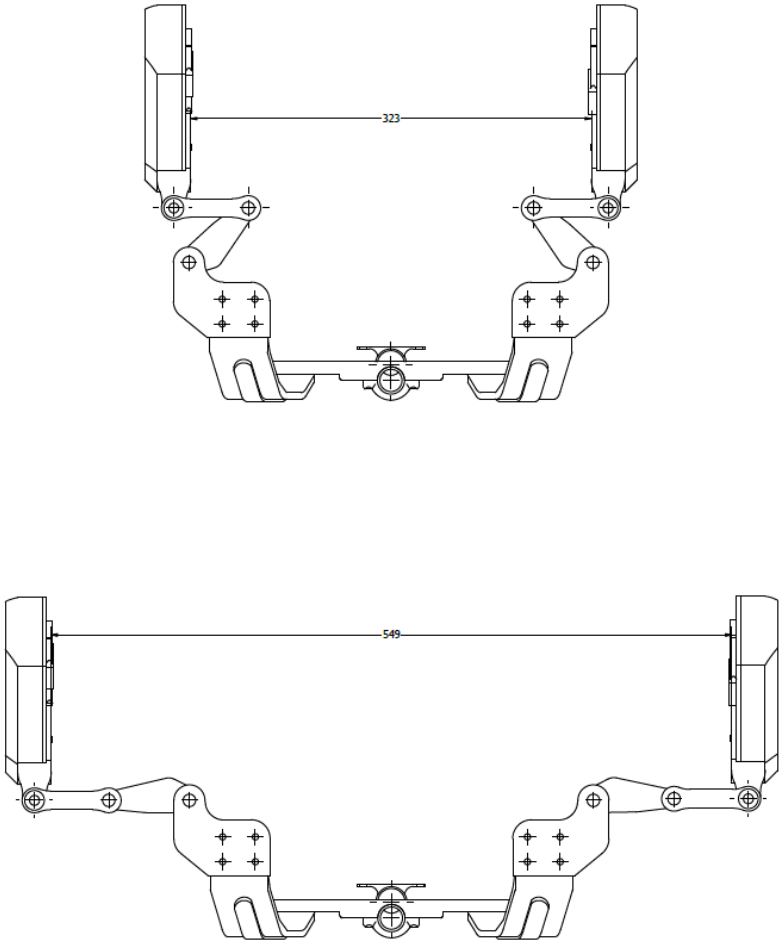
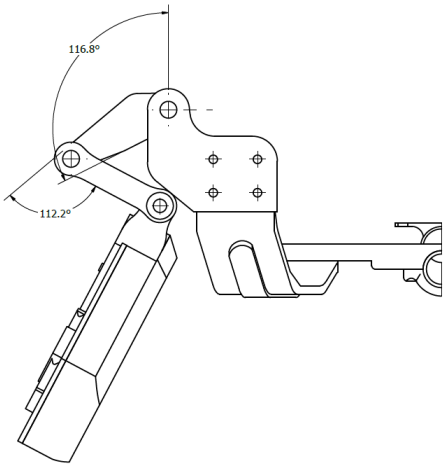
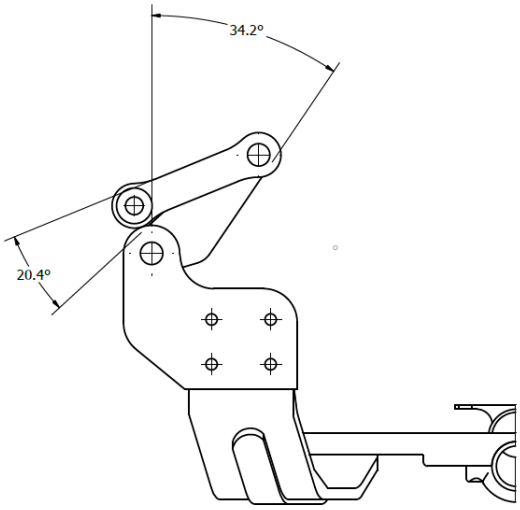


Figura 72. Amplitud alcanzada en eslabones superiores.

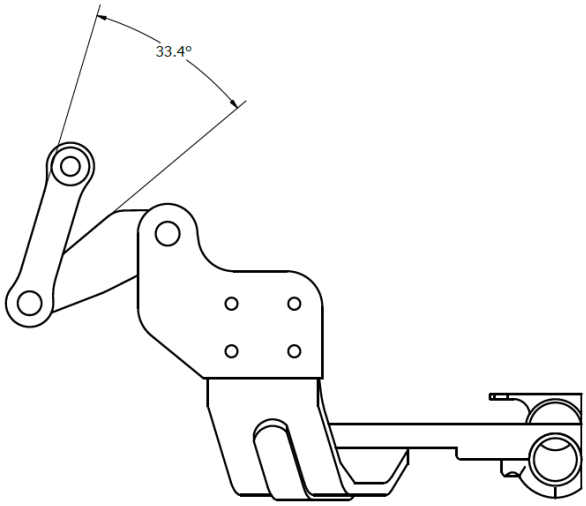
Como se puede ver en la figura 71, el máximo valor alcanzado es de 549 mm; el mínimo es de 323 mm. Por otro lado, para los pares de revoluta presenten en los eslabones, se muestran a continuación las imágenes de los grados de movimiento que se generan entre el eslabón central y exterior; mostrando de esta forma la extensión máxima permitida entre ellos, así como la extensión mínima.



a) Extensión máxima entre eslabones



b) Extensión mínima entre eslabones.



c) Amplitud mínima entre eslabón central y exterior.

Figura 73. Grados de amplitud en eslabones (acoplador, eslabón central y exterior).

Listado de piezas

Ensamble Inferior:

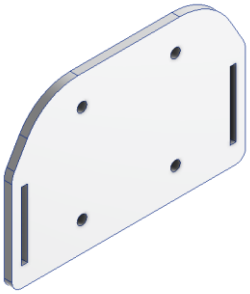


Figura 74. Faja.

Figura 75. Soporte de tubo.

Figura 76. Tubo lumbar.

Figura 77. Abrazadera

Ensamble superior:

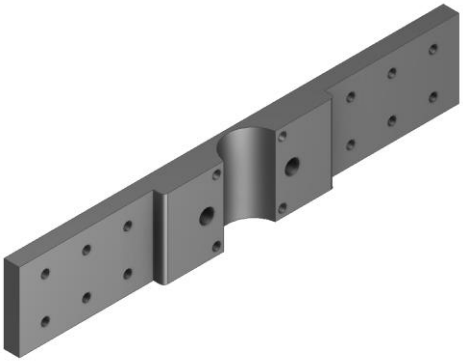


Figura 78. Torso.

Figura 79. Abrazadera torso.

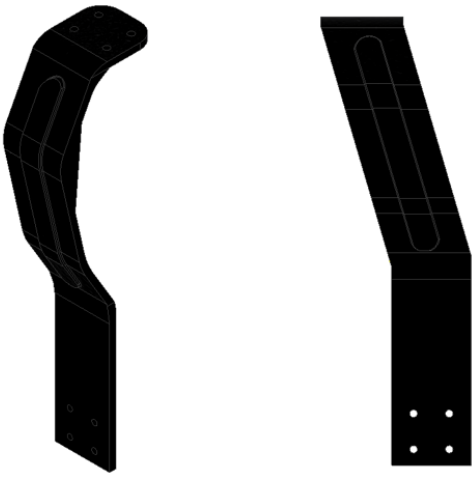


Figura 80. Muelle.

Figura 81. Tubo vertical.

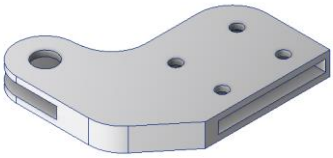


Figura 82. Acoplador.

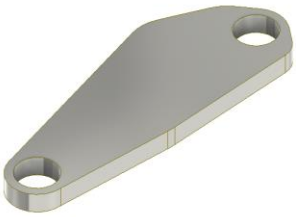


Figura 83. Eslabón interno.

Figura 84. Eslabón externo

Figura 85. Caja de torque.

Caja de torque:

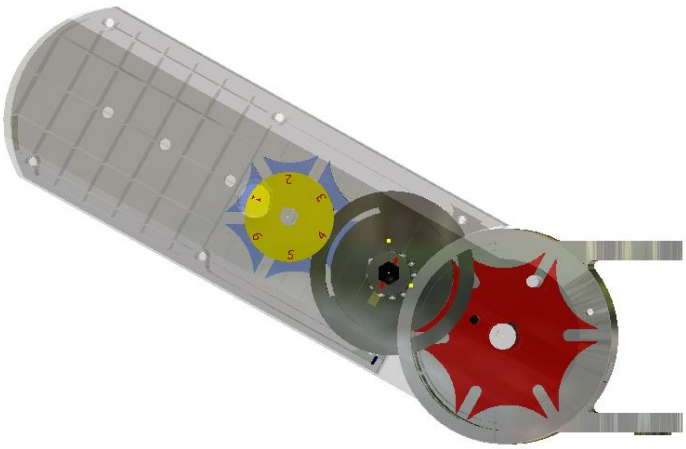


Figura 86. Componentes de caja de torque.

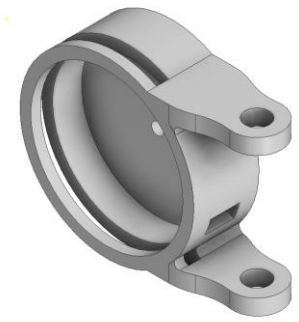


Figura 87. Base de carcasa

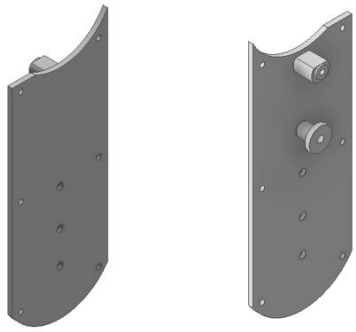


Figura 88. Carcasa posterior.

Figura 89. Carcasa frontal.

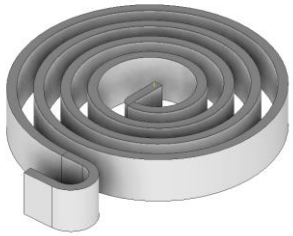
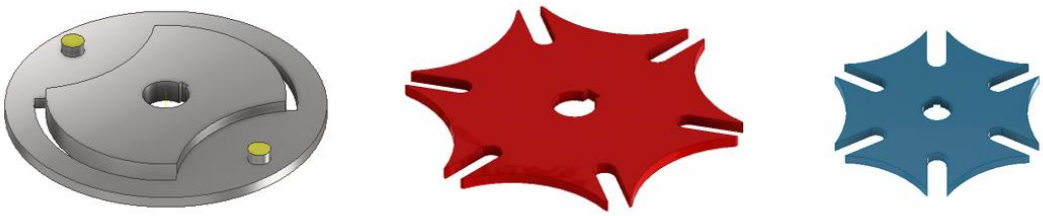


Figura 90. Resorte de espiral.



a) Rueda impulsora b) Cruz de malta superior e inferior.

Figura 91. Mecanismo de rueda de Ginebra.

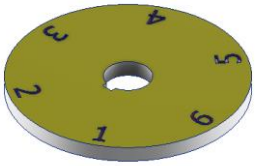


Figura 92. Rueda indicadora.

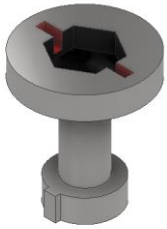


Figura 93. Tornillo de mecanismo.

Figura 94. Tornillo de eje de centro.

Figura 95. Eje de centro.

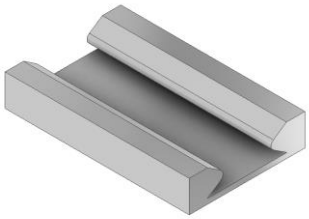


Figura 96. Corredera móvil.

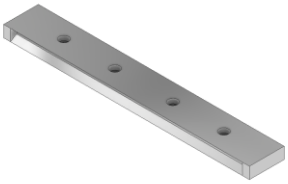


Figura 97. Corredera fija.

Figura 98. Perno de bloqueo.

Figura 99. Esfera de acero.

Figura 100. Soporte para brazo.

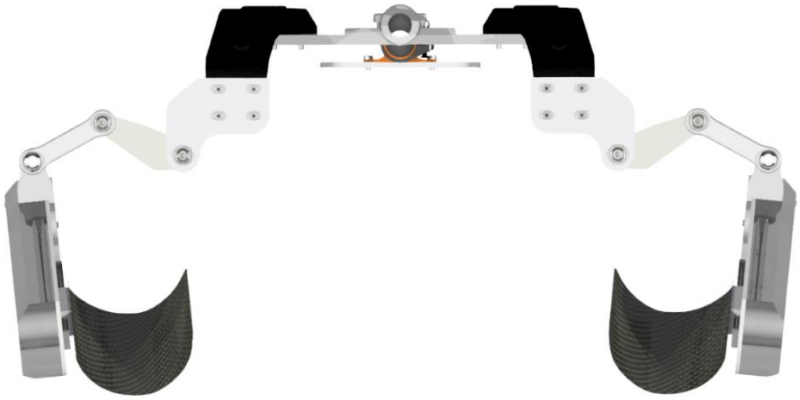
Figura 101. Pivote de carcasa

Ensamble general:

a) Vista isométrica

b) Vista lateral

c) Vista posterior.



d) Vista Superior.

Figura 102. Vistas del exoesqueleto diseñado en Inventor (a-d).

Tabla 18. Propiedades físicas de partes que componen el prototipo.

PARTE DE ENSAMBLE		PIEZA	No. De Piezas	MATERIAL	AISI	MASA (kg)	VOLUMEN (cm^3)
Ensamble Inferior		Faja	1	Aluminio	6061	0.09	34.91
		Tubo Lumbar	1	Aluminio	"	0.09	32.27
		Soporte lumbar	1	Aluminio	"	0.05	20.04
		Torso	1	Aluminio	1045	0.19	69.31
		Abrazadera de Torso	1	Aluminio	6061	0.01	5.34
		Abrazadera	1	Aluminio	"	0.01	5.93
Ensamble Superior		Muelle	2	Acero al medio Carbono	1045	0.80	79.86
		Acoplador	2	Aluminio	"	0.07	25.23
		Eslabon central	2	Aluminio	"	0.02	5.87
		Eslabon extremo	2	Aluminio	"	0.01	4.29
		Tubo vertical	2	Acero Inoxidable	"	0.08	10.43
Caja de Torque		Base de Caja de Torque	2	Aluminio	"	0.13	49.81
		Carcasa trasera	2	Aluminio	6061	0.03	30.67
		Carcasa Frontal	2	Plástico ABS	"	0.04	101.99
		Eje de centro (torque)	2	Acero bajo carbono	1008	0.01	0.92
		Tornillo de eje de centro	2	Acero bajo carbono	1008	0.00	0.41
		Resorte de torsion en espiral	2	Acero Inoxidable	303-304	0.08	9.92
		Corredera 1	1	"	304	0.046	5.738
		Corredera 2	1	"	304	0.02	2.516
	Mecanismo de ginebra	Disco Impulsor	2	Acero Inoxidable	N. A.	0.01	6.30
		Cruz de Malta superior	2	Acero Inoxidable	"	0.01	3.58
		Cruz de malta inferior	2	Acrílico	"	0.00	1.98
		Tornillo de mecanismo (ginebra)	2	Acero bajo carbono	6061	0.01	0.75
		Rueda Indicadora	2	Acrílico	N. A.	0.00	1.35
		Acoplador (malta inferior-indicador)	2	Acero bajo carbono	6061	0.00	
					TOTAL	1.80	495.44

Una vez mostradas las representaciones gráficas de cómo se vería físicamente ensamblado el exoesqueleto con sus principales piezas, se tiene también el listado de cada una de ellas, clasificándolas según la parte del subensamble a la que pertenecen. En la tabla 18 se tiene una descripción del material de cada pieza, así como la masa y el volumen de cada una dentro del ensamble.

ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

PROCESO DE FABRICACIÓN

El proceso de fabricación para cada pieza varió en función del material con el que se trabajó, de las características físicas que presentó cada pieza, y de los materiales y herramientas con los que se tuvo a la mano. En las imágenes mostradas a continuación (figuras 102 a 111), se muestran los diagramas de procesos para cada pieza maquinada:

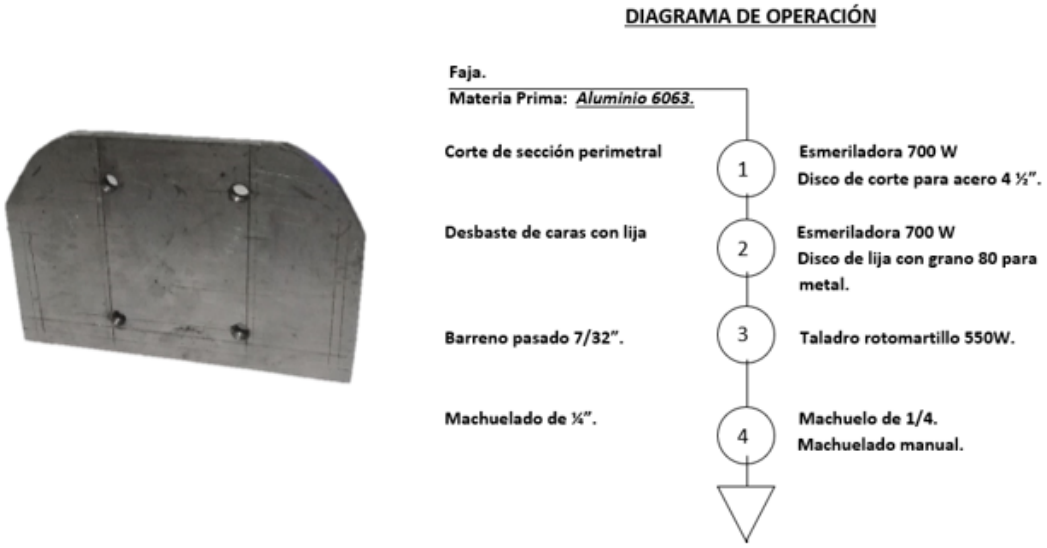


Figura 103. Diagrama de operación para la faja.

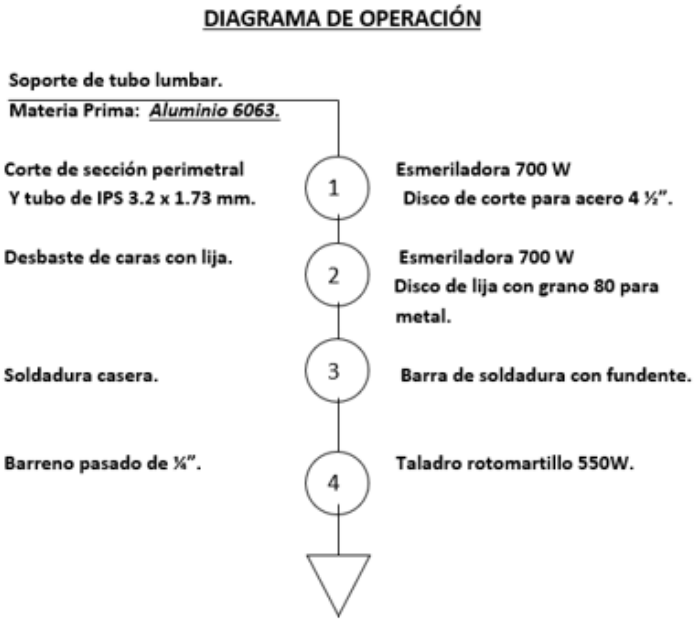


Figura 104. Diagrama de operación para el soporte de tubo.

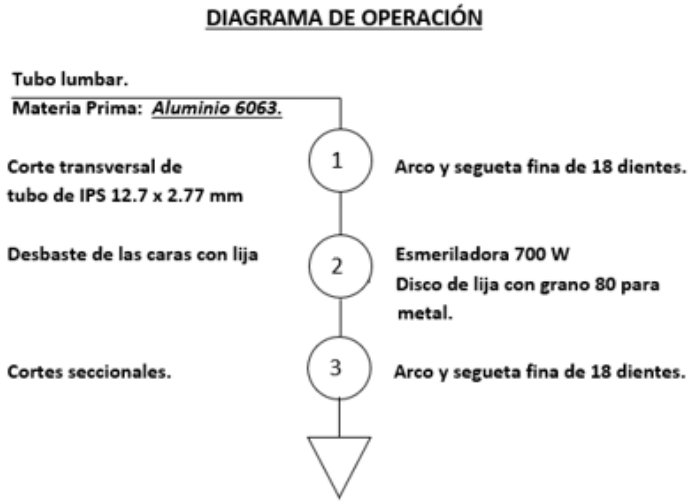


Figura 105. Diagrama de operación para tubo lumbar.

