



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN**

**Desarrollo de Prótesis Robótica Inteligente
para miembro torácico en perros**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A:

EDUARDO DE JESÚS GARCÍA VELÁZQUEZ

**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. DAVID TINOCO VARELA**



**UNAM
CUAUTITLÁN**

Cuautitlán Izcalli, Estado de México

2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN
ASUNTO: VOTO APROBATORIO



DR. DAVID QUINTANAR GUERRERO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: DRA. MARÍA DEL CARMEN VALDERRAMA BRAVO
Jefa del Departamento de Titulación
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el trabajo de: **Tesis.**

Desarrollo de Prótesis Robótica inteligente para miembro torácico en perros

Que presenta el pasante: **Eduardo de Jesús García Velázquez.**

Con número de cuenta: **412054785** para obtener el Título de: **Ingeniero Mecánico Electricista.**

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO.**

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 01 de junio de 2022.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dr. Pedro Guzman Tinajero	
VOCAL	Ing. Arturo Ávila Vázquez	
SECRETARIO	Dr. David Tinoco Varela	
1er. SUPLENTE	M. en C. Leopoldo Martin del Campo Ramírez	
2do. SUPLENTE	Dr. Raul Dalí Cruz Morales	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional.

MCVB/ntm*

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo costó bastante. A lo largo de casi dos años: entre cuestiones laborales, eventos sociales convulsos y épocas difíciles, se ha podido concluir una pequeña parte de un proyecto que debería ser mucho más grande. Pero como el dicho reza, y de manera adecuada para este sueño: “Roma no se construyó en un día”.

En primera instancia, quisiera agradecer a dos personas muy importantes en mi vida y que, desafortunadamente no podrán ver este trabajo concluido: a mi abuelo, Vicente Velázquez Arcia (QEPD), por ser antes que mi abuelo mi padre, mi mentor y mi guía por más de la mitad de mi vida. Y a mi tía, Ma. Guadalupe Velázquez Delgado (QEPD), quien siempre me apoyó en muchos de los momentos más difíciles de mi vida.

A mi madre, Ramona Velázquez Delgado, quien siempre ha estado conmigo y me ha apoyado aún sacándole canas verdes; por ser mi mentora, mi guía y la persona que más ha confiado en mí y en cada proyecto que ha cruzado mi cabeza.

A mi abuela, Ma. De Jesús Delgado, a mis tíos y tías y primos, que siempre estuvieron en el trascurso de estos últimos años y en apoyo constante al proyecto, en especial a mi tío Jesús Velázquez y mi primo Ricardo Velázquez, quienes me ayudaron en la fabricación de algunas partes del prototipo de la prótesis.

A mi *alma mater*, la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, que por cinco largos años me educó, me guio y me condujo a quien soy ahora en mi trayectoria profesional y personal.

A mi asesor, el Dr. David Tinoco Varela, por creer en este proyecto y en sus alcances, aun con la novedad que presentaba y el reto que era mezclar la ingeniería con la medicina veterinaria, por su consejo y guía y el apoyo en la difusión de esto que antes era solamente una idea.

A mi amiga y también asesora, Eugenia López Miranda, por los consejos, la guía y ser la mejor veterinaria que he conocido. Sin ella este proyecto hubiera seguido sin tener ni pies ni cabeza en el papel ni en las ideas.

A Tatiana Rodríguez Galán, por levantarse conmigo siempre de madrugada para ir paso a pasito generando ideas. Sin ella el trabajo no hubiera podido concluirse jamás.

A Itzél Ramírez Guadarrama, por compartir la génesis de este proyecto.

Y, al final, pero no menos importante, al perrito Milo. Es por él y todos los perritos en esta triste situación que este proyecto sigue y seguirá creciendo hasta lograr mejorar su calidad de vida.

RESUMEN

La presente tesis muestra el desarrollo y manufactura de una prótesis robótica para un perro de raza grande, mestizo, el cual carece del miembro torácico derecho. Con ayuda de una médica veterinaria y diversos estudios relacionados con el comportamiento biomecánico de estos animales, el creador de este trabajo se sirvió de estudiar y analizar cada una de las características tanto estáticas como dinámicas relacionadas al movimiento. La principal preocupación fue la funcionalidad de la prótesis desde la síntesis del mecanismo comparado con el movimiento natural de la extremidad, la forma y la selección de materiales para la prótesis. El diseño de la máquina señala el análisis mecánico del miembro sano, el cual funcionó como punto de partida para la esquematización de un prototipo inicial, consultado el diseño en un software CAD (en el caso particular del trabajo se recurrió a un software CAD-CAE) y en el cual también se realizaron los estudios de elemento de la máquina, eslabón por eslabón, servido del Método de Elementos Finitos que nos proporciona el programa en sus extensiones. Los resultados arrojados por el mismo se presentan de manera sintetizada. La versatilidad de este programa CAD también sirvió para el análisis de movimientos, utilizando las metodologías de la síntesis cinemática para mecanismos cerrados (de número, de tipo y de generación de trayectoria) para generar un prototipo funcional. Para el análisis matemático de los puntos anteriores se hizo uso de un software matemático, Matlab® y de sus distintas extensiones tales como *Curve Fitting*. Para el control difuso, se recurrió al uso de un sensor conocido como acelerómetro, el cual calculará a un tiempo definido de lectura y respuesta los movimientos que realice el perro en su miembro sano; el comportamiento mimético de las extremidades al caminar nos permitirán crear un control que tome en consideración tanto la posición como la fuerza de los miembros traseros para formular las reglas que la lógica difusa (por el Método de Mamdani) y en uso del complemento del antes citado MATLAB, de tal manera que arroje una respuesta única a un servomotor previamente seleccionado por sus características mecánicas. Para poder utilizar esta metodología sin necesitar una computadora, se propuso el uso de un sistema embebido por micro controlador, en el cual un firmware difuso puede ser instalado. Este resulta de enorme utilidad gracias a su tamaño y facilidad de programación.

ABSTRACT

The study presented in this documentation shows the development and manufacturing of robotic prosthesis for a big sized dog, half-blooded breed, which lost his right forelimb. With a veterinarian physician aid and several canine biomechanical behaviors related studies, the creator of this text used them to study and analyze each one of characteristics (statics, kinematics and kinetics) related with canine gait movement.

The main concern was the prosthesis functionality compared with natural limb movement, the shaping and material selection of the prosthesis is another important point. The machine design marks healthy forelimb mechanical analysis as starting point to make a schematic prototype, consulting CAD (in this case a CAD-CAE software) and using it to realize mechanical studies in machine elements aided by finite element analysis extension integrated in this CAD software. The results shown by software are presented synthesized. The versatility of CAD software helped the creator to simulate kinematic behavior of prosthesis mechanism aided by synthesis techniques for close linkages (number, type and trajectory generator) in order to design a functional prototype.

For the mathematical analysis of the previous points, mathematical software, Matlab® and its different extensions were used like *Curve Fitting Toolbox*. For fuzzy logic control, the use of a sensor known as an accelerometer was used; this will calculate the movements made by the dog in its healthy limb at a defined reading and response time. The mimetic behavior of the limbs when walking will allow us to create a control that takes into account both the position and the strength of the hind limbs to formulate the rules that fuzzy logic (by the Mamdani Method) and in use of the complement of the aforementioned Matlab, in such a way that it yields a unique response to a servomotor previously selected for its mechanical characteristics. In order to use this methodology without needing a computer the use of an embedded system using a microcontroller is necessary, where we can install a fuzzy control firmware. This is very useful thanks to its size and ease of programming.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	i
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Los mamíferos en la vida humana.....	1
El perro.....	4
Situación del perro en el mundo y en México.....	5
Salud canina: amputaciones.....	7
Prótesis caninas: tipos y características.....	10
Prótesis Permanentes.....	11
Prótesis Removibles.....	12
II. ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA CREACIÓN DE UNA PRÓTESIS ROBÓTICA INTELIGENTE.....	15
Anatomía del perro: miembro torácico.....	16
Hombro.....	17
Brazo.....	19
Antebrazo.....	20
Mano.....	22
Biomecánica del perro en su marcha.....	23
Cinemática de la marcha canina.....	25
Dinámica de la marcha canina.....	31
Estática en la marcha canina.....	35
Inteligencia Artificial: La lógica difusa como controlador.....	40
Principios de diseño de un control difuso.....	42
III. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	48
IV. HIPÓTESIS DE FUNCIONAMIENTO.....	48
V. PRESENTACIÓN DEL SUJETO DE ESTUDIO.....	49
Milo: paciente a la espera de su prótesis.....	49
VI. DESARROLLO DE LA PRÓTESIS.....	51
El proceso de diseño mecánico del mecanismo de prótesis.....	51
Matriz de Requerimientos.....	52
Presentación de los Artes Conceptuales Preliminares.....	54
Síntesis cinemática de mecanismos para la obtención de diseños funcionales.....	56