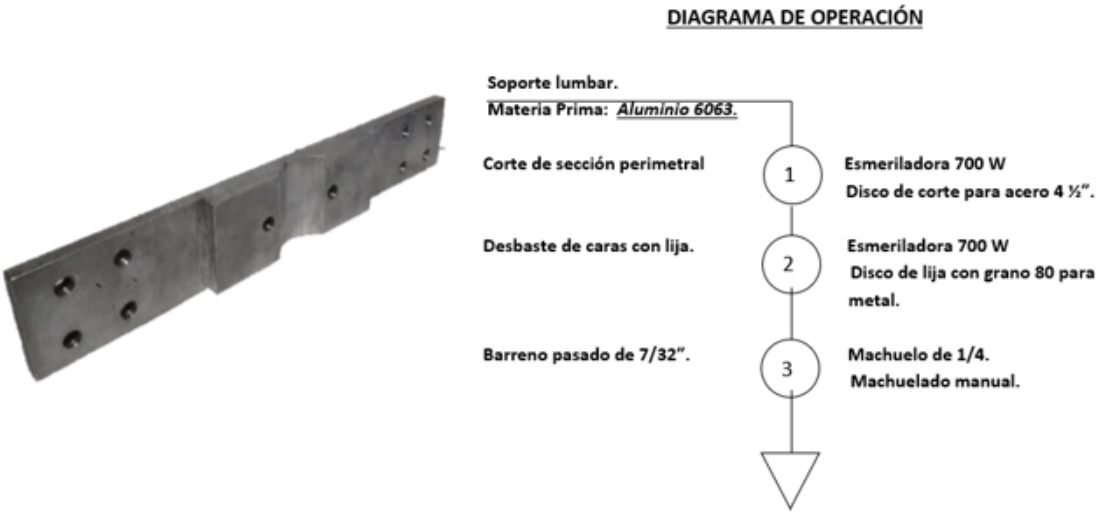


Figura 106. Diagrama de operación para torso.

Figura 107. Diagrama de operación para el muelle.

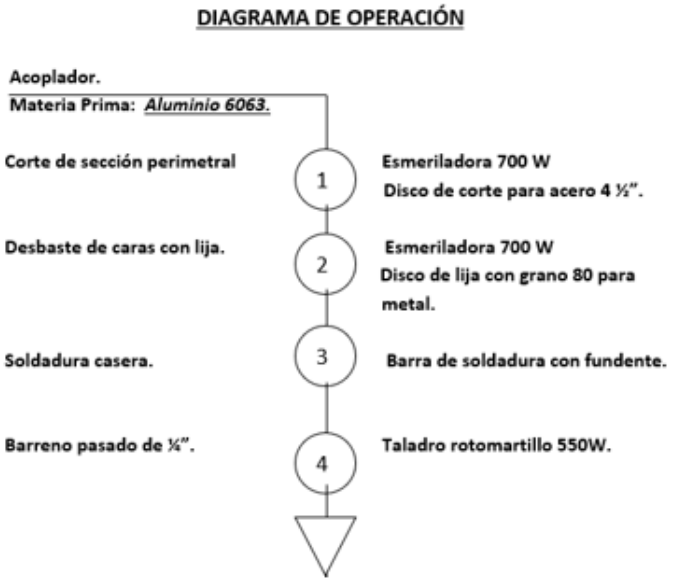
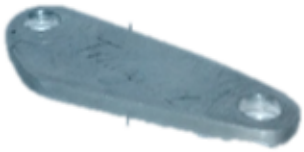


Figura 108. Diagrama de operación para el acoplador.



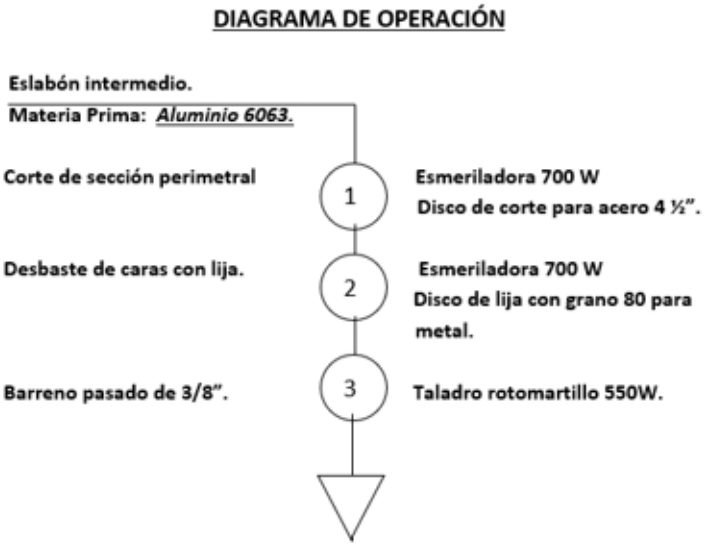
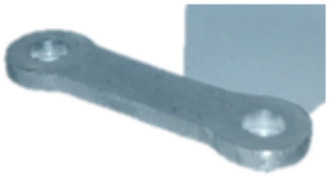


Figura 109. Diagrama de operación para eslabón central.



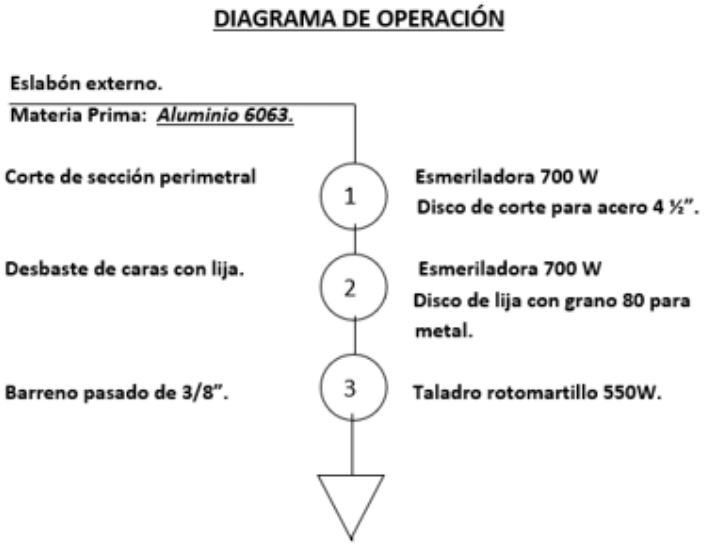


Figura 110. Diagrama de operación para eslabón exterior.

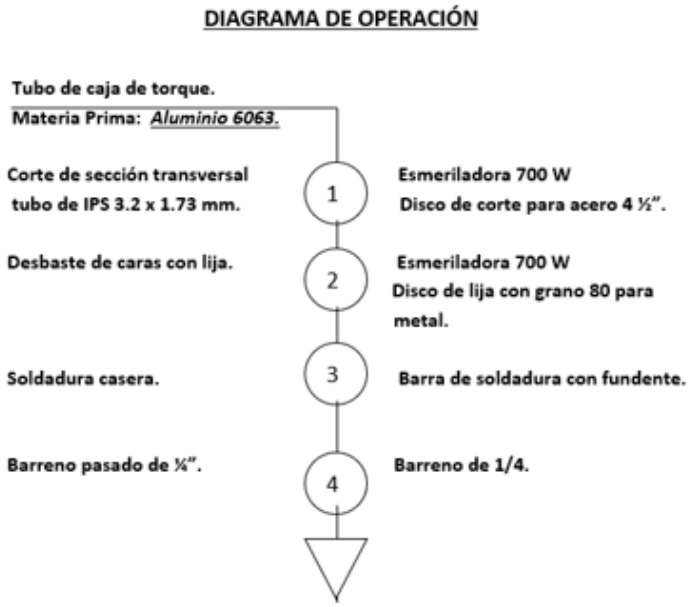


Figura 111. Diagrama de operación para tubo vertical.

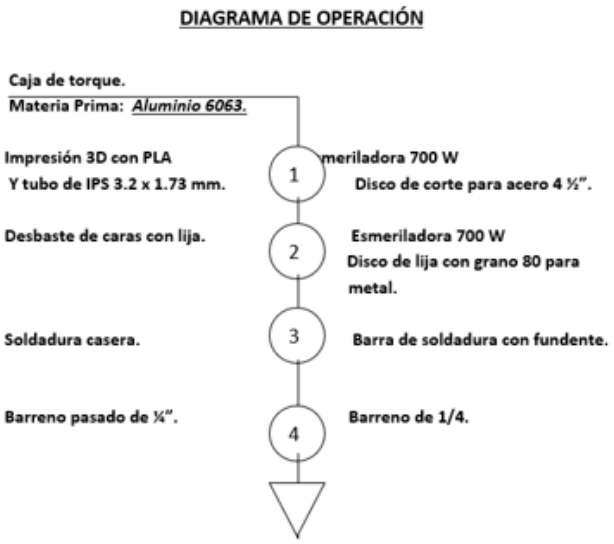


Figura 112. Diagrama de operación para caja de torque.

ESTIMACIÓN DE COSTOS

Para conocer, de una manera aproximada el costo de crear y poner a disposición un prototipo de exoesqueleto con las características que definen el mismo, se consideraron un conjunto de variables. En primer lugar, se consideraron costos directos de fabricación, que comprende todo material que se tuvo que adquirir para maquinar el prototipo, por ejemplo: soleras, tubos, placas de aluminio, correas, etcétera; en segundo lugar, se contemplaron los costos indirectos de fabricación necesarios para la transformación y el ensamble de los materiales, tales como herramientas de trabajo, repuestos de maquinaria, energía eléctrica, sujetadores, etcétera.

Costos directos de fabricación

En esta sección se enlista detalladamente cada compra realizada de materiales e insumos requeridos durante el proceso de fabricación. Se hizo un estimado de la cantidad de material a utilizar y de los repuestos o aditamentos requeridos para operar las máquinas o herramientas con las que se contó en el proceso de manufactura (taladro, esmeril, cortadora de disco, soldadura para aluminio, etcétera).

Gastos indirectos de fabricación

Este apartado comprende aquellos gastos realizados por obtener un producto o servicio mediante un tercero. Es decir, mediante personas especializadas en hacer ciertos trabajos y que para facilitar el proceso de fabricación fue necesario emplear. En este apartado se incluye mandar a hacer piezas con impresión 3D, así como ir con un costurero para adicionar el arnés y la faja a toda la estructura del exoesqueleto.

En la tabla siguiente se detalla cada rubro de los costos por producir el prototipo de exoesqueleto:

Tabla 19. Costos para la creación del prototipo.

Descripción	Cantidad	Importe
Materiales Directos		
Solera aluminio (6063 T5) 4.8 x 63.5 x 3660 mm	0.51 m	$ 52.40
Solera aluminio (6063 T5) 12.7 x 38.1 x 3660 mm	0.31 m	$ 49.17
Solera aluminio (6063 T5) 4.8 x 76.2 x 3660 mm	0.51 m	$ 62.91
Solera aluminio (6063 T5) 3.2 x 101.6 x 3660 mm	0.36 m	$ 33.82
Tubo I.P.S. (Aluminio 6063 T5) 3.2 x 6100 P 1.73 mm	0.51 m	$ 10.44
Tubo I.P.S. (Aluminio 6063 T5) 12.7 x 6100 P 2.77 mm	0.51 m	$ 27.04
Barra de Soldadura de aluminio	4	$ 400.00
Resorte de espiral plano	2	$ 80.00
Materiales indirectos		
Broca 7/32 "	1	$ 45.00
Broca 1/4 "	1	$ 50.00
Machuelo 1/4 "	1	$ 30.00
Maneral 1/4 "	1	$ 85.00
Seguro Omega 7/16 "	4	$ 10.00
Tornilllo c/botón hex. 1/2 "	8	$ 12.00
Tornillo c/g 1/8 x 1/2	8	$ 8.00
Tornillo cabeza alomada 3 x 12	8	$ 4.00
Tornillo c/botón 1/4 x 1"	8	$ 16.00
Tornillo c alomada 1/4 x 1"	20	$ 40.00
Tornillo cabeza alomada 3 x 25	16	$ 8.00
Tuerca dentada 5/16 "	1	$ 3.50
Tornillo cabeza hex.	2	$ 5.00
Abrazadera tipo tija 1"	1	$ 13.00
Disco de corte	3	$ 25.00
Lija #50	1	$ 26.00
Lija # 80	1	$ 25.00
Bote de Gas Butano	2	$ 100.00
Cinta de seguridad	4 m	$ 80.00
Calibrador metálico (vernier)	1	$ 55.00
Pegamento en pasta para metales	1	$ 75.68
Cepillo de alambre de acero inox.	4	$ 49.00
Faja de cuero	1	$ 120.00
Mano de obra indirecta		
Impresión 3D	N. A	$ 500.00
Costurero	N. A	$ 300.00
Gastos Indirectos de fabricación		
Energía eléctrica	Kw/h	$ 500.00
	TOTAL	**$ 2,900.96**

VI. RESULTADOS

Concluyendo la etapa de construcción, se presentan ahora las imágenes de las piezas fabricadas, así como del ensamble de estas para conformar el prototipo. Las fotografías del exoesqueleto ya ensamblado físicamente se pueden consultar al final de esta sección (página 95).

A continuación, se tienen diferentes imágenes que representan el subensamble virtual que conforma al exoesqueleto, así como las piezas físicas obtenidas con el proceso de fabricación empleado.

SUBENSAMBLE INFERIOR

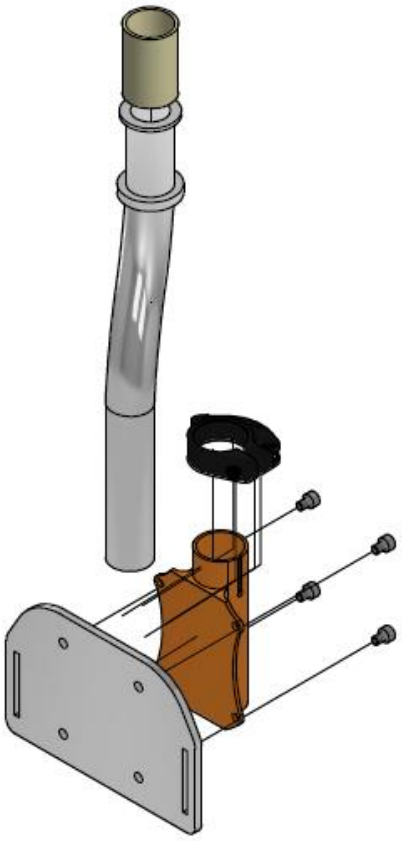


Figura 113. Subensamble inferior.

Tabla 20. Partes maquinadas que conforman al subensamble inferior.

 Faja	 Tubo lumbar
 Abrazadera.	 Tubo lumbar
 Camisa	 Tornillos de ajuste.

SUBENSAMBLE CENTRAL

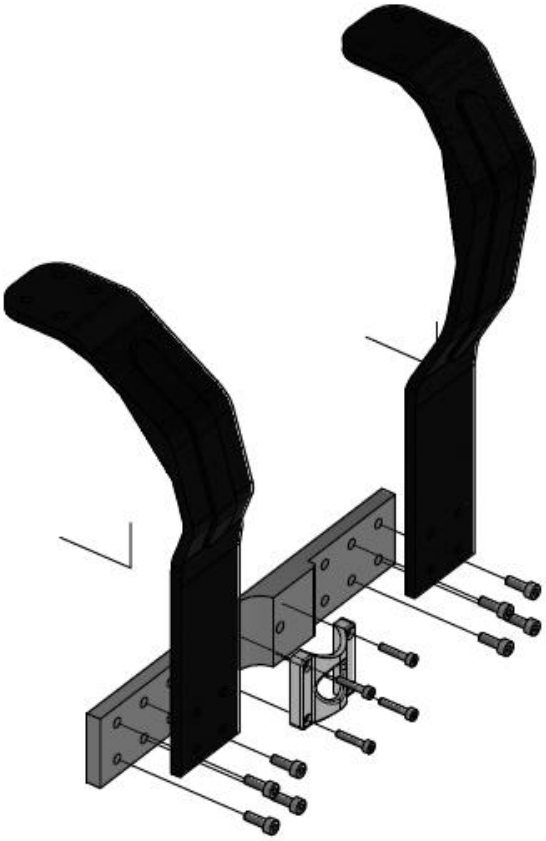


Figura 114. Subensamble central.

Tabla 21. Partes que conforman el subensamble central.

Torso	Abrazadera de torso

Tornillos de ajuste	Muelle

SUBENSAMBLE SUPERIOR

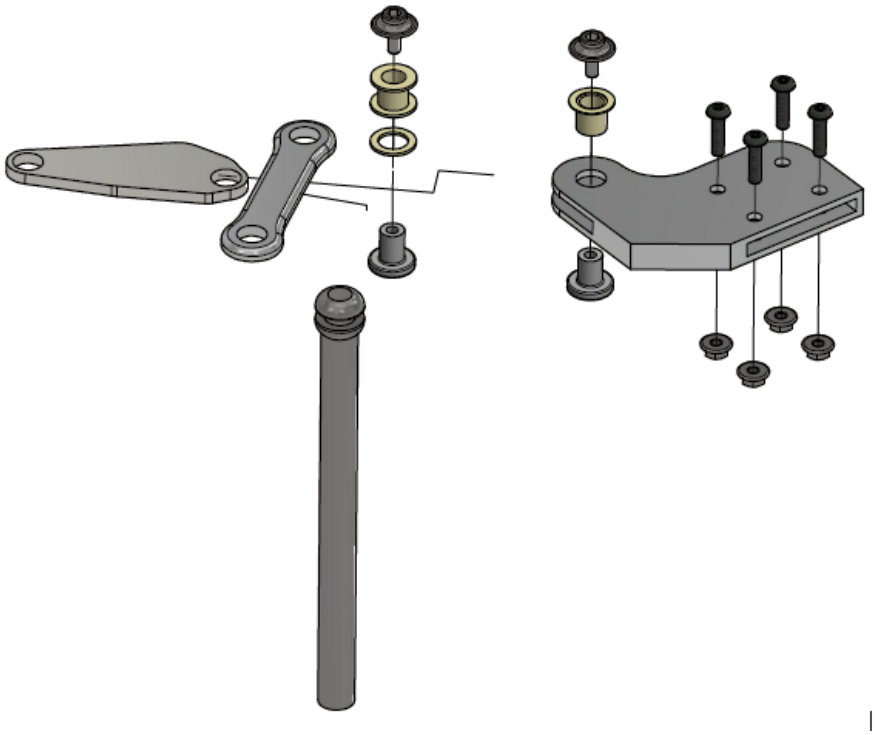


Figura 115. Subensamble superior.

Tabla 22. Partes que conforman el subensamble superior.

Acoplador	Eslabón central	Eslabón exterior.
Tubo vertical.		

SUBENSAMBLE DE CAJA DE TORQUE

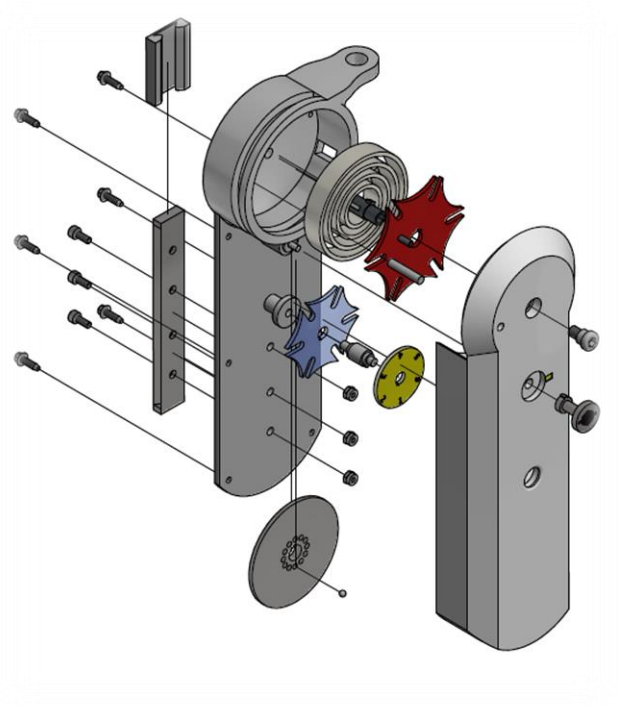


Figura 116. Subensamble de Caja de torque.

Tabla 23. Partes que conforman el subensamble de la caja de torque.

 Carcasa frontal	
 Carcasa posterior	
 Base de carcasa frontal	 Mecanismo de rueda de Ginebra.

ENSAMBLE FÍSICO

Se expone a continuación el ensamble físico del exoesqueleto. En las figuras que comprenden de la 116 a la 118 se omitió anexar la faja, correas y arneses para mostrar con mayor detalle cada uno de los elementos expuestos con anterioridad en este proyecto. En la figura 119 se muestra el exoesqueleto completo, así como su uso puesto en algún voluntario disponible para hacer la prueba de funcionamiento.