Análisis cinemático de posición para validar trayectorias en el diseño propuesto.....	72
Propuesta de actuador de potencia mecánica para transmisión	76
Generación del sistema mecánico de transmisión de potencia.....	79
Análisis de velocidad y aceleración de un prototipo de prótesis	83
Materiales para la manufactura de la prótesis.....	87
Fundición en arena verde.....	89
Aluminio 5182 (aluminio para fundición).....	91
Impresión 3D por FMD (Modelado por Deposición Fundida).....	92
Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).....	95
Ácido Poliláctico (PLA)	97
Modelo dinámico para el prototipo de prótesis.	99
Análisis por Elementos Finitos del sistema de potencia mecánico	105
Análisis dinámico del prototipo de prótesis.....	108
Eje de transmisión de potencia y pernos de rotación.....	109
Análisis de esfuerzos y optimización topológica de elementos del mecanismo de prototipo.....	112
Materiales para prototipo, comparación de costos.....	118
Diseño de un sistema embebido de control electrónico	119
Sensores, controles, actuadores y comunicación.....	123
Sensor acelerómetro MMA7361.....	124
Sistema embebido de obtención de datos	132
Control difuso para sistema de potencia.....	138
Servomotor como sistema de potencia mecánica	143
Sistema de comunicación vía bluetooth: protocolo USART	147
VII. FABRICACIÓN Y RESULTADOS FINALES.....	156
Creación del circuito impreso.....	156
Manufactura del prótesis	162
VIII. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA FUTURA.....	171
Referencias	173
Anexos.....	176

I. INTRODUCCIÓN

Los mamíferos en la vida humana

En la biología se tienen distintas formas de clasificar la vida en su integridad, coincidiendo en que ésta debe tener una clasificación objetiva trazando la historia evolutiva de cada especie y su conformación bioquímica y genética. La forma actual de clasificación consiste en tres grandes dominios.

- Bacteria.
- Archea (los cuales son las arqueobacterias).
- Eukarya (organismos multicelulares).

En el dominio conocido como las eucariotas se encuentran los reinos protista (protozoos), el fungi (los hongos), las plantas y los animales. Y entre la variedad de filiums (las cuales son categorías de clasificación fisiológicas de los seres vivos) y clases, encontramos a los mamíferos.

En esta subdivisión del reino animal se encuentran alrededor de 4,629 especies en el mundo (De Erice & González, 2009). Sin embargo, a pesar de contar con una gran variedad de estas, las características siguientes son comunes en todos los mamíferos. Algunas de estas se pueden ver en los animales presentes en la figura 1.1.

- Presentan pelo cubriendo todo su cuerpo, el cual mudan a lo largo de su vida.
- La piel presenta glándulas sebáceas, sudoríparas y mamarias (de las cuales deriva su nombre).
- Esqueleto con un cráneo evolucionado, vértebras cervicales (siete para todas las especies de mamíferos), dorsales, lumbares, sacras y caudales (conformación de la cola).
- Boca con una diversidad de dientes.
- Cuatro extremidades pentadáctilas (generalmente); estas extremidades, tanto las delanteras (torácicas) como las traseras (pelvianas) se unen al esqueleto gracias a la cintura escapular y pelviana, las cuales están diferenciadas entre sí en todas las especies por su tamaño y robustez siendo que cada una de ellas realiza una tarea específica, dirección y potencia respectivamente, al momento de realizar un movimiento.
- Corazón de cuatro cámaras y respiración pulmonar.

- Son homeotermos (de sangre caliente) y poseen sexos diferenciados con fecundación interna, siendo estos vivíparos (a excepción de los monotremas, los cuales son ovíparos, tales como el ornitorrinco y el equidna).



Fig. 1.1 Ejemplos de mamíferos en la naturaleza. Tomada de: <https://www.gtush.com/mamiferos/>

Es importante considerar que los mamíferos presentan el grupo zoológico más útil para la humanidad desde el punto de vista socioeconómico. Utilizamos a los rumiantes como la vaca para producir nuestros alimentos, así como artículos de peletería; a los caballos como animales de labranza, con el fin de optimizar los trabajos en agricultura y también cabe mencionar el uso de muchos de ellos en el control de plagas. Desde los gatos que en nuestras casas nos ayudan a controlar plagas como los ratones o las ratas, hasta los murciélagos o las musarañas cuya presencia es aprovechada por los agricultores para controlar las poblaciones de insectos nocivos en sus cosechas. También encontramos usos importantes en la medicina, en la investigación y desarrollo de sueros y vacunas, gracias a la cercanía genética que compartimos con ellos al ser el humano también un mamífero.