Figura 117. Vista lateral de exoesqueleto armado.

Figura 118. Vista frontal de exoesqueleto armado

Figura 119. Vista posterior de exoesqueleto armado.

a) Vista frontal

b) Vista de perfil

c) Vista posterior

Figura 120. Ajuste del exoesqueleto puesto en algún voluntario.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

ANÁLISIS CUANTITATIVO

De los resultados obtenidos con el maquinado de las piezas y el ensamble del exoesqueleto, lo primero que se hizo fue medir la masa de cada pieza realizada. Los resultados se muestran en la tabla 24. Para el análisis de estos resultados se hizo una comparativa de los mismos contra los expuestos en la tabla 3 (página 33).

Lo primero y más importante de resaltar al comparar las tablas 3 y 24 es la diferencia de masas obtenidas con el ensamble de las piezas que conforman al exoesqueleto. El ensamble físico presentó 0.78 kg menos contra lo estimado virtualmente (1.74 kg y 2.52 kg, respectivamente). La razón principal de la variación de masas entre los estimado contra lo

obtenido se debe a los materiales con los que se trabajó realmente; este hecho se dio debido a que no se contó comercialmente con el material propuesto para la simulación de las piezas, incluyendo las que se obtuvieron mediante impresión 3D.

Otra razón por la cual hubo variación en los resultados esperados se debe a la omisión de piezas que se tenían contempladas, tal es el caso del muelle de espiral y el perno de bloqueo, elementos que al final no se maquinaron.

Tabla 24. Descripción física de partes (experimental).

PARTE DE ENSAMBLE		PIEZA	No. De Piezas	MATERIAL	AISI	MASA NETA (kg)
Ensamble Inferior		Faja	1	Aluminio	6063 T-5	0.135
		Tubo Lumbar	1	Aluminio	"	0.107
		Soporte lumbar	1	Aluminio	"	0.080
		Torso	1	Aluminio	"	0.185
		Abrazadera de Torso	1	Aluminio	"	0.040
		Abrazadera	1	Aluminio	"	0.026
Ensamble Superior		Muelle	2	Aluminio	"	0.356
		Eslabon de muelle (Acoplador)	2	Aluminio	"	0.164
		Eslabon central	2	Aluminio	"	0.044
		Eslabon extremo	2	Aluminio	"	0.028
		Tubo vertical	2	Aluminio	"	0.040
Caja de Torque		Base de Caja de Torque	2	PLA	N.A.	0.062
		Carcasa posterior	2	PLA	"	0.040
		Carcasa Frontal	2	PLA	"	0.178
		Eje de centro (torque)	2	PLA	"	0.010
		Tornillo de eje de centro	2	PLA	"	0.007
		Resorte de torsion en espiral	2	Acero Inoxidable	303-304	0.080
		Corredera 1	2	PLA	N.A.	0.007
		Corredera 2	2	PLA	"	0.005
		Perno de bloqueo	2			0.005
		Esfera de acero	2			0.001
		Tornillos	24			0.120
	Mecanismo de ginebra	Disco Impulsor	2	PLA	"	0.006
		Cruz de Malta superior	2	PLA	"	0.004
		Cruz de malta inferior	2	PLA	"	0.002
		Tornillo de mecanismo (ginebra)	2	PLA	"	0.002
		Rueda Indicadora	2	Acrílico	N. A.	0.002
		Acoplador (malta inferior-indicador)	2		6061	0.005
					TOTAL	1.741

ANÁLISIS CUALITATIVO

Considerando el proceso de fabricación limitado que se tuvo para realizar la mayoría de las piezas, es importante mencionar que muchas de estas no tuvieron el acabado superficial y dimensional deseado. De las piezas maquinadas, el muelle es el que más defectos de

fabricación presentó, dada la complejidad de su diseño y de las herramientas muy poco precisas con que se contó; sin omitir mencionar el complejo proceso que implicaba soldar partes de aluminio sin algún método eficiente y eficaz para hacerlo. Como se puede ver en su diagrama de operaciones (figura 106, página 84), se contó con un método poco preciso que implicaba utilizar calor producido con gas propano y una barra de soldadura con fundente para aluminio.

Otra pieza cuyo maquinado implicó utilizar métodos de fabricación poco prácticos para garantizar un buen acabado fue el tubo lumbar. Se requería un mecanismo para doblar tubo con una buena precisión, sin embargo, se optó por hacerlo con las herramientas que se tuvieron a la mano. Su fabricación requirió hacer cortes transversales al tubo para obtener la curvatura deseada; posteriormente, se requirió emplear soldadura para aluminio para darle el acabado deseado a la pieza

Otro aspecto importante que se evaluó en el análisis cualitativo fue la satisfacción de los objetivos esperados al utilizar el exoesqueleto en actividades propias de algún pintor o electricista. Una vez hechos todos los ajustes necesarios para dejar el prototipo de exoesqueleto en condiciones de ser probado por algún usuario, se hizo una prueba física con un voluntario disponible. Se presentó un formato con una serie de preguntas con el propósito de evaluar la satisfacción del usuario al momento de utilizar el exoesqueleto para el fin deseado.

Como se puede ver en la tabla 25, el usuario que utilizó el exoesqueleto quedó satisfecho con su funcionamiento, hablando en términos generales. El usuario simuló pintar una pared con un rodillo manual, así como sostener otras herramientas que requieren la extensión total de los brazos por arriba de los hombros. Entre la retroalimentación proporcionada por el usuario en la sección de comentarios, éste propuso mejorar el diseño colocando materiales más cómodos para ajustar el exoesqueleto al cuerpo, como lo es la parte lumbar y la parte de los bíceps.

Considerando el hecho de la contingencia sanitaria, no fue posible realizar las pruebas suficientes en diferentes voluntarios para obtener mayor retroalimentación del diseño del prototipo de exoesqueleto propuesto. Sin embargo, pese a solo haber hecho una prueba

con un voluntario, los resultados obtenidos son de gran ayuda pues se obtuvo evidencia clara del funcionamiento del exoesqueleto fabricado.

Tabla 25. Formato piloto para prueba de voluntario del prototipo.

Encuesta No:	1	Fecha:	19/07/2021
Universidad Autónoma Metropolitana	Unidad Azcapotzalco	Trimestre 21-I	
PRUEBA VOLUNTARIA DE PROTOTIPO DE EXOESQUELETO			
Objetivo: Realizar activides propias de un pintor y/o electricista para trabajos que implican mantener las extremidades superiores del usuario por lapsos prolongados.			
1. Aspecto y propiedades físicas			
1.1	¿Le es llamativo el diseño del exoesqueleto?	Sí ☑	No ☐
1.2	Si la respuesta es NO, ¿qué popondría para mejorar su aspecto? Respuesta:		
2. Peso			
2.1	Considerando el peso que percibe del exoesqueleto, ¿qué tan comodo se siente al usarlo? Nada cómodo ☐ Cómodo ☑ Muy cómodo ☐		
3. Ajuste			
3.1	¿Le fue fácil colocarse el exoesqueleto?	Sí ☑	No ☐
3.2	Si la respuesta es NO, ¿Qué parte fue la más dificil de hacer por su cuenta? Respuesta:		
3.3	¿Le fue dificil retirarse el exoesqueleto?	Sí ☐	No ☑
	Si la respuesta es SÍ, ¿Qué parte fue la más dificil de hacer por su cuenta? Respuesta:		
4. Funcionalidad			
4.1	Realizando algunas actividades que impliquen mantener los brazos elevados, ¿qué tan comodo se sintió al utilizar el exoesqueleto? Nada cómodo ☐ Cómodo ☐ Muy cómodo ☑		
4.2	Si su respuesta fue NADA CÓMODO, explique qué aspectos son los que mejoraría: Respuesta:		
4.3	Considerando el hecho de que el uso de este exoesqueleto le ayudará a reducir el cansancio muscular presente en los brazos al realizar actividades en lapsos prolongados, ¿usaría este mecanismo según la prueba realizada?	Sí ☑	No ☐
	COMENTARIOS: Se recomienda mejorar el diseño empleando materiales acolchados en la faja y el soporte de brazos. **¡Gracias por su colaboración!**		

VII. CONCLUSIONES

A pesar de las limitaciones con las que se lidió para la realización de este proyecto de integración, se logró obtener físicamente un prototipo de exoesqueleto apto para corroborar varios aspectos teóricos planteados al inicio de este trabajo.

Estableciendo una relación directa con los objetivos planteados, se puede decir que se pudo diseñar un exoesqueleto para miembros superiores con los grados de libertad esperados funcionales, pues se pudo apreciar la cinemática existente en cada una de sus juntas para dotar los grados de libertad en los brazos.

Respecto a algunas propiedades físicas tales como acabado superficial, peso, volumen y dimensionamiento físico, se pudo contrastar la parte teórica con la experimental. En este rubro se obtuvieron variaciones considerables debido a varios factores:

- El presupuesto para la realización de este proyecto tuvo muchas limitaciones.
- Se contó con muy poca disposición para consultar distintos proveedores dadas las condiciones de salud internacionales.
- El material propuesto para varias piezas no pudo ser utilizado a la hora de cotizar los materiales con los proveedores disponibles.
- Las técnicas de fabricación propuestas distaron mucho del ideal esperado, esto debido a que no se trabajó en un taller especializado para trabajos profesionales. Se tuvo que trabajar en un taller casero de un familiar.
- No se contó con herramientas de alta precisión para distintos trabajos de maquinado, por ejemplo, rectificadoras, taladro de banco, máquina CNC para trabajos de fresado y taladrado, dobladoras de tubo, etcétera.
- No se pudo trabajar con tolerancias dimensionales precisas a la hora de maquinar..
- Considerando el hecho de que varias piezas con dimensiones muy pequeñas necesitaban ser maquinadas y no se contaba con la herramienta pertinente, se optó por obtenerlas mediante la técnica de impresión en 3D, sin embargo, dado que se estaba trabajando a distancia, no se dispuso del tiempo necesario para obtener todas las piezas en un tiempo óptimo.

El proceso para maquinar un resorte de espiral funcional requiere de técnicas muy complejas para su fabricación, las cuales no fue posible emplear. Debido a esto, la parte experimental de esfuerzos y torques que se generan en la caja de torque del exoesqueleto puesto en funcionamiento no pudo efectuarse.

Se logró corroborar a grandes rasgos la resistencia de algunas piezas por individual sometidas a simulación de esfuerzos y torques; mas no se pudo obtener el valor real de deformación prevista en la parte analítica con el software de ingeniería.

En general, como un proyecto tecnológico surgido a raíz de una necesidad identificada, se pudo seguir y comprender mejor la importancia de utilizar la metodología de diseño que todo ingeniero mecánico debe adoptar. Aunque no hay una metodología única por seguir para obtener un buen diseño, ya sea de una máquina o de los elementos que la componen (que en este caso es un mecanismo de exoesqueleto), sí hay conceptos que en distintas fuentes bibliográficas coinciden. Citando una fuente de un libro sobre elementos de máquina donde abordan la etapa de diseño mecánico como algo fundamental se menciona que: para dar forma a una máquina y a sus órganos se ha de considerar, por una parte, su función, su servicio y su entretenimiento, y por otra, las características del material y de la fabricación. Solo después de ver con claridad la interdependencia de estos factores y su influencia sobre los costos, se estará en situación de poder alcanzar la configuración óptima. [16]

En este proyecto se pudo seguir un buen plan de diseño mecánico, se identificó una necesidad y con esta se establecieron objetivos comprobables. Se estableció un plan de trabajo ordenado cronológicamente y delimitado por tiempos óptimos. En la etapa de diseño virtual se hicieron los ajustes pertinentes para darle solución a los inconvenientes surgidos. A pesar de tratar de cumplir con todos los objetivos, no fue del todo posible ya que existieron factores adversos que fue imposible sobrellevar dados los tiempos previstos para trabajar y la situación sanitaria actual.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Elguea Aguinaco, Í., & Belda Lois, J. M., 2019, “Elaboración de un Modelo de Exoesqueleto de Hombro mediante OpenSim®,” pp. 206-207.

[2] Kate Bachman, 2019, “Los exoesqueletos aumentan la productividad y reducen las lesiones durante el ensamble, el acabado y la unión de partes,” The fabricator espanol, 14, 52.

[3] Parent-Thirion, A., Biletta, I., Cabrita, J., Vargas Llave, O., Vermeylen, G., Wilczyńska, A., Wilkens, M., (2016), Eurofound, “Sixth European Working Conditions Survey.” Reporte General (2019). pp. 42-44, disponible en: https://www.eurofound.europa.eu/es/publications/report/2016/workingconditions/sixth-european-working-conditions-survey-overview-report.

[4] Pacífico I., Scano A., Guanzilori E., Moisé M., Morelli L., Chiavena A., Romo D., Spad S., Giuseppe C., Molteni F., Giovachinni F., Vitiello N. y Crea S., 2020, “An experimental Evaluation of the Proto-MATE,” p. 55, IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 27(1), Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8952904

[5] Tibaduiza, D., Chio, N., Grosso, J. M., & Anaya, M., 2009, “Diseño de un exoesqueleto mecatrónico de brazo basado en screws and robots paralelos,” 2do Congreso Internacional de Ingenierıa Mecatrónica.

[6] Cardona, M. A. C., Spitia, F. R., & López, A. B., 2010, “Exoesqueletos para potenciar las capacidades humanas y apoyar la rehabilitación,” Revista Ingeniería Biomédica, 4(7), pp. 63-73.

[7] SKELEX, 2020., de URL: https://www.skelex.com/skelex-360-xfr/

[8] COMAU. 2020, MATE de URL: https://mate.comau.com/

[9] OTTOBOCK, 2020., de URL: https://paexo.com/paexo-shoulder/?lang=es

[10] EKSOBIONICS, 2020., de URL: https://eksobionics.com/ekso-evo/

[11] LEVITATE TECHNOLOGIES INC., 2020, de URL: https://www.levitatetech.com/airframe/

en el trabajo-Identificación, análisis, prevención y control. CDMX, México. 2017. p. 44.

[12] Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.* 9ª ed. México: McGraww Hill. pp- 8-9

[13] Siemens, Ingennity for life (2021), Ingeniería Asistida por Computadora (CAE). Recuperado de: https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112

[14] Autodesk, (2021). Análisis de Elementos Finitos. Recuperado de: https://www.autodesk.mx/solutions/finite-element-analysis

[15] ASME, Norma ASME Y14-5 2009, Estándar de dimensionamiento y Tolerancias. p. 216.

[16] G Niemann (1977). *Tratado teórico práctico de elementos de máquinas. Cálculo, diseño y Construcción.* 2ª ed. España: Editorial Labor. pp. 16.

[17] ASME, ANSI B4.2- 1978, *Preferred Metric Limits and Fits,* Reaffirmed 2004. p 7-15.

IX. DIBUJOS DE DEFINICIÓN

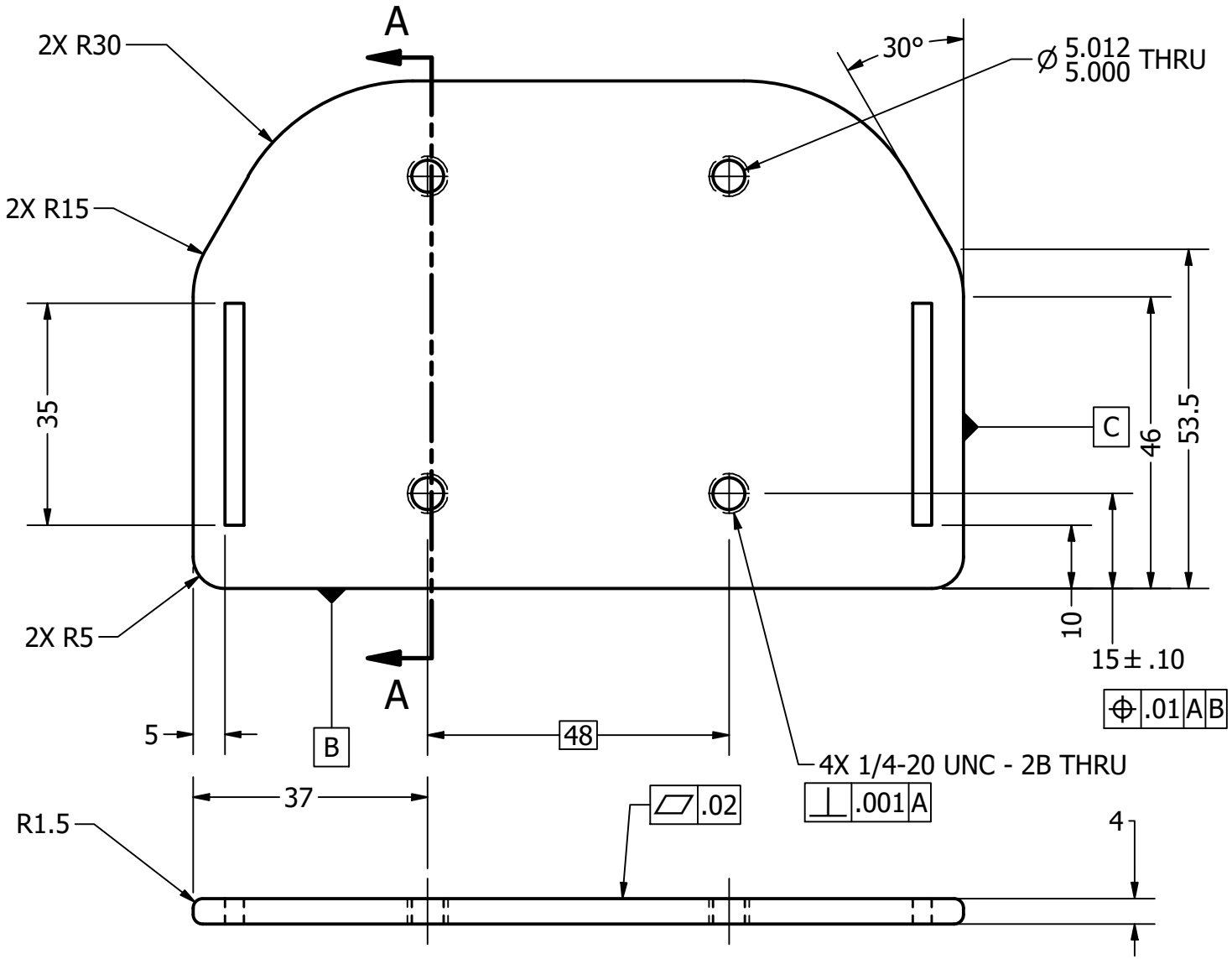
OBTENCIÓN DE TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS

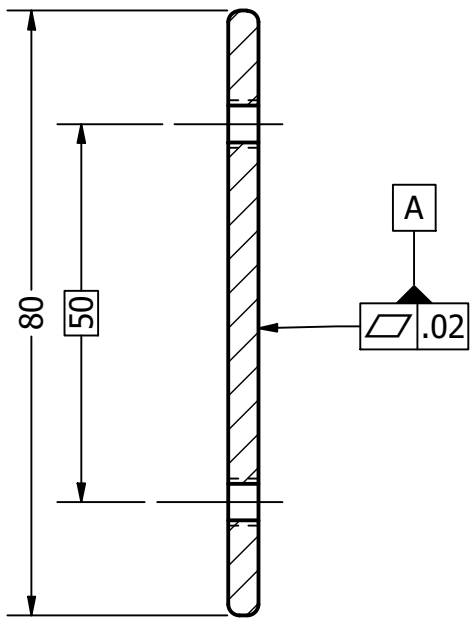
Para tener un dimensionado geométrico correcto en cada una de las piezas diseñadas fue necesario determinar qué tolerancias se usarían para asegurar un perfecto funcionamiento entre la unión fija y cinemática de cada una de sus piezas. Para conocer estas tolerancias se consultó una publicación de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ANSI B4.2 -1978) [17].

En la tabla 26 se pueden observar las tolerancias aplicadas a piezas cuyo ensamble es clave para la cinemática presente en el exoesqueleto. Se clasificaron las uniones fijas y móviles, así como la naturaleza de los ajustes (con juego, con apriete o exacto) con el fin de obtener las tolerancias geométricas apropiadas a partir de las dimensiones nominales propuestas.

Tabla 26. Tolerancias y dimensiones geométricas entre piezas.