A lo largo de la historia, el hombre ha convivido con los mamíferos en una relación de mutualismo como relación interespecífica a través de la domesticación. Esto refiere a aquellos animales que viven bajo cuidado del hombre sin que éste requiera que se les sacrifique; es decir, que resultan de utilidad en convivencia con las personas. Es muy probable que la domesticación de los animales que en nuestros días conviven con nosotros haya sido por casualidad, habiendo la posibilidad de que el hombre primitivo, en lugar de sacrificar a la presa que pretendía cazar la haya capturado con vida y la haya llevado a su cueva o refugio. Pasado el tiempo, este animal pudiese haberse acostumbrado al cautiverio y aprendido a sobrevivir de él. Entre los mamíferos que se consideran pudieron haber sido los primeros en ser domesticados por el hombre se encuentra el perro (Rioja Lo Bianco, 1975).

Este animal ha servido al ser humano desde su época de caza en la edad de piedra, tal como se puede observar en algunas pinturas rupestres como la mostrada en la figura 1.2. Desde sus orígenes como descendiente de los lobos, el perro ha sido producto del hombre como un animal “artificial”. Podemos afirmar que la selección artificial de diferentes razas de cánidos al final de la última glaciación, entre las que destaca el lobo europeo, el lobo indio y también el chacal, fueron las que originaron las primeras razas de perros. Dadas sus características de fuerza, agilidad, velocidad y fiereza, el ser humano se ha servido de ellos para asegurar su supervivencia y protección, además de ser una herramienta de combate en algunas guerras de la antigüedad.



Fig. 1.2 El perro y el hombre del paleolítico. Tomada de: <https://www.revistacavecanem.com/vinculo-prehistorico-perro-humano/>

Esto se ve reflejado en el hecho de que el perro es por lejos uno de los animales con las razas más diferenciadas que existe, gracias a que le hemos dado una utilidad diferente a cada una. Un ejemplo son las razas de pastoreo que los europeos han domesticado para ayudarles a resguardar sus rebaños, como los *Viejo Pastor Inglés*, el *Pastor Alemán* o el famoso *Collie*, por mencionar algunos. Tenemos perros que fungen como cazadores en algunos poblados de Canadá (*Terranova*, *Golden Retriever*); perros de trabajo que se encuentran en las zonas más norteñas de Europa y en los picos más altos (*Husky Siberiano*, *San Bernardo*); lebreles para carreras (*Galgo* o el *Whippet*) y también de compañía (*Pug*, *Bichón maltés* o el *Yorkshire Terrier* el cual se muestra en la figura 1.3). Las mezclas entre razas también dan origen a perros mestizos que poseen las mejores características de sus padres y estos pueden alcanzar una mayor edad y mejor salud que los que tienen un *pedigrí* de pureza.

Ahora que conocemos el contexto de la importancia que los mamíferos tienen en la vida de las personas, no sólo como alimento o materia prima, sino como compañeros de trabajo y vida, cabe entrar en materia sobre el más popular y querido en todos los hogares humanos, tanto en zonas rurales como en urbanas.

El perro



Fig. 1.3 Perro mestizo

Tabla 1.1 Datos taxonómicos del perro

INFORMACIÓN TAXONÓMICA

Dominio: Eukarya

Reino: Animalia

Phylum: Chordata

Clase: Mammalia

Orden: Carnívora

Familia: Canidae

Género: *Canis lupus*

Especie: *Canis lupus familiaris*

El perro es un mamífero de la familia *canidae* que es descendiente del lobo; estas características taxonómicas se muestran en la Tabla 1.1. Estudios antropológicos y paleontológicos aseguran que las características del hombre y el lobo en la última glaciación eran similares: ambos tenían una estructura social compleja donde el número era importante, y ambos cazaban. El hombre antiguo pudo seguir a una jauría de lobos directo hacia una presa y la naturaleza carroñera de los lobos pudo haberlos acercado a las comunidades humanas.

Como todo mamífero, el perro posee cuatro extremidades de las cuales las torácicas se presentan pentadáctilas, y las pelvianas tetradáctilas. La morfología también es muy variable entre razas y zonas geográficas de las que son oriundas. Sus tamaños varían desde una altura hasta la cruz de entre 0.36m (como los *Yorkshire*) hasta razas enormes como los Gran Danés que llegan a medir hasta 0.90m; las masas corporales también varían respecto a su raza, pudiendo llegar a pesar las más pequeñas alrededor de 1Kg hasta las más grandes, llegando a pesar cerca de 80Kg. A pesar de estas diferencias, anatómicamente las razas de perros son similares: el esqueleto de los perros consta de aproximadamente 321 huesos con algunas variaciones por raza en la cantidad de vértebras caudales que se presentan en la cola y la presencia de un dedo vestigial en las extremidades posteriores. Poseen siete vértebras cervicales, 13 torácicas a las que se le unen 13 pares de costillas, 7 lumbares y tres sacras antes de entrar al apéndice caudal. La mayoría de los cachorros nacen con 28 dientes de leche que luego se sustituyen por 42 dientes permanentes al alcanzar el medio año. Su esperanza de vida oscila entre los doce y trece años, aunque se ha

documentado que los mestizos cuya genética ha sido más diversificada alcanzan los quince e incluso los veinte años (Microsoft Student©, 2009).