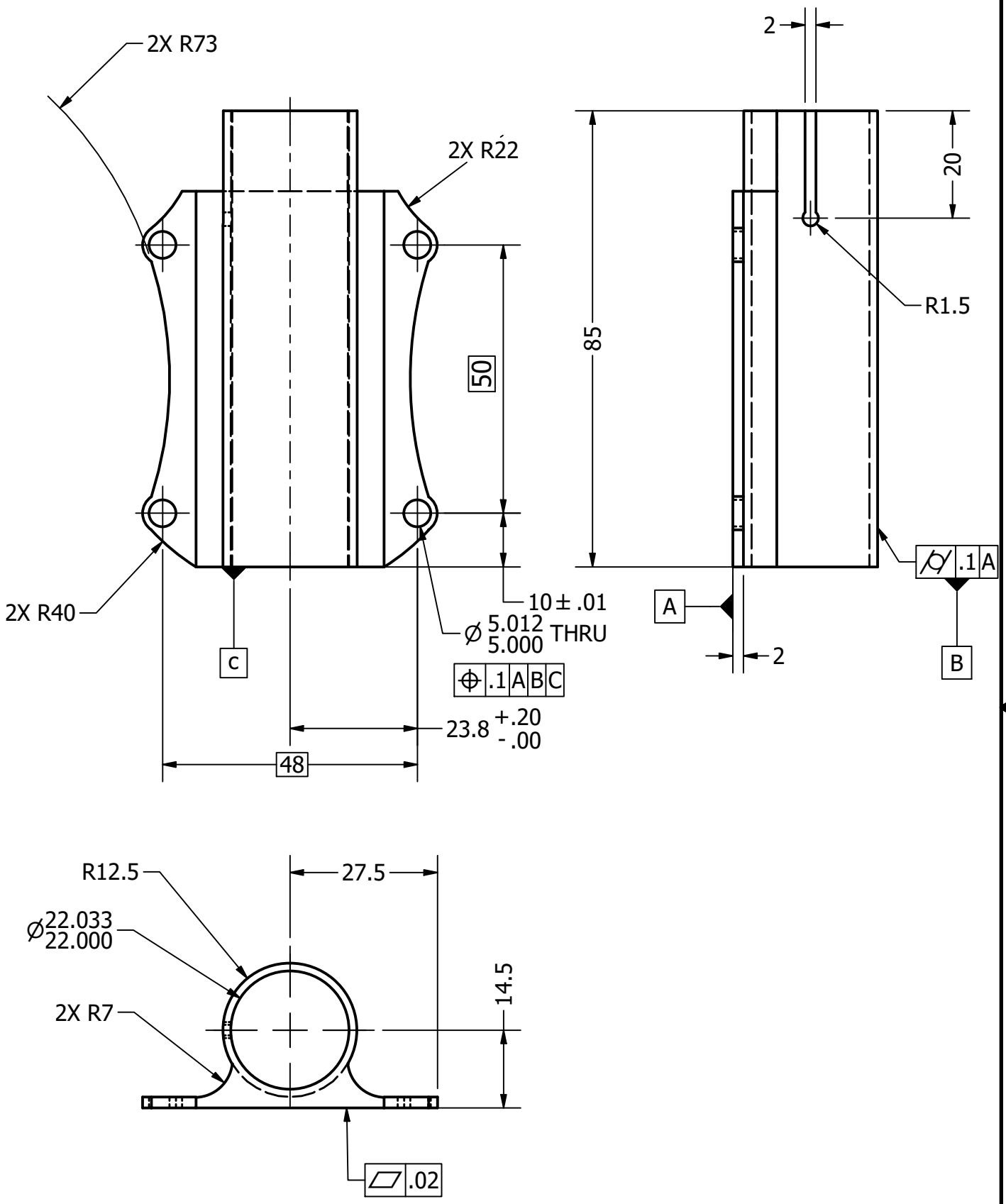
Pieza principal	Pieza secundaria	Ensamble	Tipo de ajuste	Característica de ajuste	Calidades del ensamble	Dimensión nominal (mm)	Dimensión máx. (mm)	Dimensión mín. (mm)	Tolerancia
Faja	Soporte de tubo	Fijo	Apriete mediano	Agujero	H7/p6	5	5.012	5.000	0.012
Soporte de tubo	Faja	Fijo	Apriete mediano	Agujero	H7/p6	5	5.012	5.000	0.012
	Tubo lumbar	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	22	22.033	22.000	0.033
Tubo lumbar	Soporte de tubo	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	22	22.000	21.979	0.021
	Torso	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	22	22.000	21.979	0.021
Torso	Camisa	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	25.4	25.433	25.400	0.033
	Muelle	Fijo	Apriete mediano	Agujero	H7/p6	4	4.012	4.000	0.012
	Abrazadera	Fijo	Apriete mediano	Agujero	H7/p6	6.35	6.362	6.350	0.012
Muelle	Torso	Fijo	Apriete mediano	Agujero	H7/p6	8	8.015	8.000	0.015
	Acoplador	Fijo	Apriete mediano	Agujero	H7/p6	5	5.012	5.000	0.012
		Fijo	Ajuste exacto	Árbol	H7/h6	46.4	46.400	46.384	0.016
Acoplador	Muelle	Fijo	Apriete mediano	Árbol	P7/h6	5	5.000	4.992	0.008
		Fijo	Ajuste exacto	Agujero	H7/h6	46.4	46.425	46.400	0.025
	Eslabón interno	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	10	10.022	10.000	0.022
		Móvil	Juego pequeño	Agujero	H8/f7	5	5.018	5.000	0.018
Eslabón interno	Acoplador	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	10	10.022	10.000	0.022
	Eslabón externo	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	10	10.022	10.000	0.022
	Acoplador	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	4	4.000	3.988	0.012
Eslabón externo	Eslabón interno	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	10	10.022	10.000	0.022
Tubo vertical	Eslabón externo	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	12	12.000	11.982	0.018
	Base de carcasa	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	10	10.000	9.985	0.015
Base de carcasa	Tubo vertical	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	10	10.022	10.000	0.022
Camisa 1	Torso	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	25.4	25.400	25.379	0.021
	Tubo lumbar	Móvil	Juego mediano	Agujero	H8/f7	22	22.033	22.000	0.033
Camisa 2	Eslabón interno	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	10	10.000	9.985	0.015
Camisa 3	Acoplador	Móvil	Juego mediano	Árbol	F8/h7	10	10.000	9.985	0.015



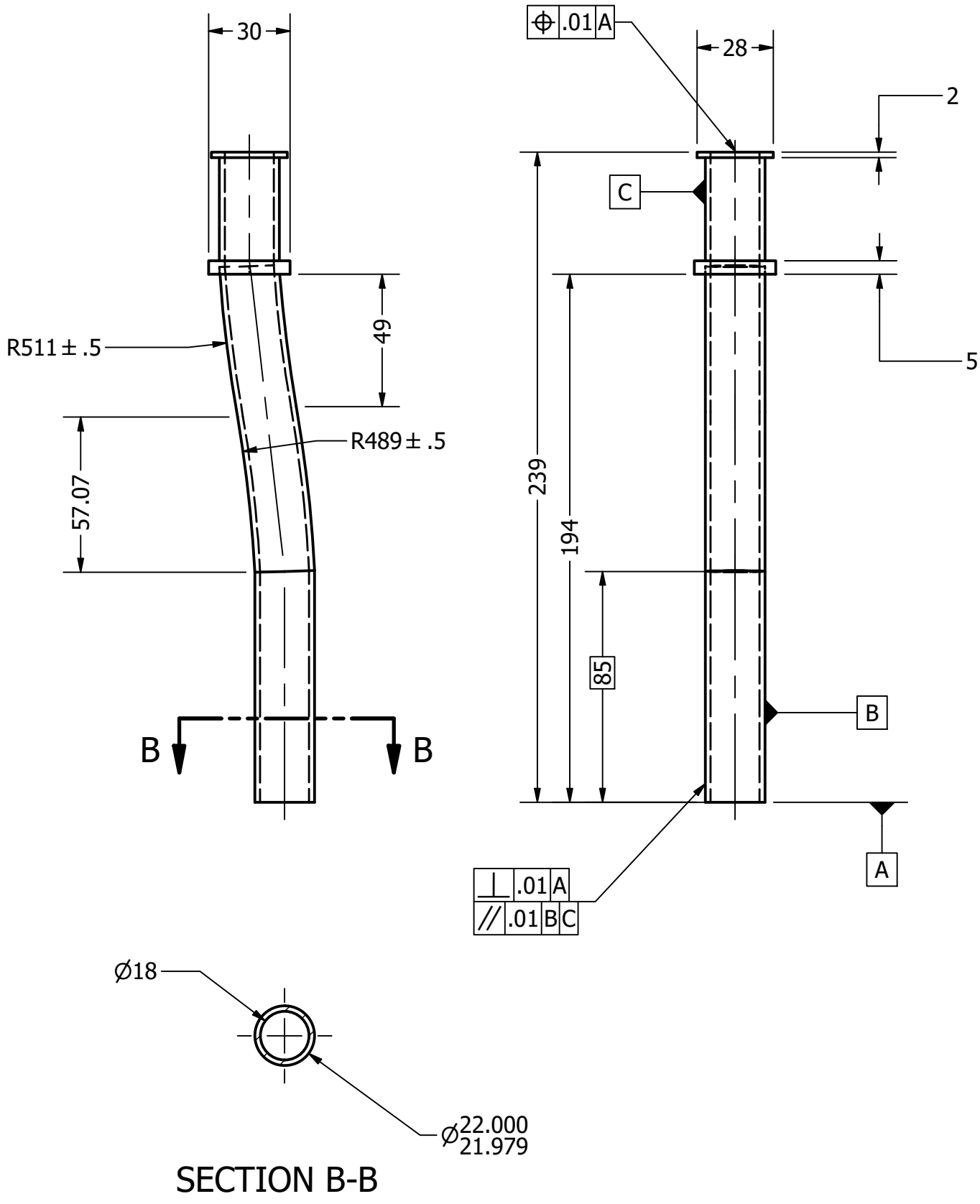


SECTION A-A

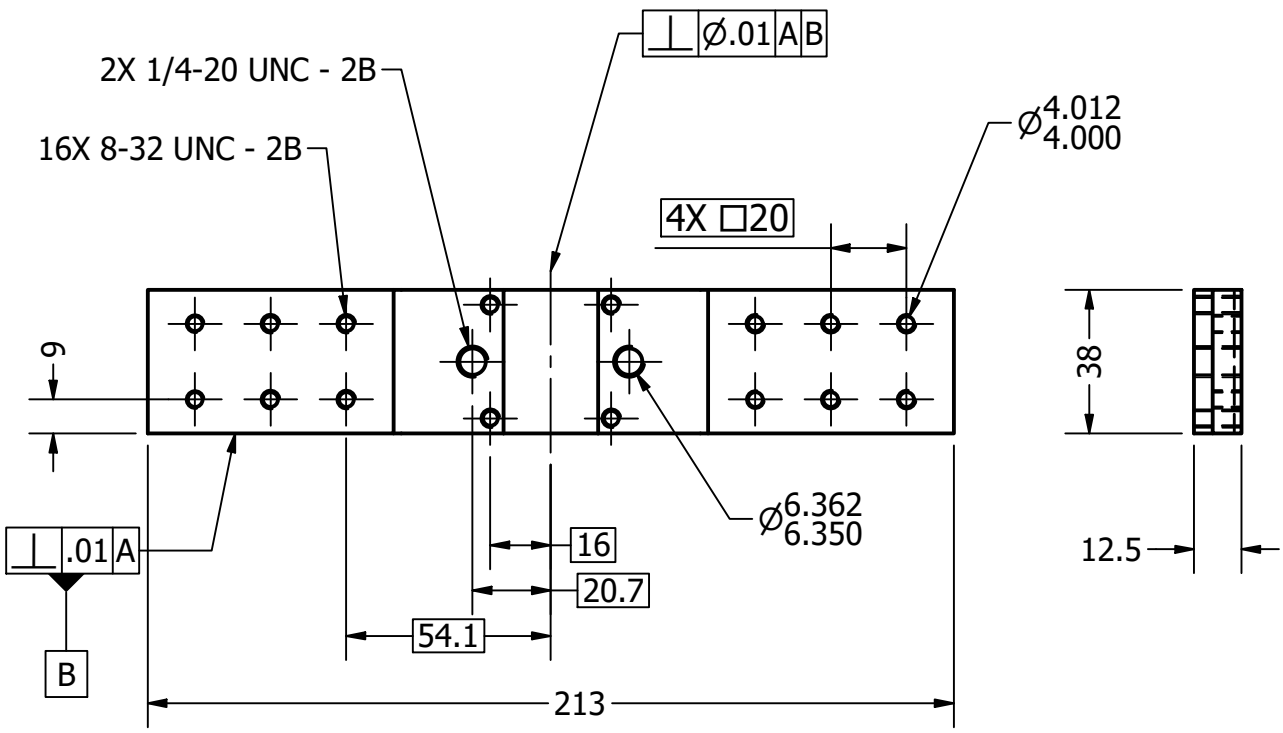
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Faja			UNITS mm
	Material Aluminio 6061	Scale 1 / 1	Size A4	Sheet 1 / 22

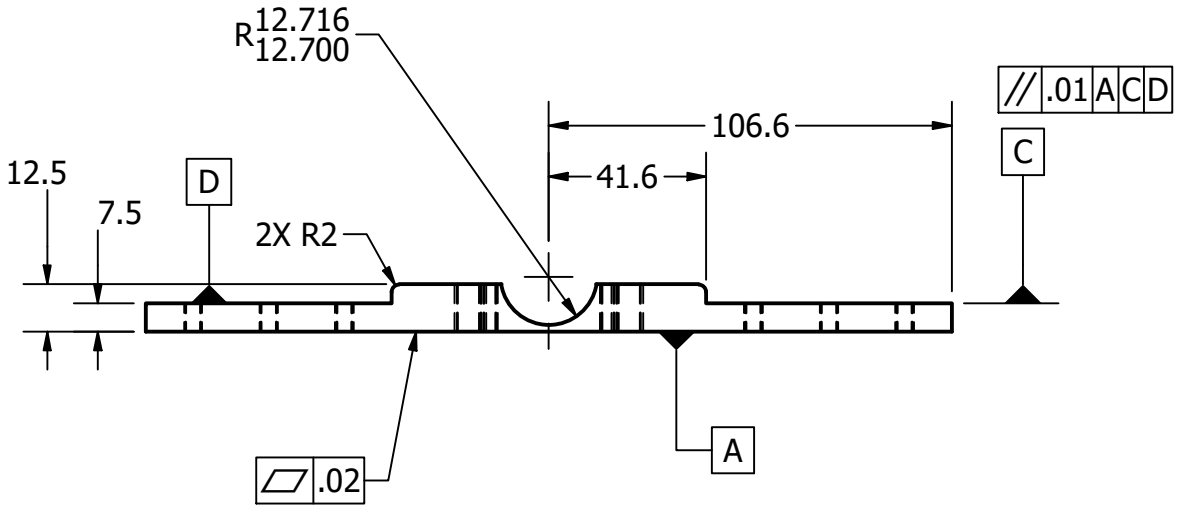


Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Soporte de tubo		UNITS mm
	Material Aluminio 6061	Scale 1 : 1	Size A4 / Sheet 2 / 22

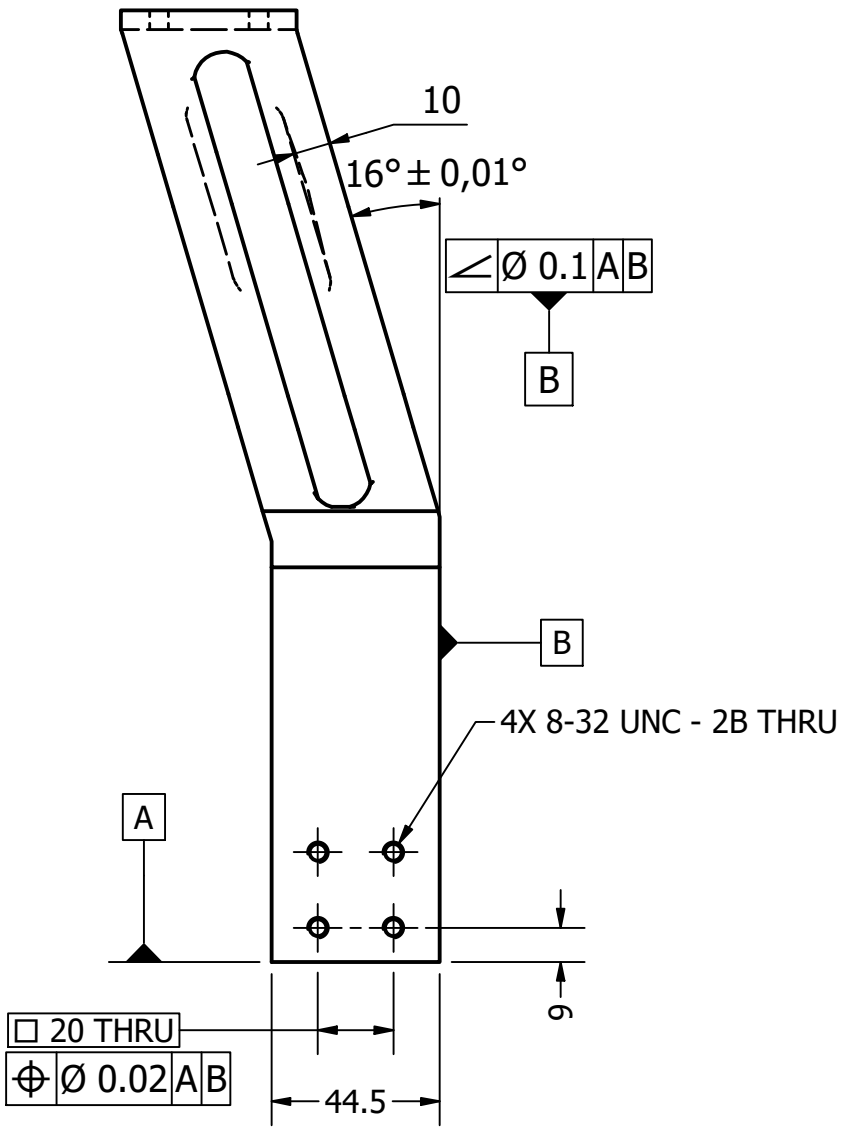


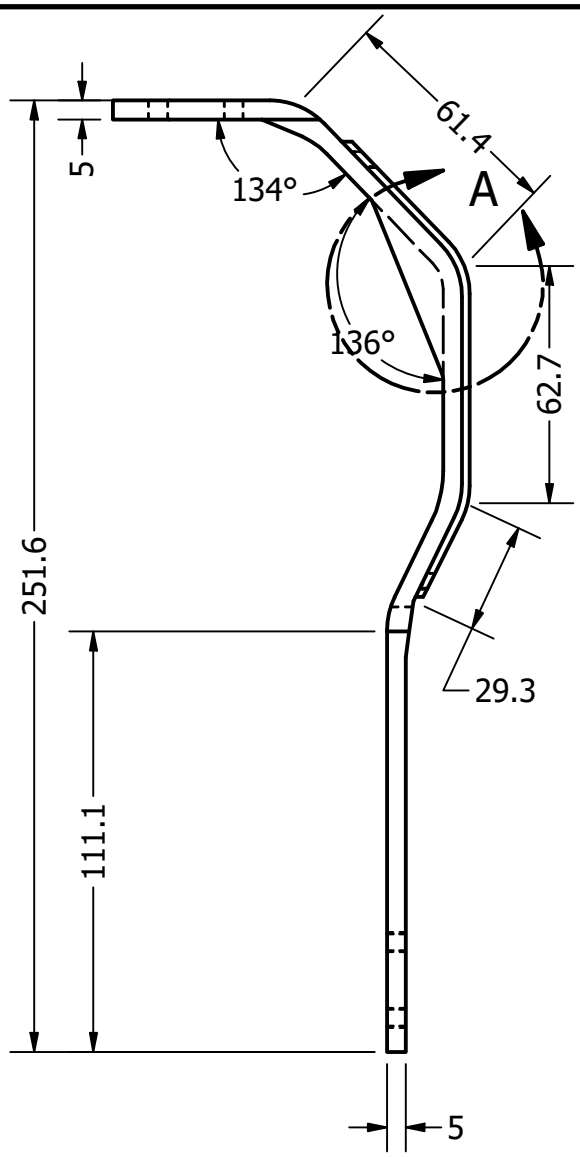
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: **Tubo lumbar**			UNITS mm
	Material Aluminio 6061	Scale 1 / 2	Size A4	Sheet 3 / 22

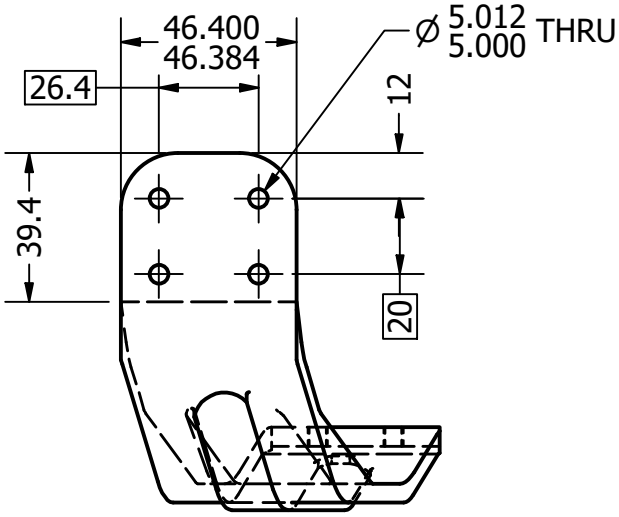


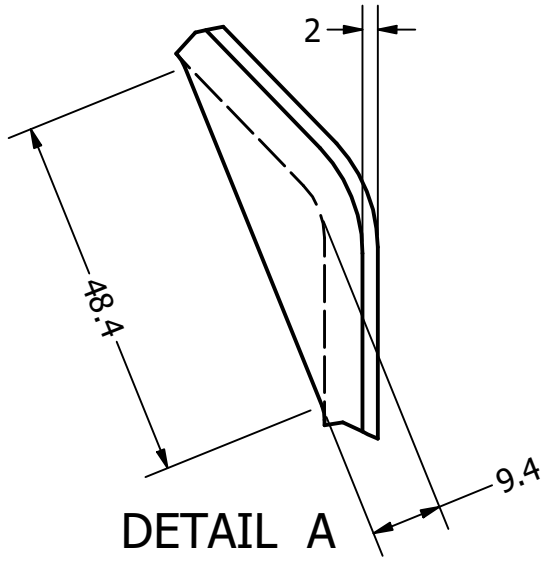


Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Torso		UNITS mm
	Material Aluminum 6061	Scale 1 : 2	Size A4	Sheet 4 / 22



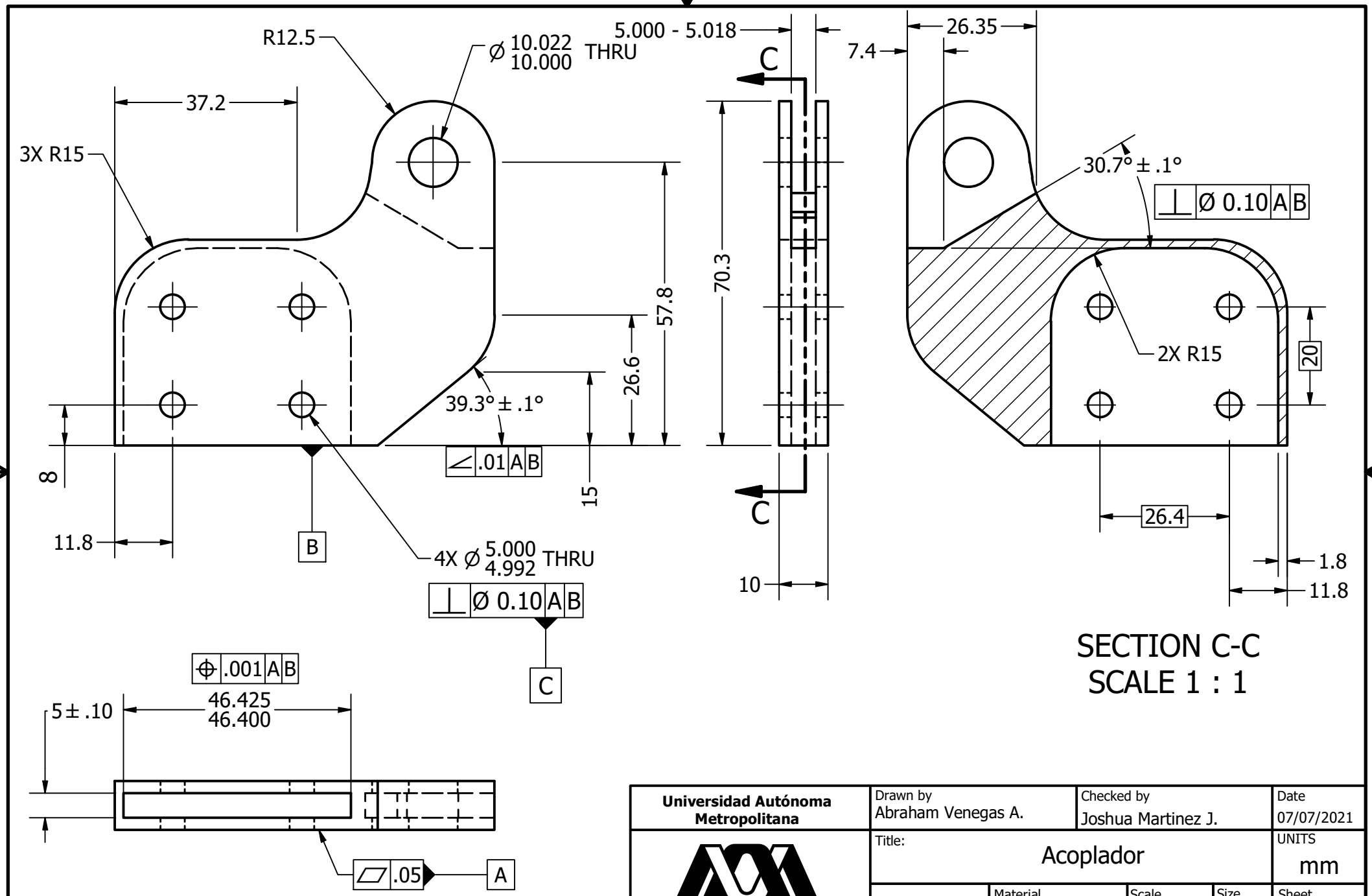






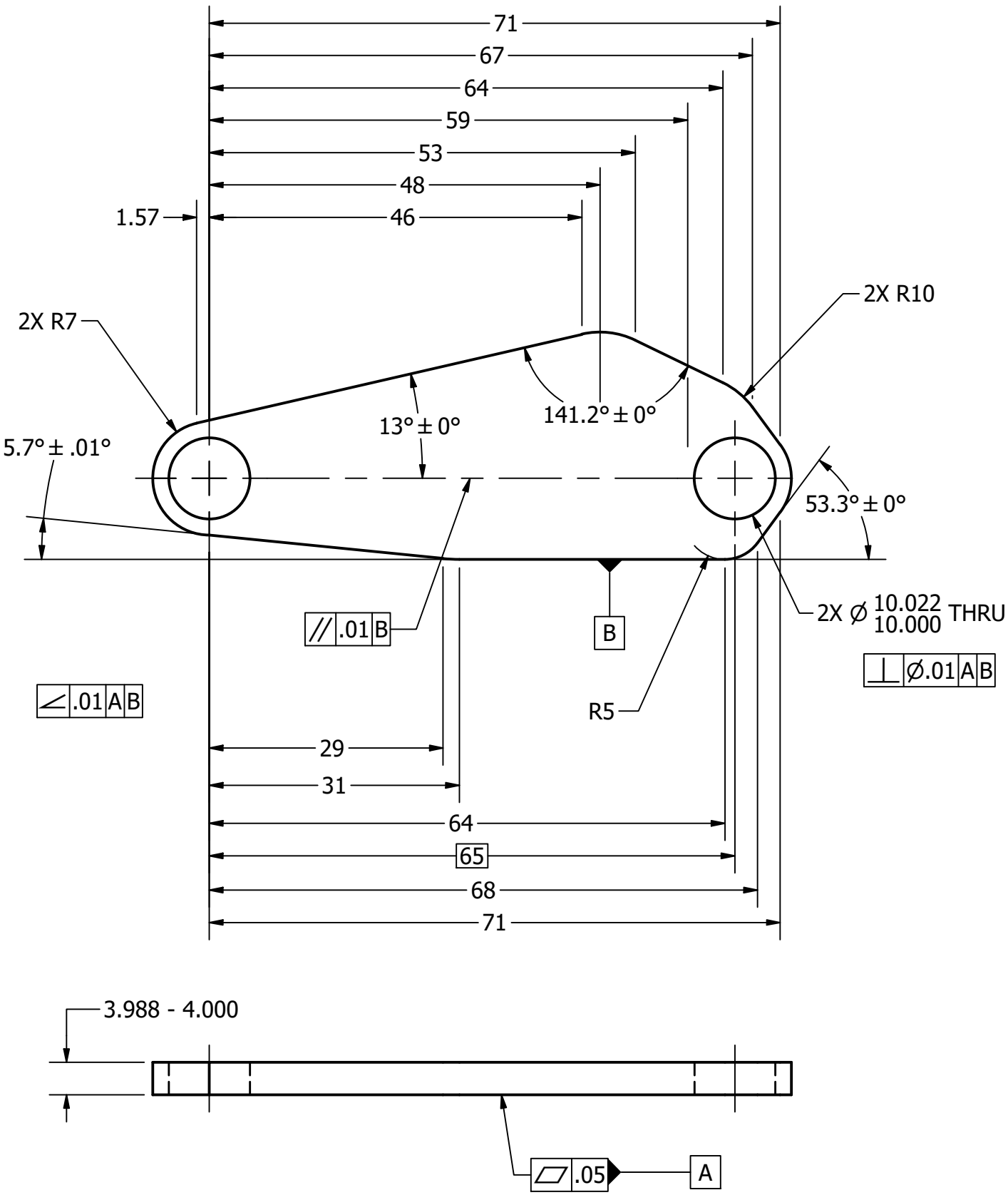
DETAIL A
SCALE 1 : 1

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Muelle		UNITS mm
	Material Generic	Scale 1 : 2 / Size A4	Sheet 5 / 22

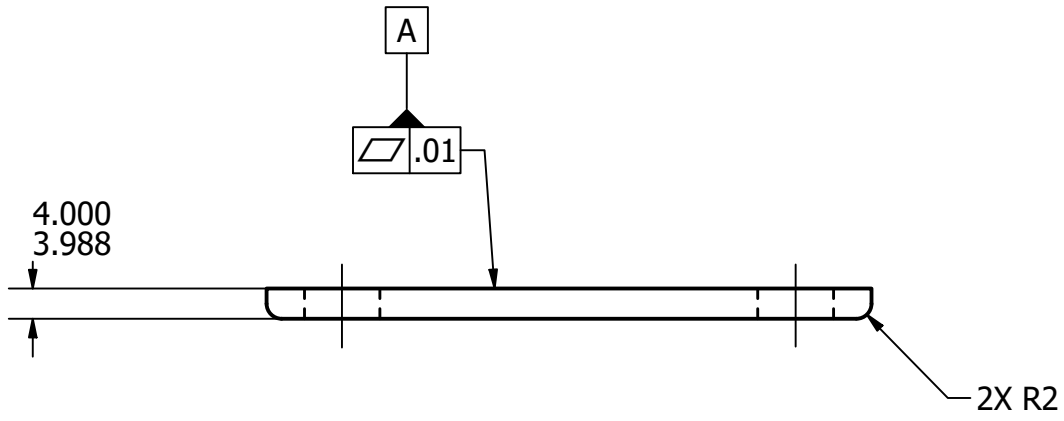


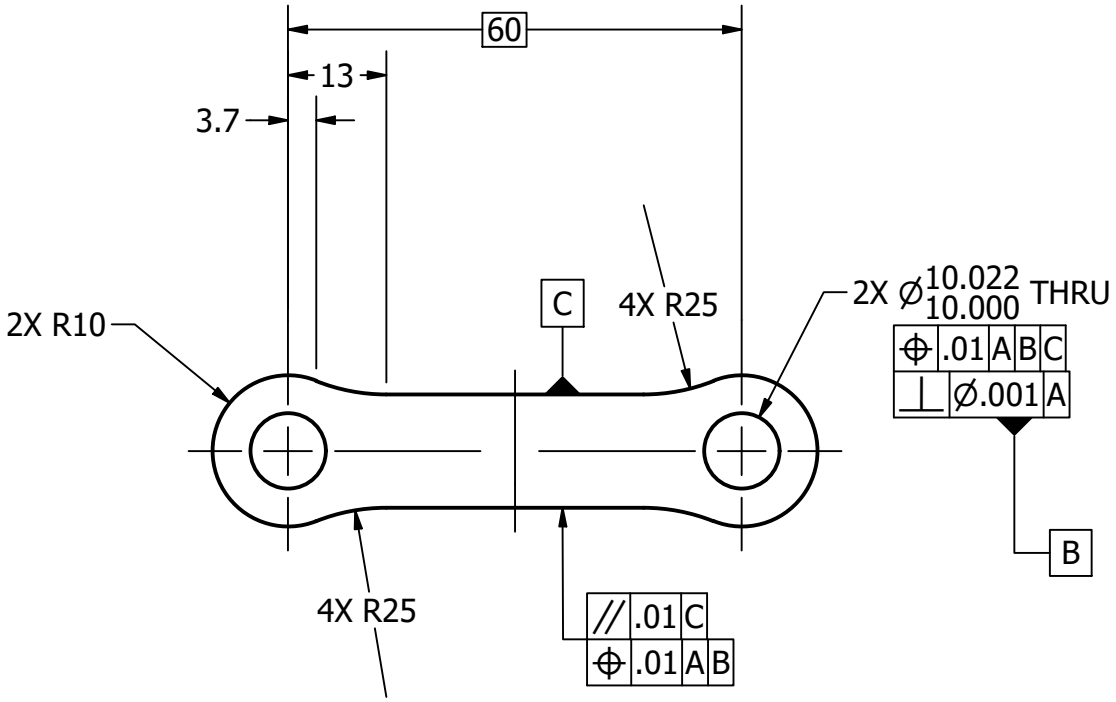
SECTION C-C
SCALE 1 : 1

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Acoplador			UNITS mm
	Material Aluminio 6061	Scale 1 : 1	Size A4	Sheet 6 / 22

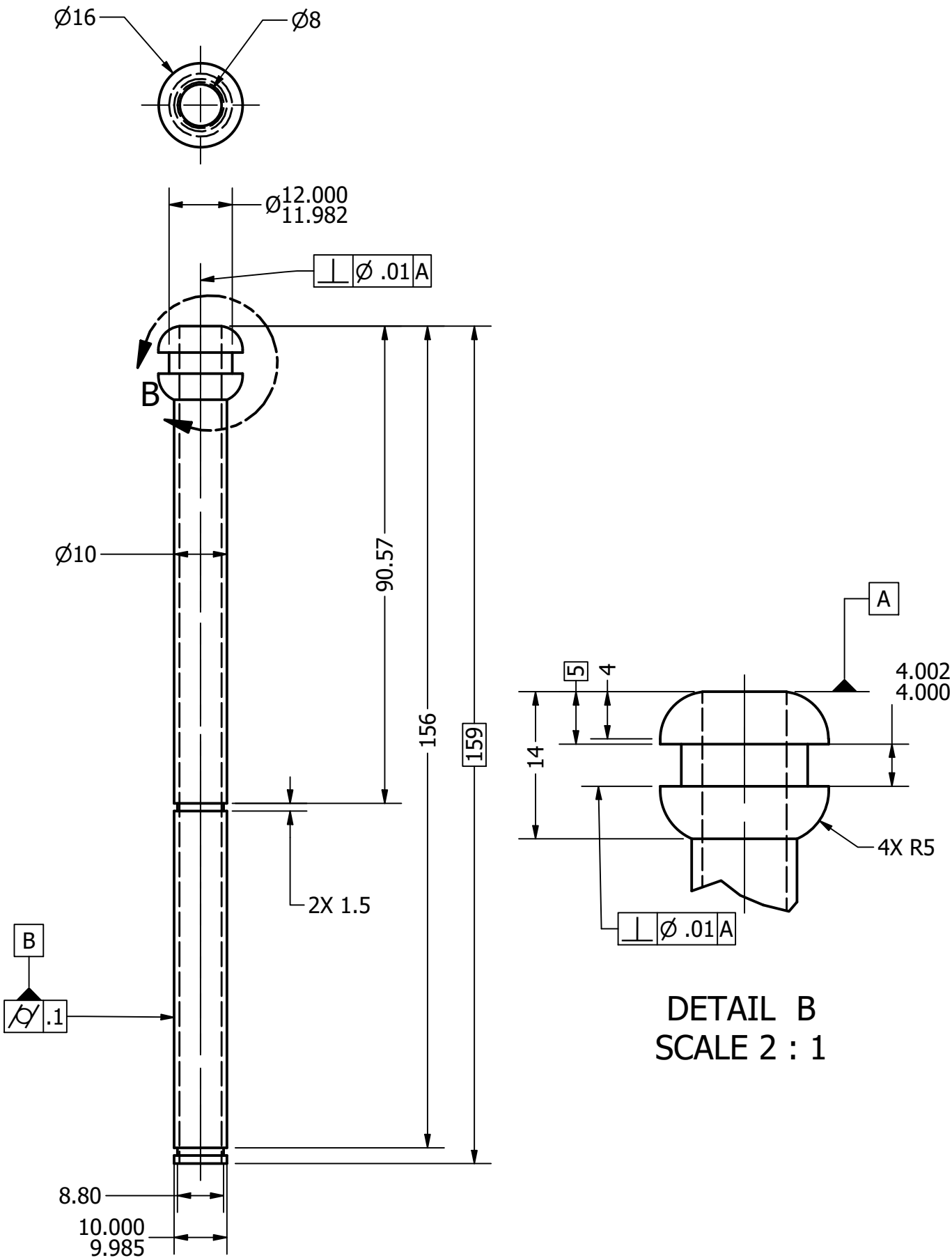


Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Eslabón interno		UNITS mm
	Material Aluminum 6061	Scale 1.5 : 1 / Size A4	Sheet 7 / 22

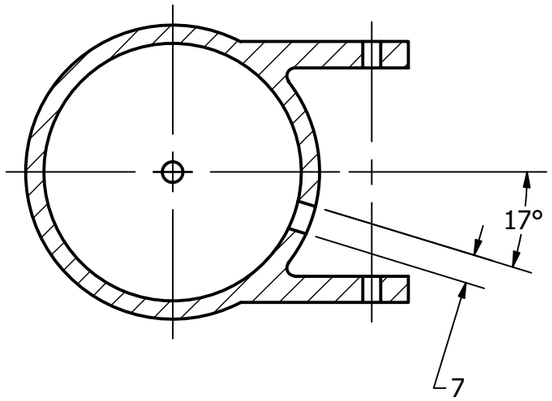




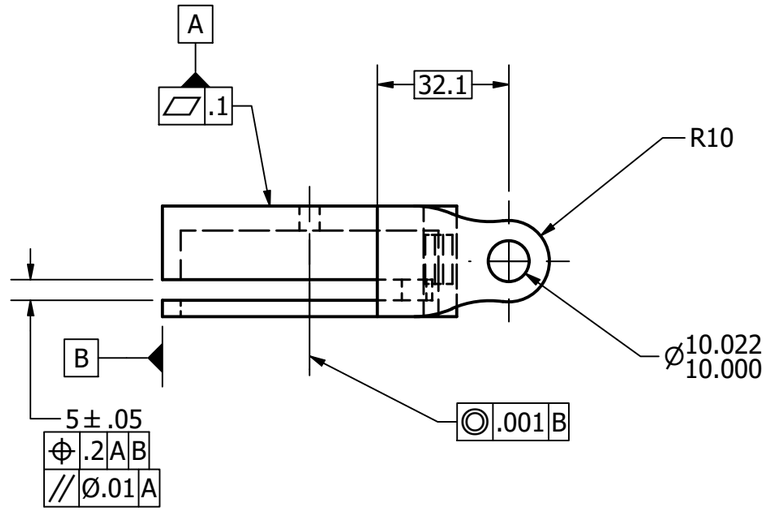
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Eslabón externo		UNITS mm
	Material Aluminio 6061	Scale 1 : 1	Size A4 / Sheet 8 / 22

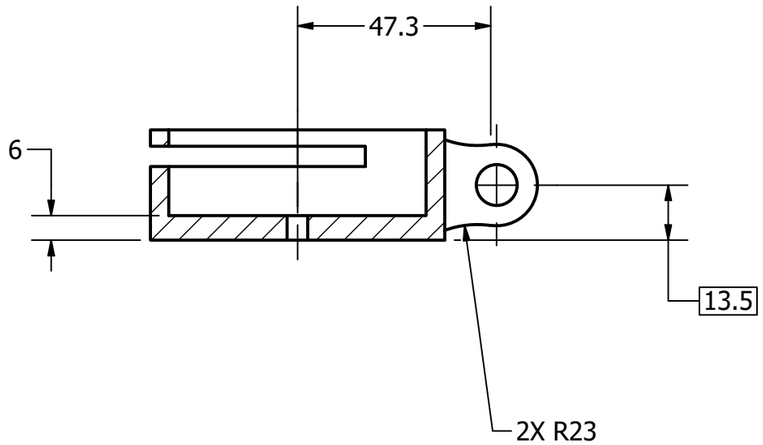


Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Tubo vertical		UNITS mm
	Material Aluminum 6061	Scale 1:1	Size A4	Sheet 9 / 22