Desde el punto de vista de la etología, el comportamiento de los perros es similar a sus parientes salvajes; sin embargo, a diferencia de estos, el perro es capaz de ladrar y comienza esta característica de comunicación exclusiva a partir de las cuatro semanas de nacidos. Dependiendo de la frecuencia y el tono del ladrido de los perros, los veterinarios y los etólogos pueden definir el estado de ánimo en tanto si los perros sienten miedo, excitación, ansiedad o si tienen hambre. Otro de los comportamientos que podemos observar es el uso del lenguaje corporal tanto en el rostro, las orejas y la cola misma. Podemos ver que mucho de los estados de ánimo se encuentran en la forma en cómo mueven la cola, todo esto como un método de comunicación derivado de la domesticación. A diferencia de los cánidos salvajes que recurren a métodos químicos tales como la orina para delimitar su territorio, así como la comunicación con sus congéneres, el perro ha desarrollado incluso expresiones faciales parecidas a las del hombre de las cuales podemos determinar sus estados tanto emocionales como fisiológicos. Esto es sumamente importante para la práctica veterinaria dado que ayuda a los médicos a deducir malestares o enfermedades. En la terapéutica veterinaria, así como en la ortopedia y en la práctica médica en general, estos estados son más que útiles para conocer el estado anímico de los perros al ser tratados en revisiones de rutina, postoperatorios o en el uso de prótesis y la interacción con estos dispositivos además de la que mantienen con el entorno. Dada la estrecha relación que mantenemos con ellos es importante conocer estos aspectos para procurar su bienestar: un perro feliz es un perro sano.

Situación del perro en el mundo y en México

Según el sitio SrPerro.com, es posible hacer una estimación del indicativo socioeconómico de una nación por la cantidad de mascotas que poseen las familias. Existen estudios estadísticos mundiales sobre la cantidad de mascotas en todo el globo, así como cuales de éstas son las más populares entre las familias. En un estudio realizado en 2016 se mostró una gran distribución de mascotas en países altamente industrializados como Estados Unidos o el Reino Unido, aunque también en países en vías de desarrollo tales como México, Argentina o Brasil, de los cuales aproximadamente el 63% de las familias poseen un perro como mascota, el cual es el caso de México.

En los datos nacionales, gracias a una encuesta realizada en 2014 por el grupo Consulta Mitofsky, el 54.9% de las familias mexicanas tienen al menos una mascota como se muestra en el gráfico de la figura 1.4, esto sin importar el estrato socioeconómico que tiene, aunque también se hizo el estudio y los resultados que la encuesta arrojó en estos, no hubo una gran diferencia.

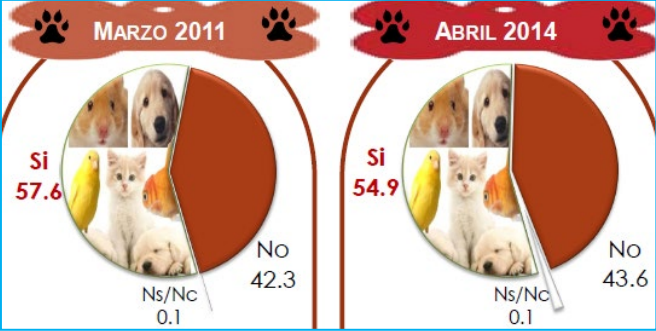


Fig. 1.4 Gráfico de presencia de mascotas en las familias de México en 2011 y 2014. Tomada de: Mitofsky (2014)

También en la distribución geográfica se ve la presencia diferenciada de las mascotas, siendo la zona centro la que mayor porcentaje presenta. De todo este porcentaje de familias que poseen mascotas en el país, la misma encuesta encontró que el 87% de las familias con al menos una mascota tiene perros, seguido de un 23% que posee gatos y un 14% tiene aves como se muestra en la figura 1.5; esto hace resaltar la importancia de atender a este sector poblacional como un miembro visible en las familias modernas (Mitofsky, 2014).