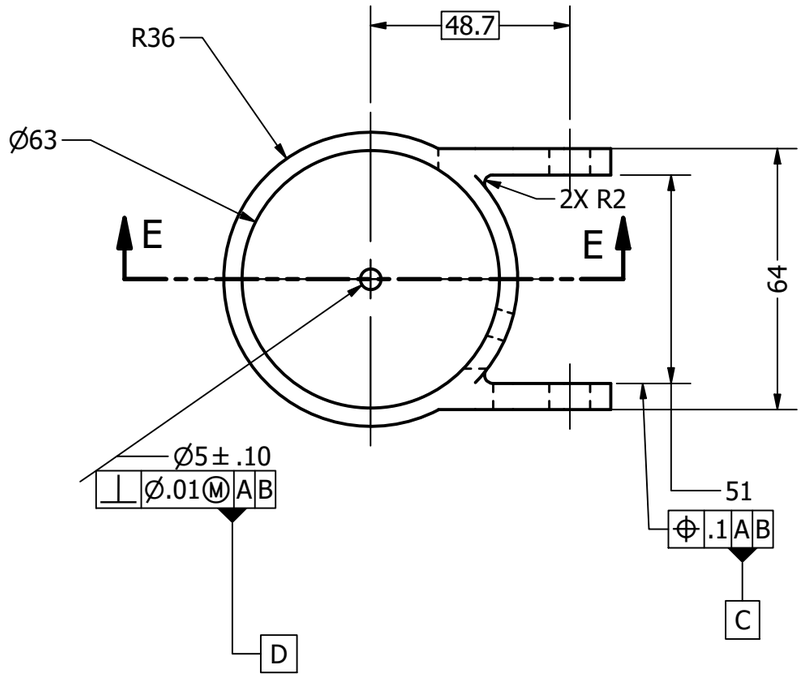


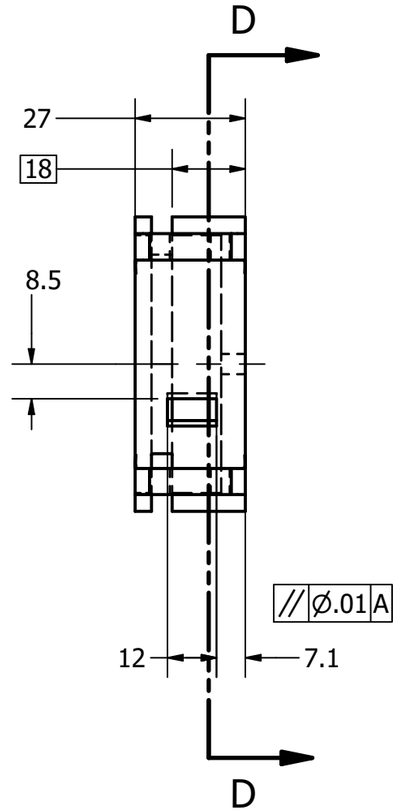
SECTION D-D



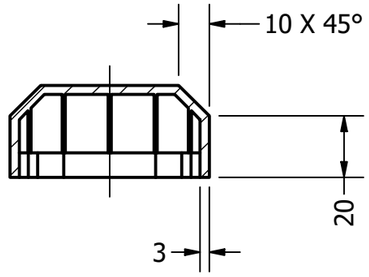


SECTION E-E

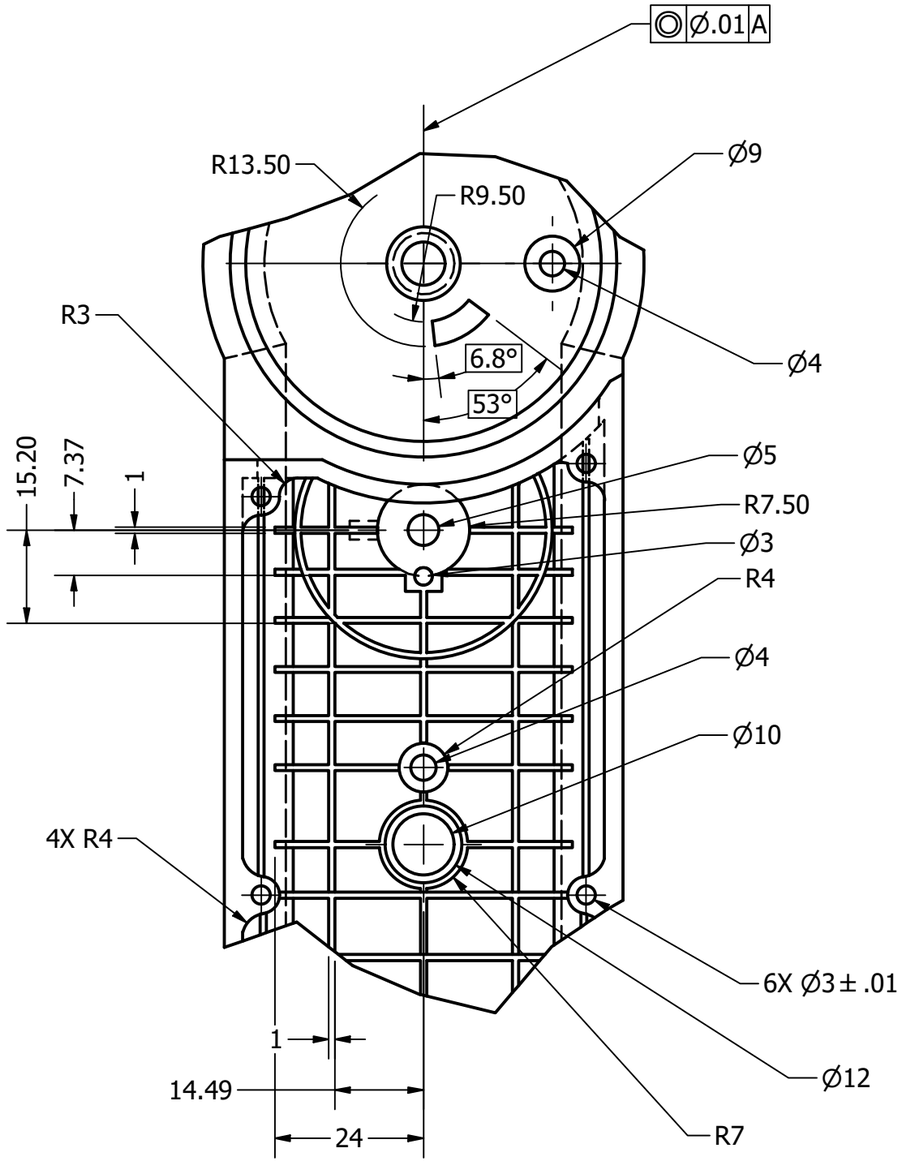




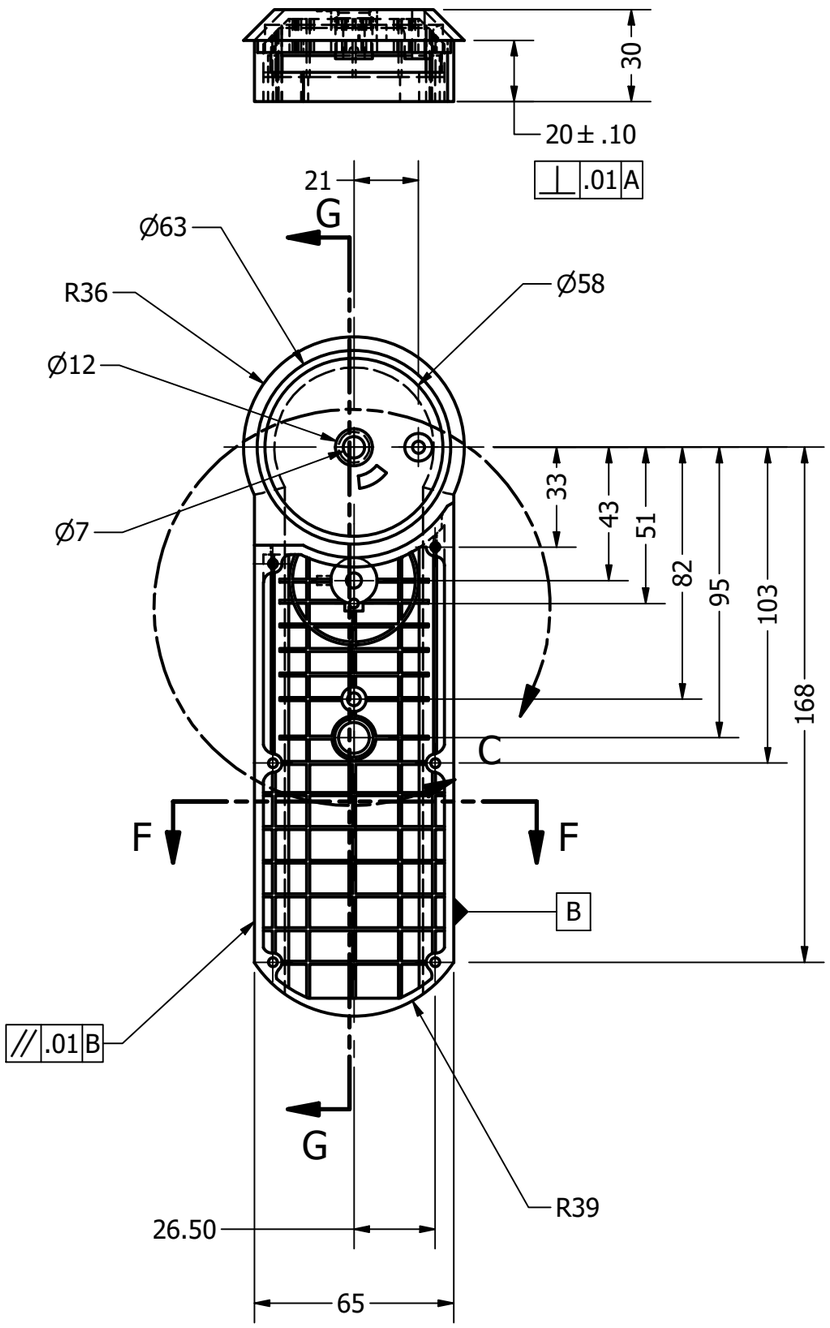
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Base de carcasa		UNITS mm
	Material ABS Plastic	Scale 1 : 1.5 / Size A3	Sheet 10 / 22

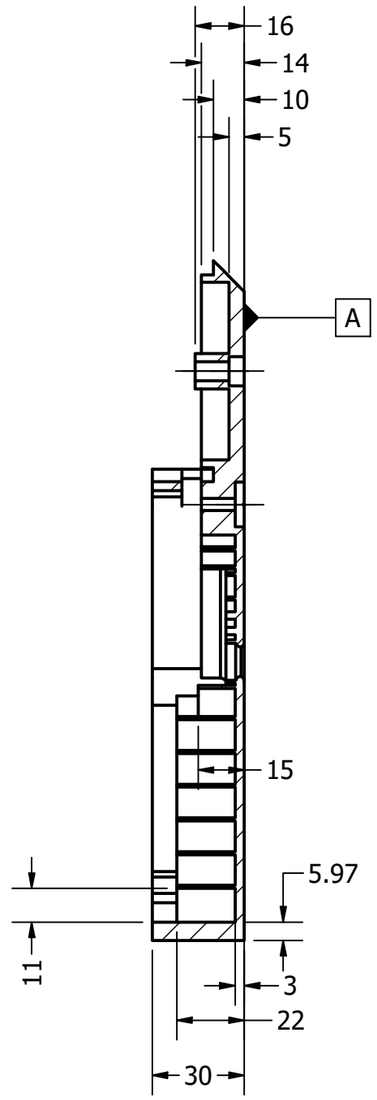


SECTION F-F



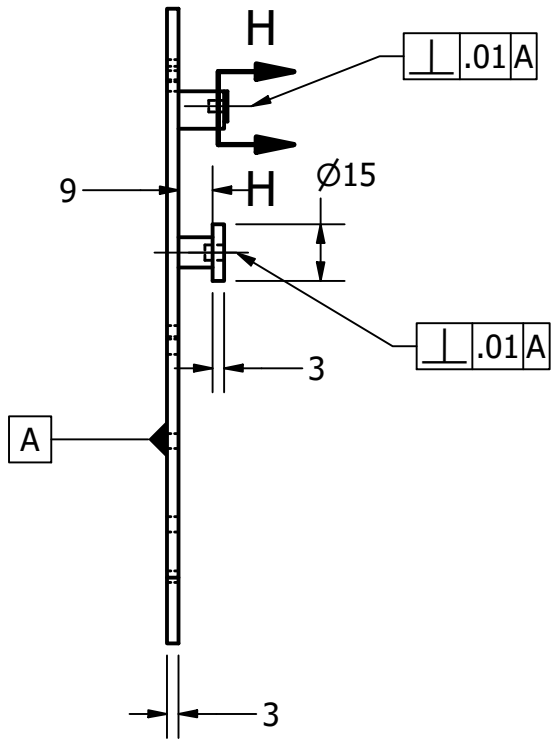
DETAIL C
SCALE 1 : 1

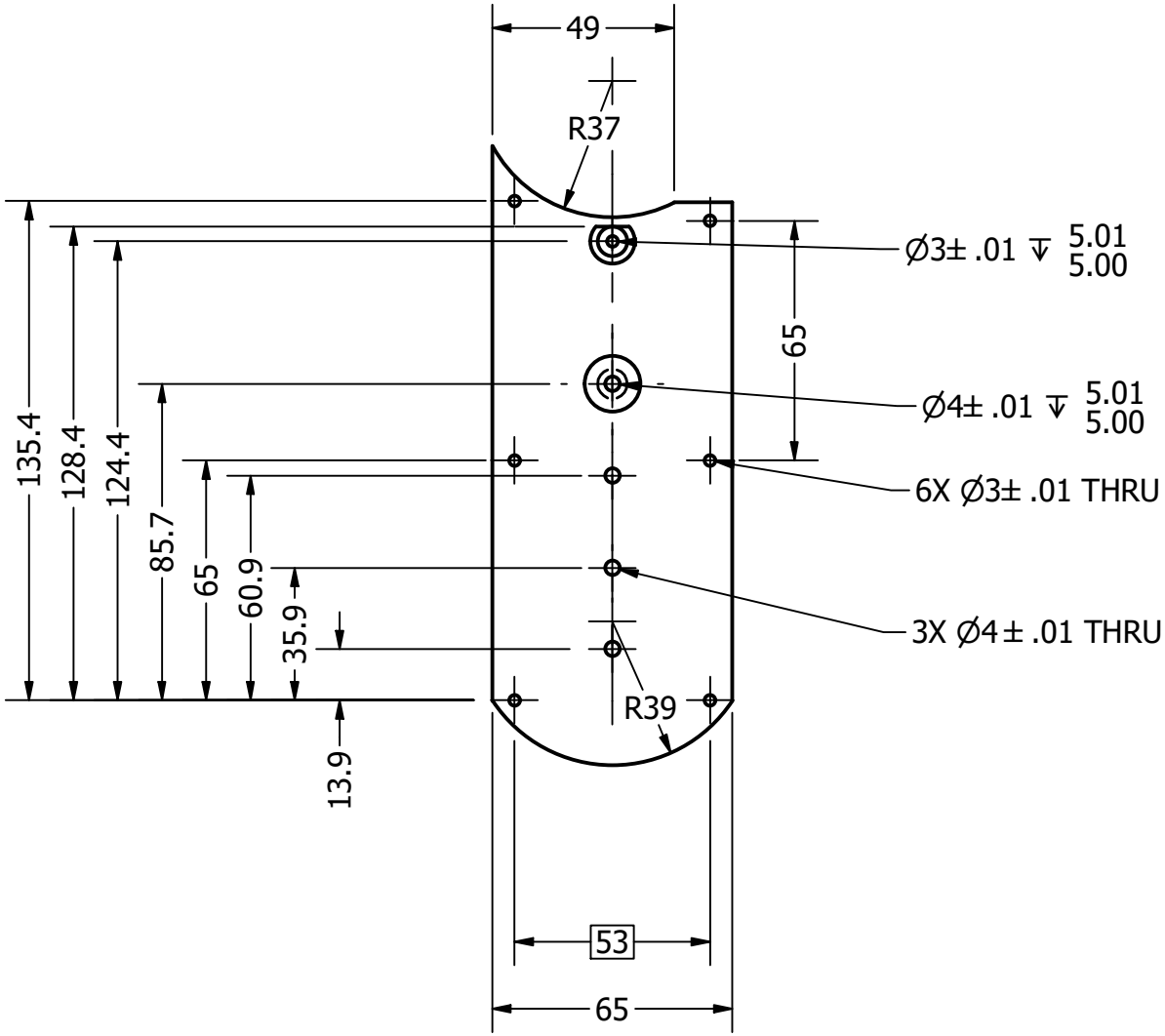


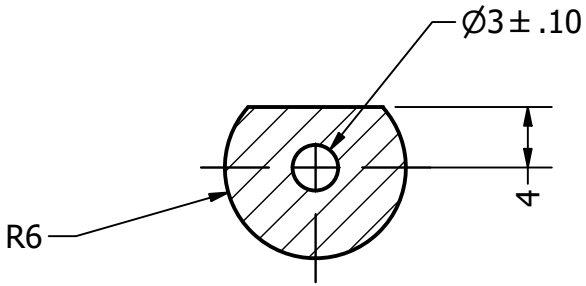


SECTION G-G

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Carcasa frontal		UNITS mm
	Material ABS Plastic	Scale 1 / 2	Size A3 / Sheet 11 / 22