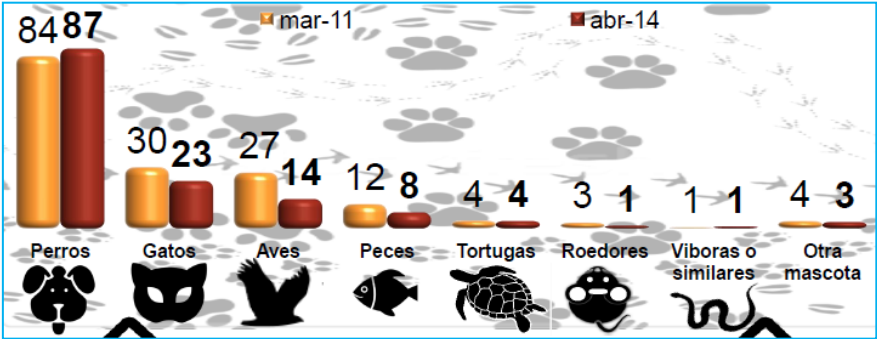


Fig. 1.5 Porcentajes de mascotas en las familias mexicanas en 2011 y 2014. Tomada de: Mitofsky (2014)

En una encuesta realizada por el INEGI en 2019 y referenciado en un informe del Senado de la República en su LXIV legislatura, se registraron alrededor de 18 millones de canes habitando en el país, de los cuales, sólo el 30% de éstos cuentan con un hogar donde son atendidos; esto hace que México sea el país que tiene en situación de abandono el mayor número de los perros; por lo que algunos legisladores como es el caso de Rocío Abreu, quien en los últimos años ha hecho iniciativas de ley para reformar el artículo 73 constitucional en su fracción XXIX-G

acerca de la preservación de las especies con el motivo de generar leyes que velen por la protección y dignidad de las mascotas (Senado de la Republica, 2019).

Es importante destacar que una de las principales causas de daño hacia los perros y las mascotas en general es el maltrato y abuso, animales que no pueden ser atendidos contraen enfermedades y mueren a causa del abandono; asimismo, el abandono puede darse a causa de un perro de edad avanzada, enfermo y con problemas motrices, y esto es un punto clave y una motivación específica para el desarrollo de métodos y herramientas capaces de ayudar a esta población desatendida.

Salud canina: amputaciones.

El aspecto motriz es sumamente importante para la medicina veterinaria y la salud general del perro. Una de las problemáticas más importantes es la salud ortopédica que tiene un auge importante en el estudio veterinario de la sanidad en las extremidades.

Siendo que estas pueden sufrir traumatismos superficiales en alguno momento por diversas causas, es importante considerar éstas que orillen al perro a sufrir alguna hemorragia, infección o algún carcinoma que termine en una desafortunada amputación en la figura 1.6.

La amputación, en términos médicos, es una extirpación de una parte del cuerpo que se encuentre dañada y cuyo daño comprometa la salud general del animal. Los procedimientos más comunes respecto a esta intervención quirúrgica es el corte de la zona afectada y la desarticulación de la región donde el daño se desarrolla. Es decir, se puede cortar de tajo la zona o ubicar la región de la extremidad y extirpar la parte que se encuentre bajo una articulación.



Fig. 1.6 Perro con amputación en extremidad trasera izquierda. Tomada de: <https://sterlingshelterclinic.org/myths-on-low-cost/amputations/>

Estas lesiones pueden causarse por un mal manejo de las extremidades delanteras, ya que no existe una conexión ósea entre el hombro y la columna en la anatomía canina, lo que puede llevar a una dislocación, ruptura de vasos sanguíneos provocando hemorragias internas e infecciones. Una fractura mal atendida puede degenerar en una infección interna e incluso una generalizada, así como gangrena que obligue al médico veterinario a realizar la amputación. Otra causa a mencionar es la OCD (Osteocondritis Desecante), la cual es una enfermedad que produce una inflamación del cartílago de la articulación del hombro y provoca una degeneración del líquido sinovial (líquido presente en el encapsulado de todas las articulaciones); todo esto produce una fricción mecánica que desgasta la pared ósea de la articulación liberando fragmentos de hueso al interior, los cuales crean un daño ortopédico además de mucho dolor al perro (Done & Evans, 2010).

Otra enfermedad común presente en las extremidades es el cáncer, manifestado por un crecimiento anormal de las células tanto musculares como óseas (osteosarcoma), presentado como tumores malignos que se presentan en regiones activas de la extremidad como el muslo, el codo o rodilla y los antebrazos, tal como se puede observar en una radiografía mostrada en la figura 1.7. Como es bien sabio, el cáncer (tanto en perros como en el ser humano) no tiene causas específicas; sino que dependen de muchos factores: genéticos, ambientales y hereditarios.



Fig. 1.7 Tumor óseo en el antebrazo del perro. Tomada de: <http://www.veterinarycancer.com/osteosarcoma>

Esta enfermedad aqueja en mayor número a los perros de razas grandes. Presenta síntomas como dolor intenso y presencia de metástasis pulmonar. El tratamiento es similar al que sufre el ser humano con la misma condición como radioterapias y quimioterapias, altamente agresivas y

disminuyen la calidad de vida de los perros, e incluso con éstos considerados por el veterinario, la amputación resulta la opción más requerida.

Un factor que es sumamente difícil de determinar es el de las malformaciones en los miembros torácicos. Estos se presentan por desórdenes genéticos durante la etapa embrionaria, aunque también se puede presentar debido a artritis o reumatismo, generando daños fisiológicos y ortopédicos a lo largo de la vida del perro, por lo que una recomendación para evitar estos problemas es la amputación.

Como se ha mencionado, de los problemas de salud canina (no siendo éstos los únicos existentes, sino los que comúnmente terminan en cirugía), algunas de las causas más comunes se muestran en la Tabla 1.2. Estos requieren para evitar un problema generalizado de la extirpación de la extremidad enferma del resto del cuerpo. Se dice comúnmente que cuando un perro pierde un miembro, éste puede vivir una vida normal con solo tres de sus extremidades. Sin embargo, en algunos casos, médicos veterinarios y responsables de perros no llegan a considerar el efecto tanto ortopédico, como el fisiológico e incluso el factor emocional de este tratamiento en el animal, el cual también puede afectar a los responsables del perro si estos tienen mucho apego con éste. (Kirpensteijn & Van den Bos, 2011).

Tabla 1.2 Causas que provocan la amputación de una extremidad en el perro. Fuente: Kirpensteijn, (2011)

Razones para realizar la amputación	Problemáticas derivadas
Tumores	Osteosarcoma
	Sarcoma en la cápsula sinovial
	Fibrosarcoma
Fracturas Irreparables	
Problemas relacionados a traumatismos	Avulsión del plexo braquial
	Osteomielitis
	Necrosis en la pata
Infección Postoperatoria	
Otras causas	Cojera recurrente
	Trombosis
	Infecciones generalizadas (gangrena)

Efectivamente, el perro puede llevar una vida normal con únicamente tres de extremidades, o incluso dos y ser tratado con una silla de ruedas que supla en ciertos aspectos el movimiento que sus miembros amputados le otorgaban. La problemática se presenta cuando el estado de cojera decae en problemas óseos en la extremidad de soporte al intentar caminar o trotar, provocando que su centro de gravedad, sobre la misma columna, cambie abruptamente causando daños en esta parte del cuerpo, parte sumamente delicada. En algunos casos puede haber objeciones de realizar la intervención quirúrgica debido a que, además de las complicaciones ortopédicas que presenta sobre todo en razas grandes, en tanto que el peso es un factor importante a considerar; e igualmente el factor emocional del perro, como se ha mencionado anteriormente. La medicina veterinaria moderna, tomando en consideración esto propone a los dueños como solución el implemento de prótesis mecánicas que suplan la o las extremidades perdidas.

Prótesis caninas: tipos y características.

Según se define en la medicina, una prótesis es un dispositivo que puede ser sujetado al cuerpo para proveer balance y soporte al mismo tras sufrir una pérdida o malformación de una extremidad, con el objetivo de preservar o restaurar (lo más cercano posible a la normalidad) el movimiento natural (Kern, 2014).

Estos dispositivos ayudan a mejorar la calidad de vida de sus usuarios impactando en la movilidad, la ortopedia e incluso en los aspectos emocionales que conlleva el recuperar la movilidad tras un accidente o enfermedad.

Es muy común en la actualidad encontrar avances constantes en el desarrollo de prótesis en humanos, tanto en el estudio de materiales más eficientes, mecanismos y también tratamientos de control robótico que utilizan bioseñales a través de sensores con el objetivo de que los pacientes sientan su prótesis como si fuese la extremidad que perdieron. Es importante decir, sin embargo, que a pesar de que estos desarrollos en humanos llevan varios años en la mira de la comunidad científica, médica o de las ingenierías, las prótesis para animales son un terreno muy reciente y con un desarrollo a cuenta gotas. Se han hecho avances desde el inicio de este siglo en el empleo de nuevas tecnologías y materiales para el diseño de éstas entre las que destacan nanofibras o incluso la impresión 3D como se muestra en la figura 1.8. Sin embargo,

cabe decir que este terreno sigue sin tener avances notables en la forma en que el animal se sienta cómodo o tenga un control adaptativo a sus necesidades ortopédicas y motrices.