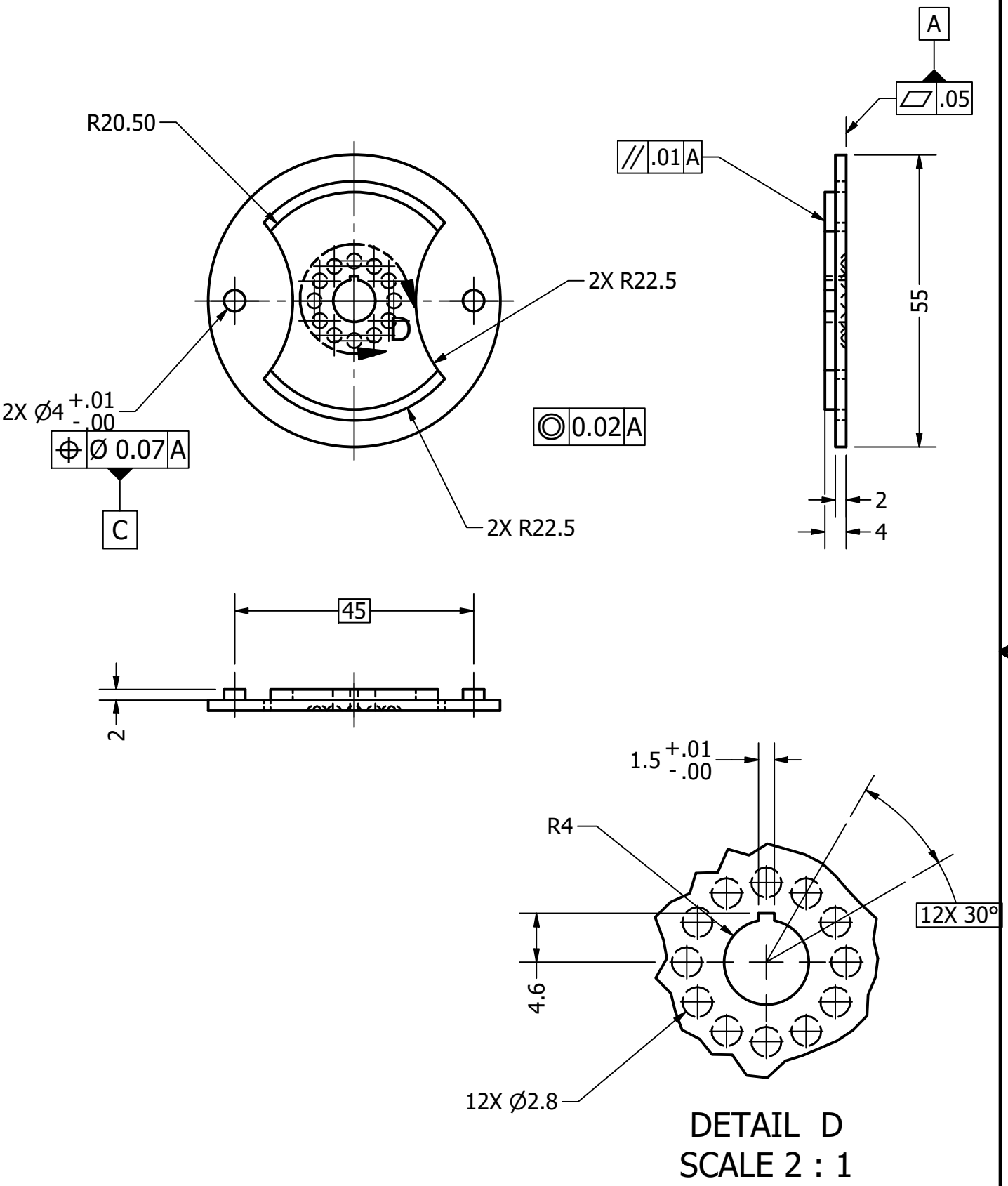




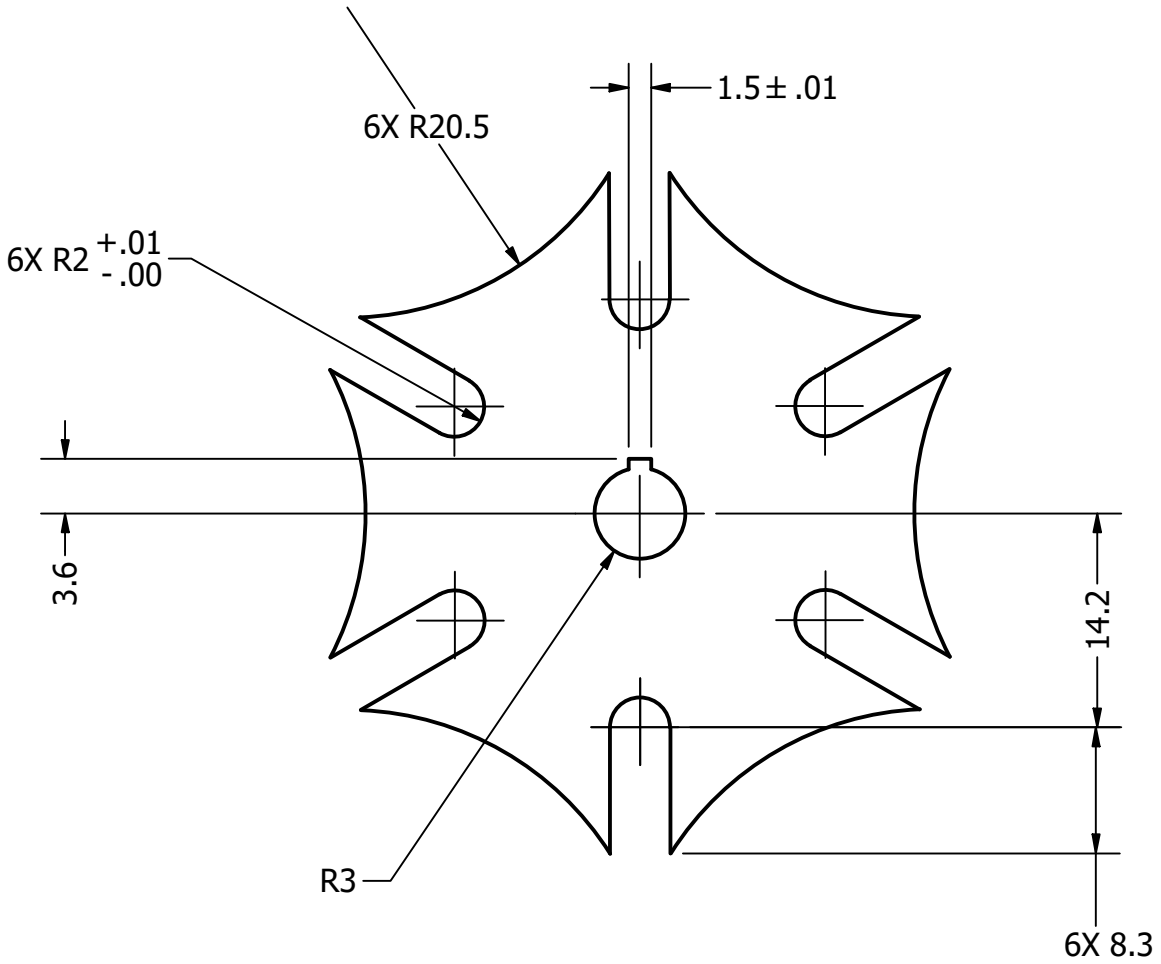


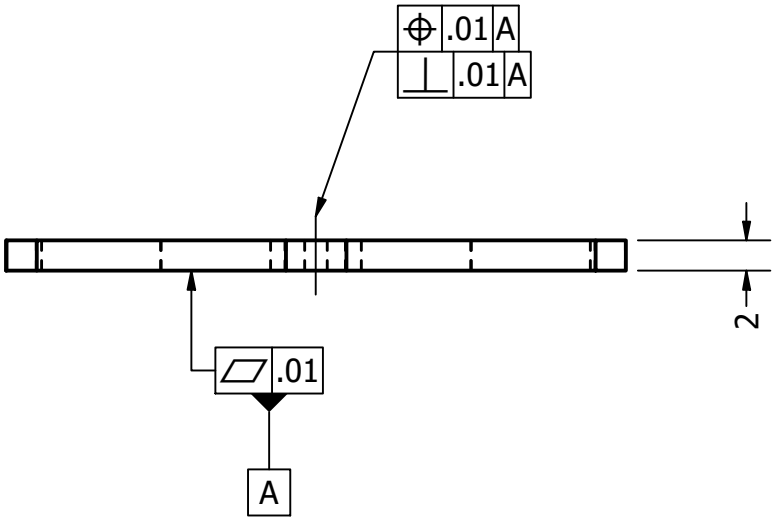
SECTION H-H
SCALE 2 : 1

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: **Carcasa posterior**		UNITS mm
	Material ABS Plastic	Scale 1 / 2	Size A4	Sheet 12 / 22

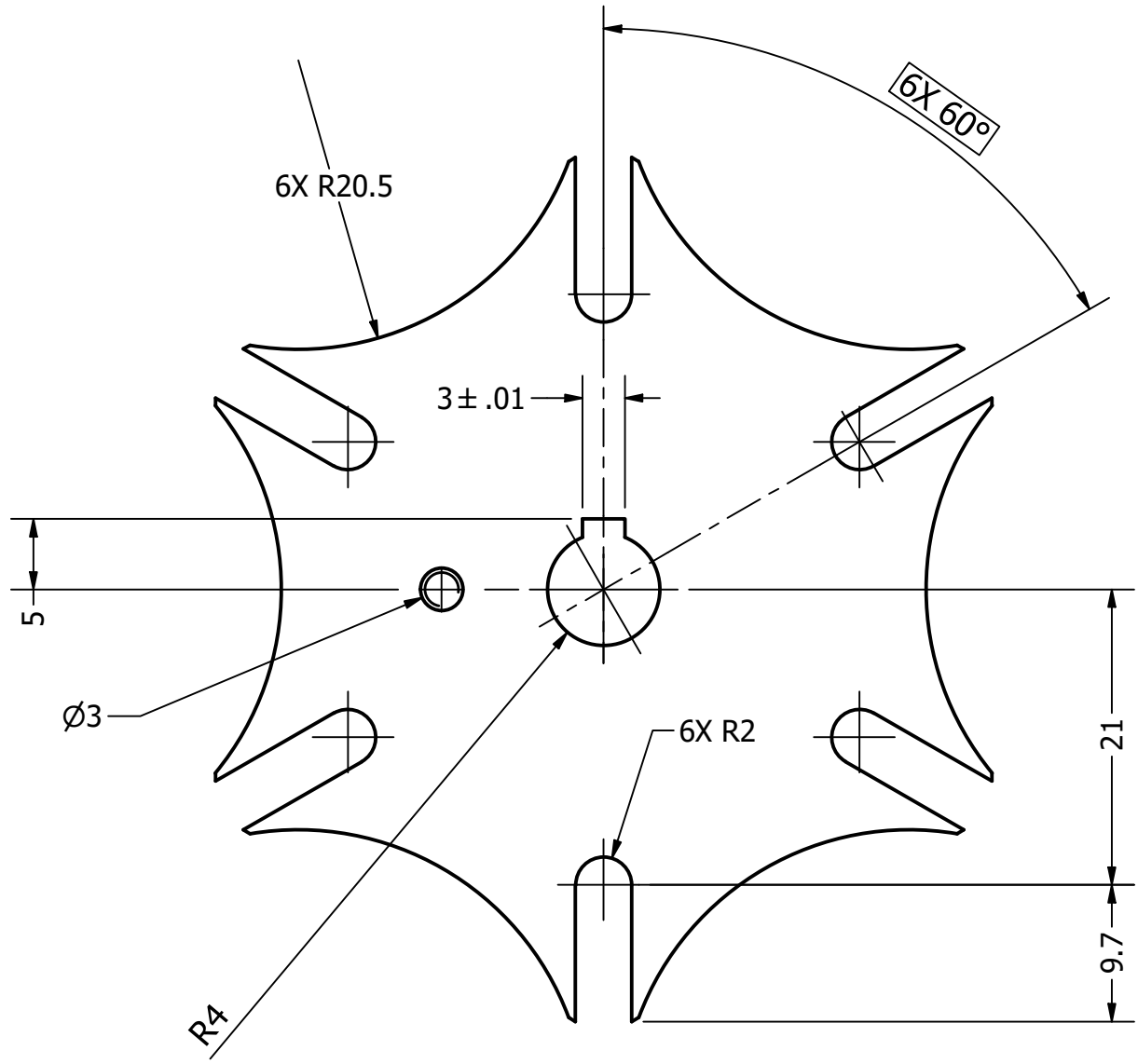


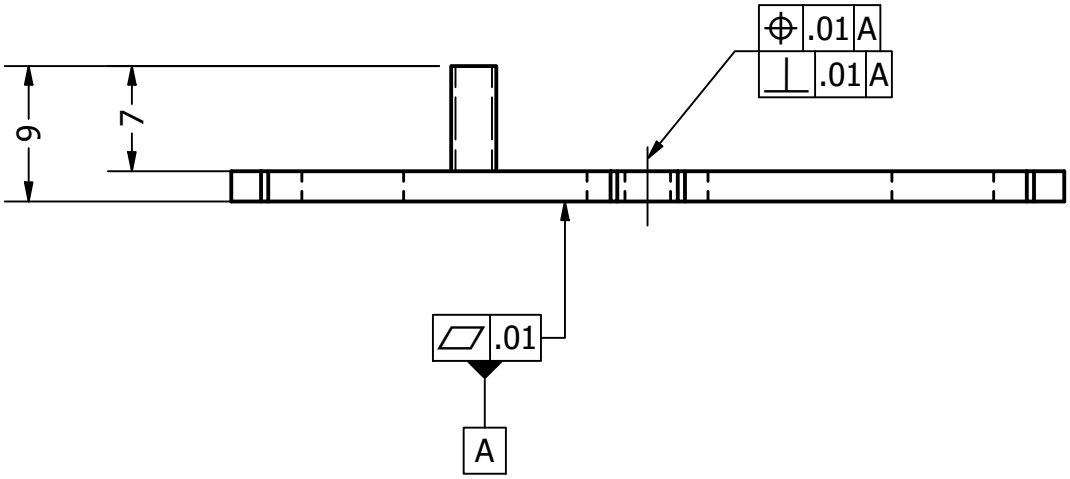
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Rueda impulsora			UNITS mm
	Material Acero, suave	Scale 1 : 1	Size A4	Sheet 13 / 22



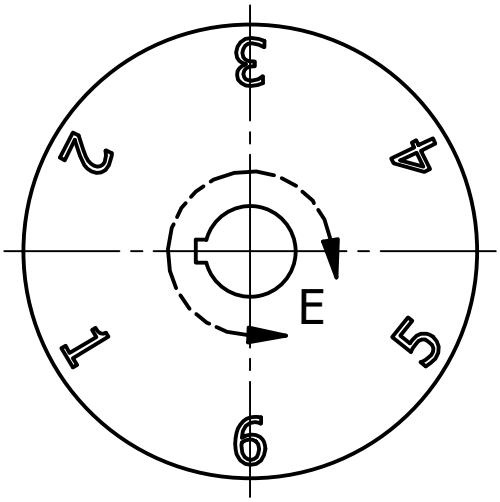


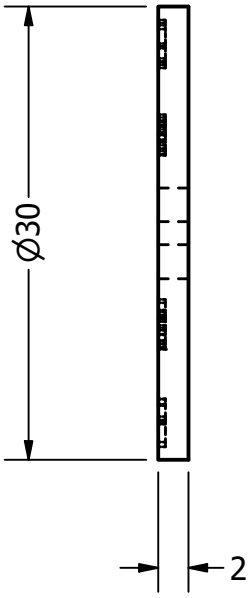
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.		Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Cruz de malta inferior				UNITS mm
		Material Aluminio 6061	Scale 2 : 1	Size A4	Sheet 14 / 22

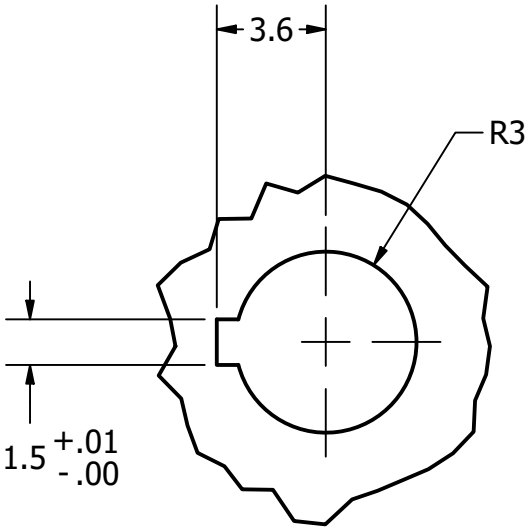




Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.		Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Cruz de malta superior				UNITS mm
		Material Acero inoxidable	Scale 2 : 1	Size A4	Sheet 15 / 22

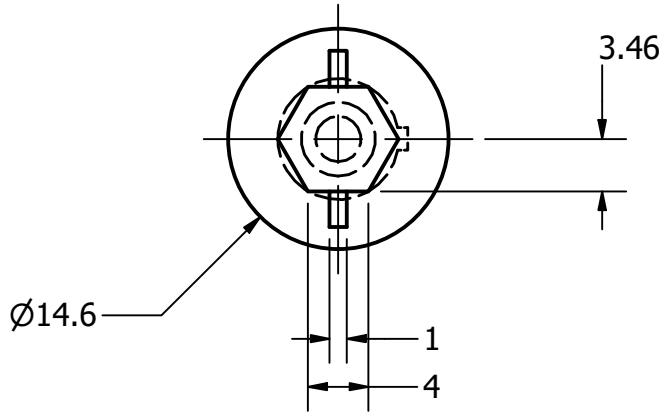


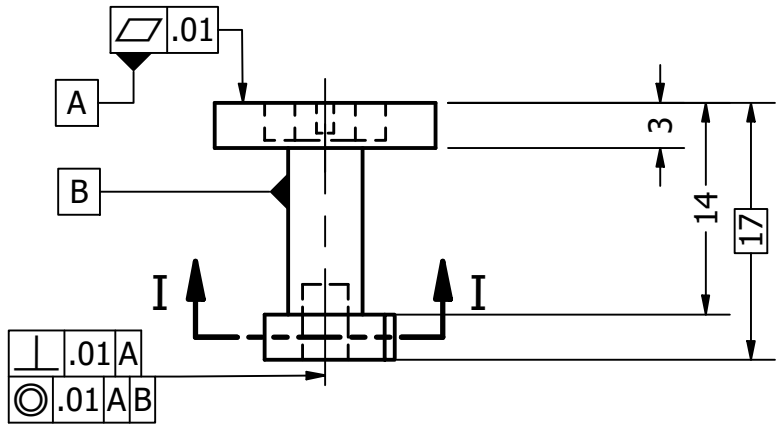


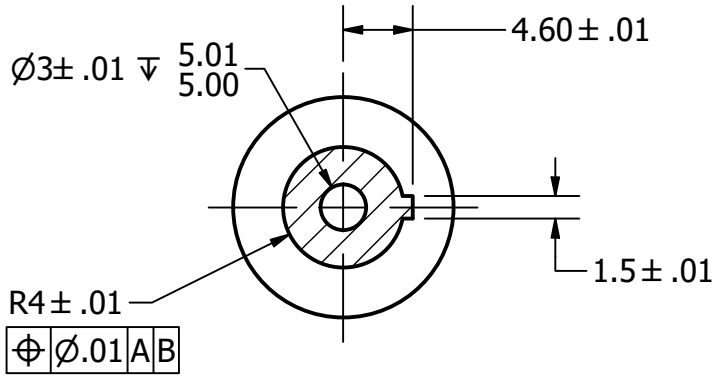


DETAIL E
SCALE 4 : 1

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Rueda indicadora			UNITS mm
	Material Aluminio 6061	Scale 2 : 1	Size A4	Sheet 16 / 22

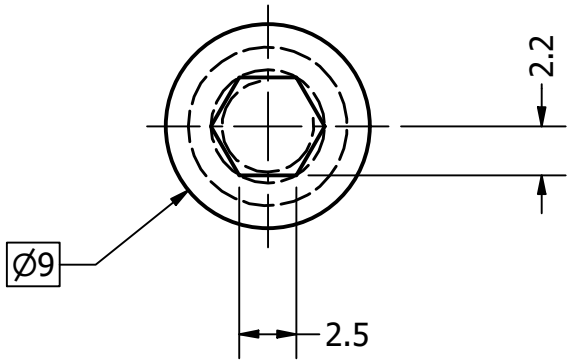


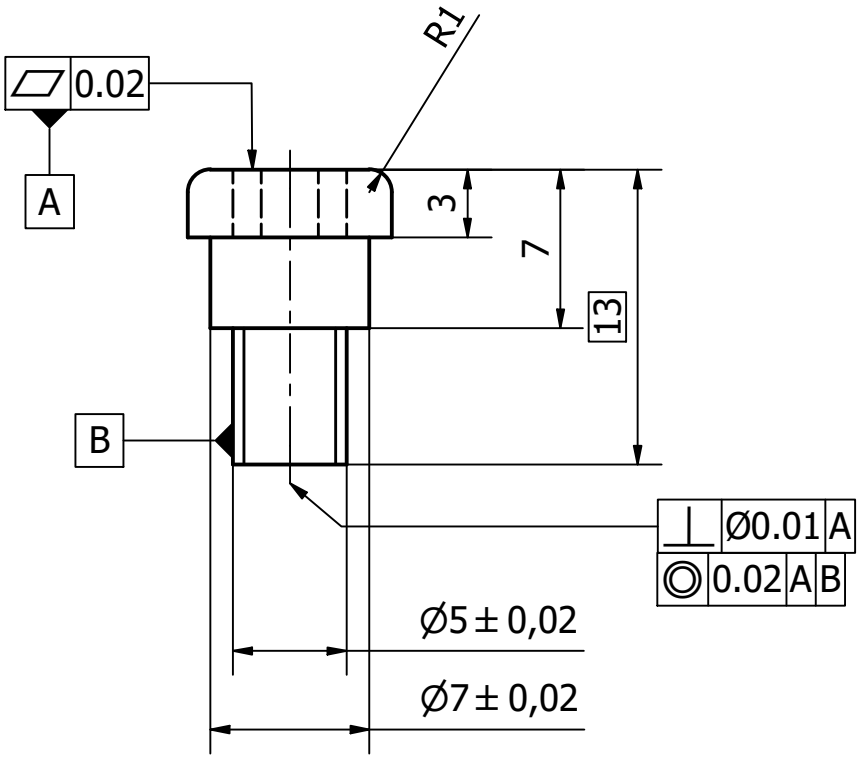




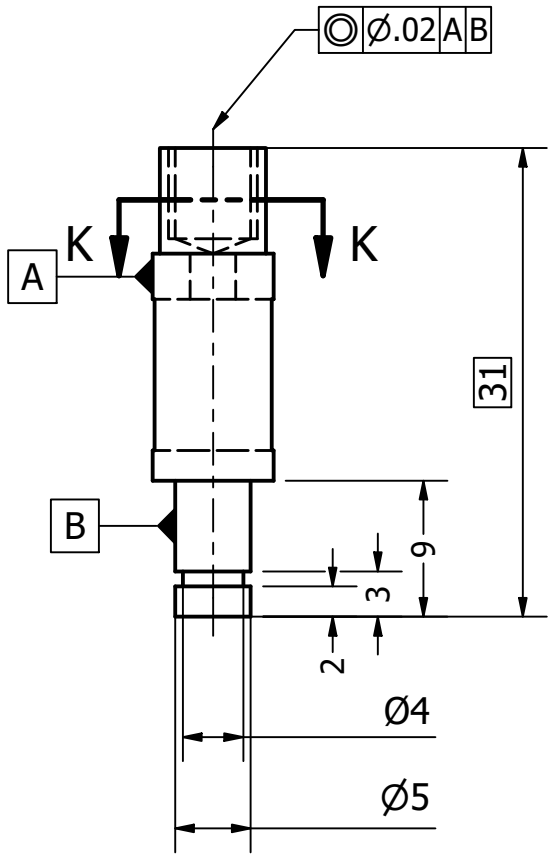
SECTION I-I

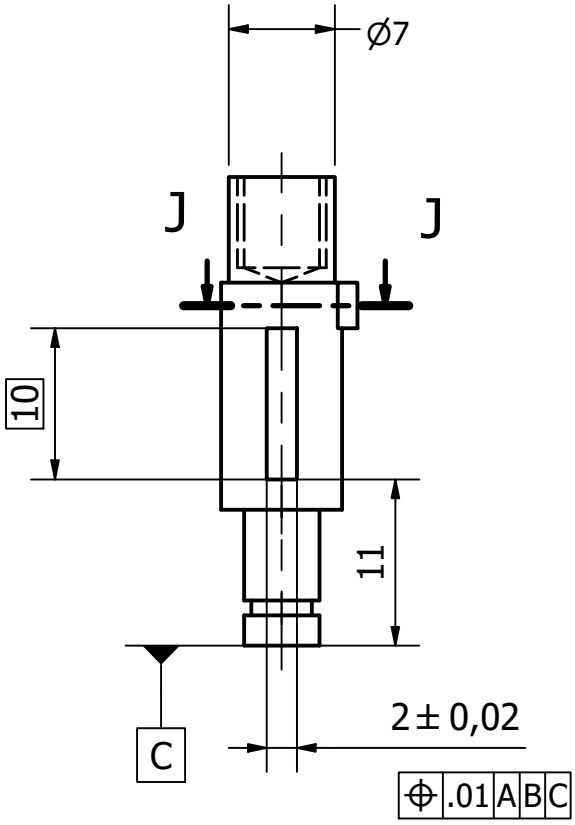
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.		Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Tornillo de mecanismo				UNITS mm
		Material Acero inoxidable	Scale 2 : 1	Size A4	Sheet 17 / 22

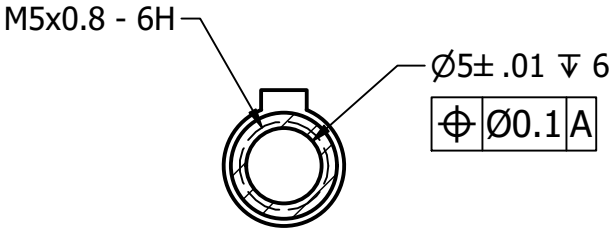




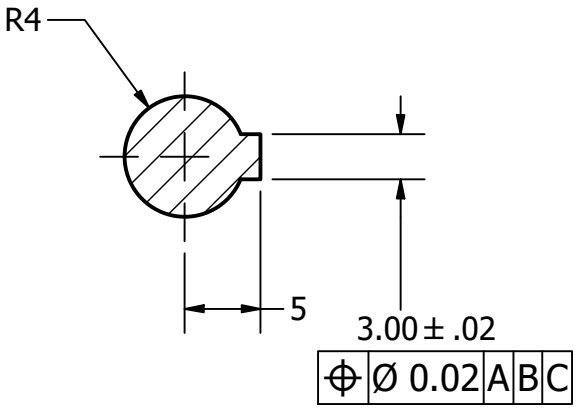
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Tornillo de eje de centro		UNITS mm
	Material Genérico	Scale 3 : 1	Size A4	Sheet 18 / 22





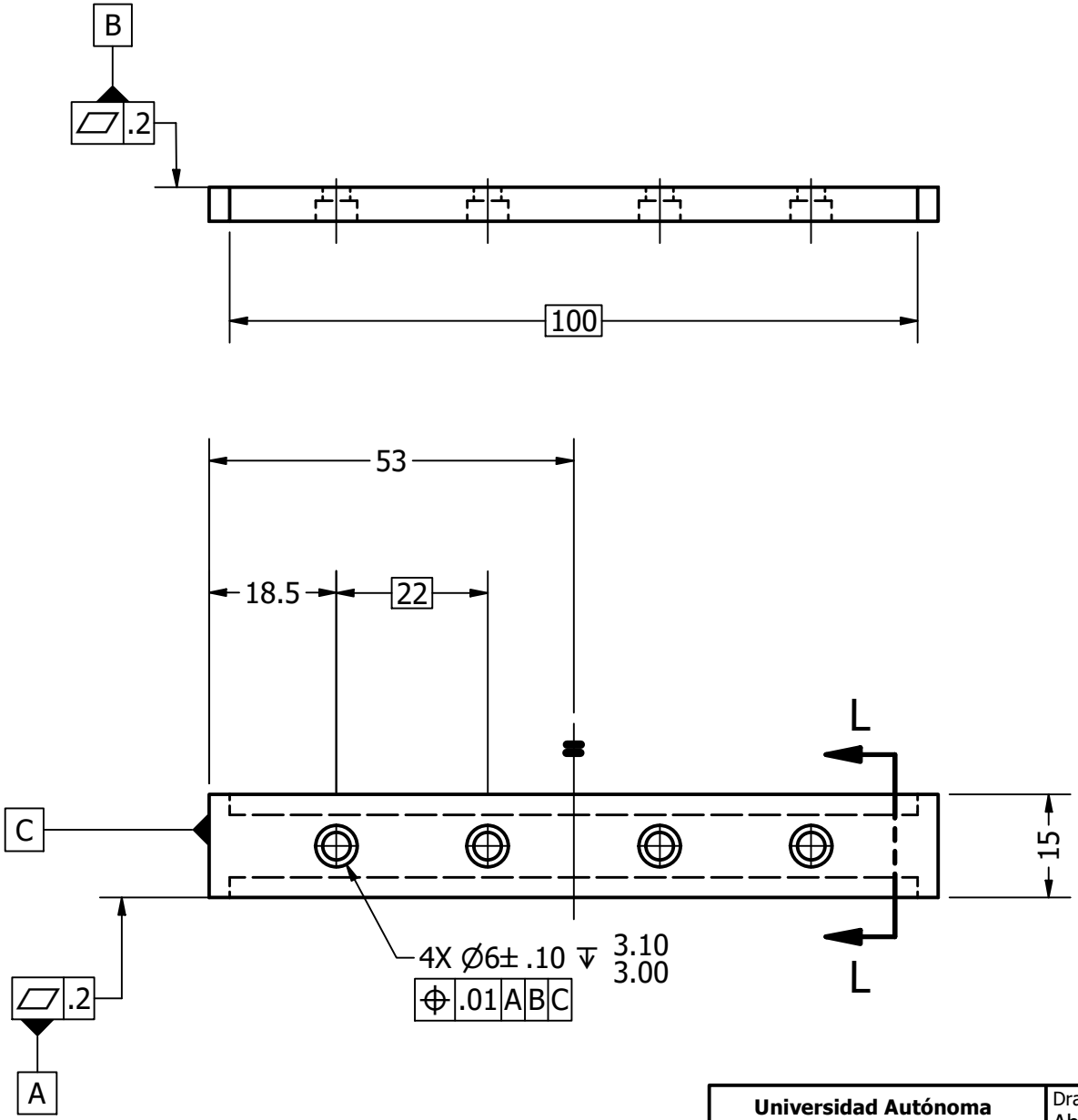


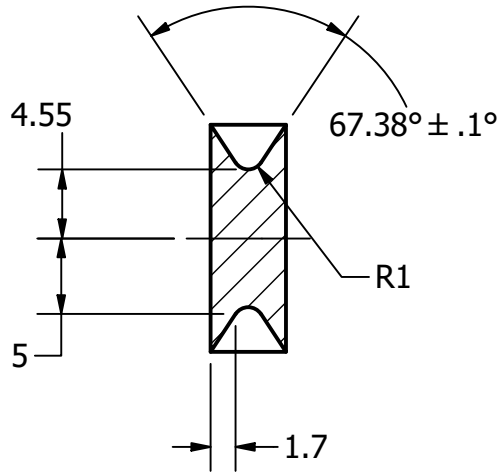
SECTION K-K



SECTION J-J

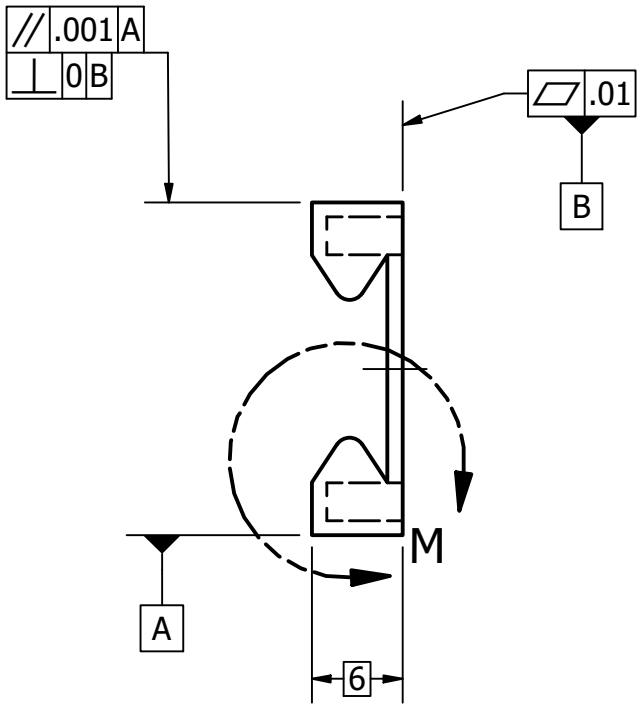
Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.		Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: Eje de centro				UNITS mm
		Material Hierro, dúctil	Scale 2 : 1	Size A4	Sheet 19 / 22

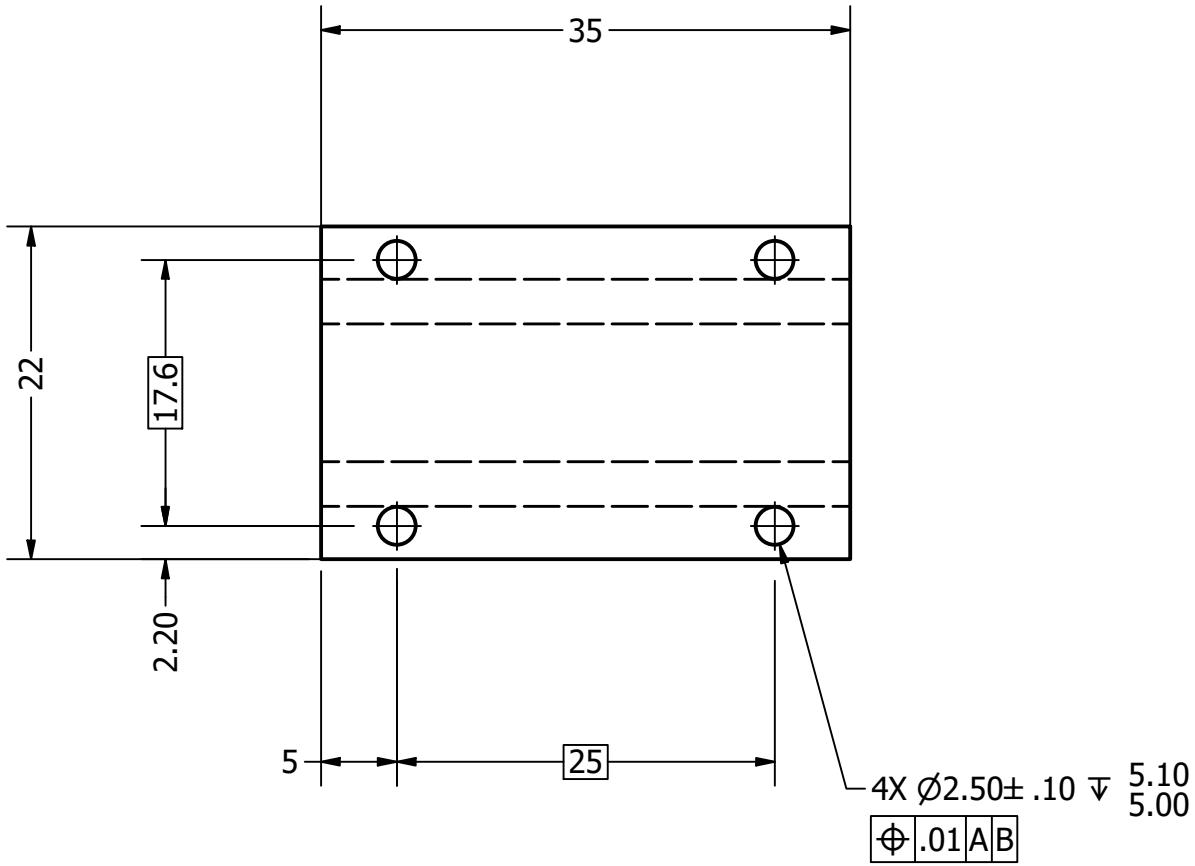


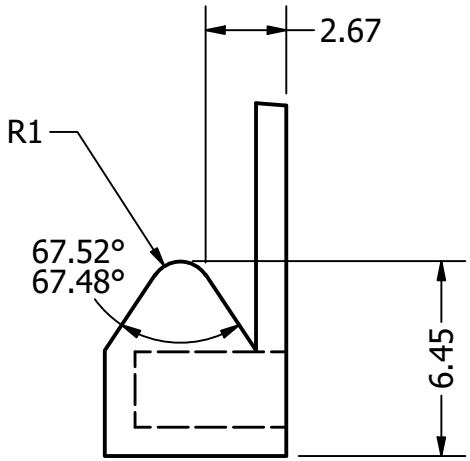


SECTION L-L
SCALE 2 : 1

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: **CORREDERA FIJA**		UNITS mm
	Material Acero inoxidable	Scale 1 : 1	Size A4	Sheet 20 / 22

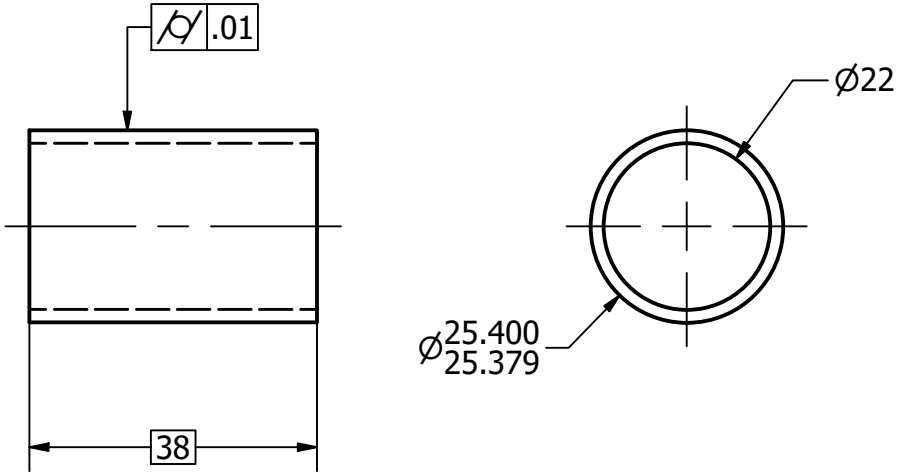






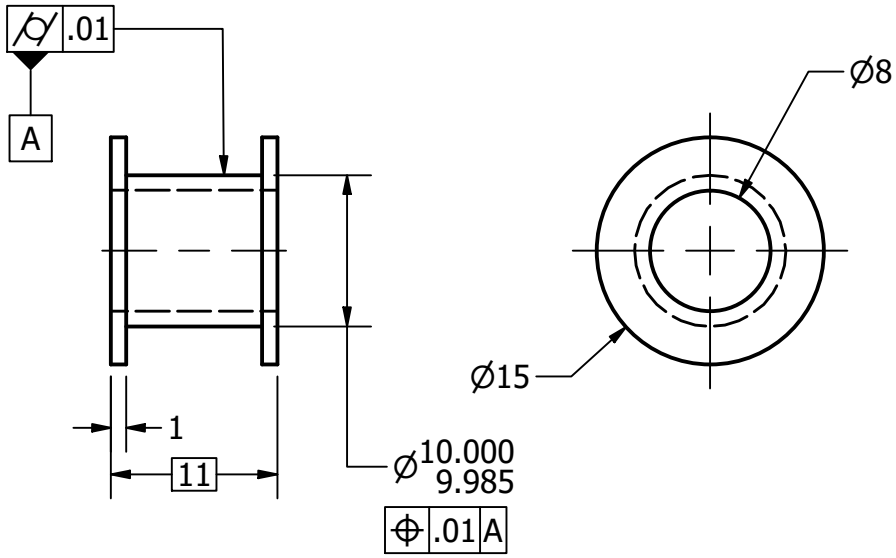
DETAIL M
SCALE 4 : 1

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.	Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: **CORREDERA MÓVIL**		UNITS mm
	Material Genérico	Scale 2 : 1	Size A4	Sheet 21 / 22



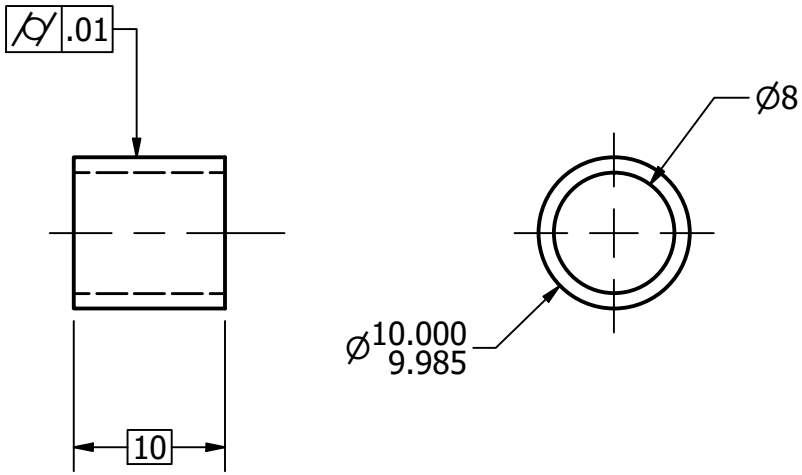
Escala: 1:1

Camisa 1 (torso superior)



Escala: 2:1

Camisa 2 (eslabones)



Escala: 2:1

Camisa 3 (acoplador)

Universidad Autónoma Metropolitana	Drawn by Abraham Venegas A.	Checked by Joshua Martinez J.		Date 07/07/2021
Azcapotzalco	Title: **Camisas de Nylon**			UNITS mm
	Material Nilón 6/6	Scale 1 : 1	Size A4	Sheet 22 / 22

XI. ANEXOS

ENTREGABLES

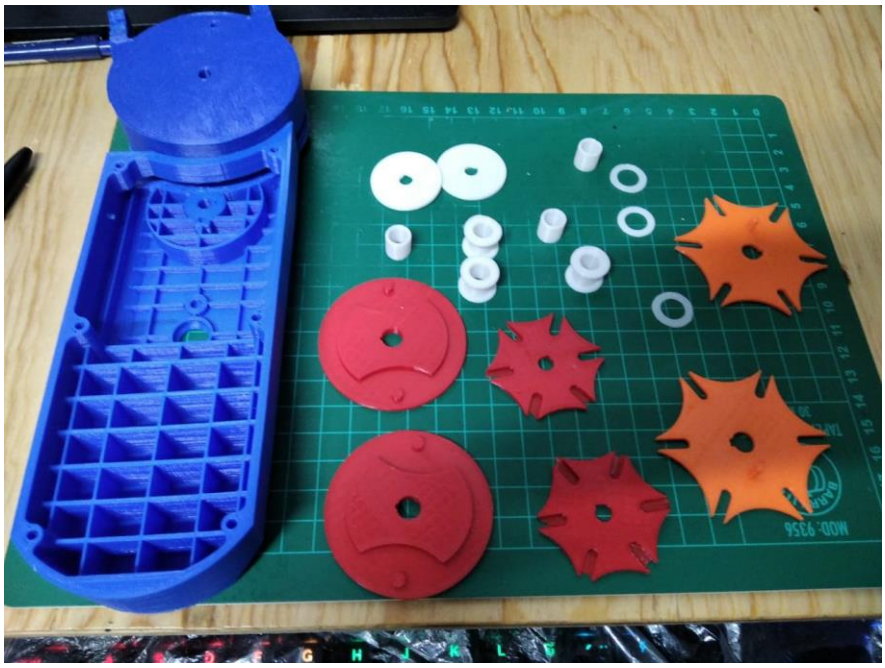
De acuerdo con lo estipulado antes de realizar este proyecto. Se anexa a continuación evidencia del trabajo realizado en el proceso de maquinado y obtención de piezas para el prototipo de exoesqueleto; así como la mención de que se entrega un video del mismo en operación realizando actividades propias de un pintor al trabajar en una pared.

Figura 120. Exoesqueleto durante el proceso de maquinado y ensamble.

a)

b)

Figura 121. Exoesqueleto armado.



a) Elementos que conforman caja de torque y camisas.

a) Carcasas de caja de torque

Figura 122. Piezas obtenidas mediante impresión 3D (caja de torque).