Fig. 1.8 Prótesis en impresión 3D para un perro con extremidades deformadas. Tomada de: tripawds.com/10/21/pet-prosthetics

Es importante destacar, además, que en la medicina veterinaria existen algunas condiciones especiales para que un paciente sea considerado como candidato a un prótesis tras ser sometido a la amputación. Se contempla que para que un perro pueda ser candidato a una prótesis debe poseer alrededor del 30% o 40% restante de la extremidad delantera y un 50% de la trasera, lo que deja a los perros que no cumplen estas condiciones fuera de una prótesis (Fleming, 2015). Se debe hacer hincapié en que el miembro torácico soporta alrededor del 60% del peso del perro, así como son las extremidades que proveen dirección (Dyce, 2002), es la extremidad en la que se han desarrollado estas nuevas tecnologías y diseños. Los médicos veterinarios, para estos casos, han planteado dispositivos como sillas de ruedas, que es una de las soluciones actuales propuestas en la ortopedia veterinaria. En el mercado de las soluciones ortopédicas, cabe destacar las opciones existentes de cada prótesis, con sus características respectivas de operación e implementación en el can. Se encuentran dos grandes tipos: prótesis permanentes y prótesis removibles.

Prótesis Permanentes

Estas son de carácter quirúrgico, por lo que son muy costosas y pueden presentar un riesgo en la salud en los perros sobre todo en perros adultos de más de doce años, los cuales son un grupo de alto riesgo como lo sería un adulto mayor humano. Para éstas existe una pequeña subdivisión en la que se encuentran las prótesis permanentes internas y las externas.

Para el caso de las externas, la metodología que se usa en la ortopedia veterinaria es la denominada osteointegración, en la cual se inserta en el hueso vivo un apéndice mecánico, generalmente de un material clínico metálico como puede ser titanio y aluminio, que ayuda a

reemplazar la parte de la extremidad perdida y simular los movimientos naturales, tal como se muestra en la figura 1.9.



Fig. 1.9 Prótesis interna por osteointegración. Tomada de: <http://news.nationalgeographic.com/news/2009/07>

Otra de las metodologías en las prótesis permanentes es la implantación de dispositivos internos, los cuales son reemplazos mecánicos de articulaciones dañadas de manera interna. Tal es el caso de una prótesis de cadera o de la cabeza del fémur, en la mayoría de los casos en los que se recurre a esta alternativa (Figura 1.10).

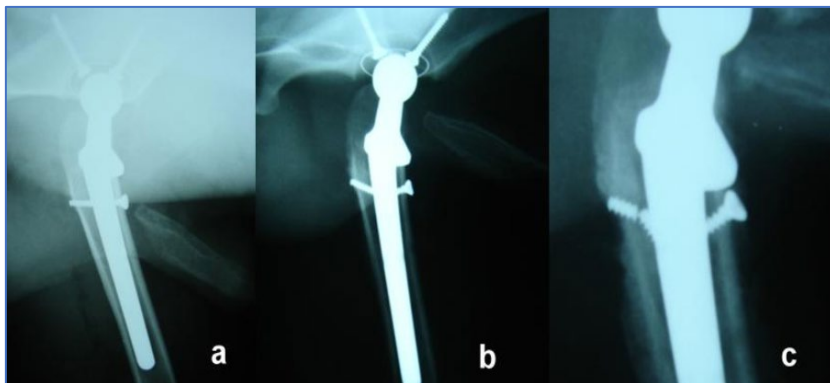


Fig. 1.10 Prótesis interna de cadera en perro. Tomado de: Arias et al., (2013) *Modified cementless total coxofemoral prosthesis: Development, implantation and evaluation*

Prótesis Removibles

Dentro del terreno de las prótesis removibles se encuentra una gran variedad de diseños, diferenciándose únicamente el propósito, es decir, si servirán para el miembro torácico o el pelviano. Estas, a diferencia de las anteriores, no requieren ningún tipo de intervención quirúrgica y presenta una gama de posibilidades para la generación de dispositivos por parte de particulares y organizaciones que buscan la salud y el bienestar de estos animales. Como se ha mencionado con anterioridad, el miembro torácico es la extremidad que proporciona la dirección y a su vez, la que soporta el peso del perro en mayor porcentaje, las prótesis removibles para

esta parte del cuerpo del perro presentan características constructivas tales que puedan reemplazar de manera parcial tanto la extremidad perdida como la movilidad de la misma, siendo en la mayoría de los casos rígidas y con movilidad un tanto limitada, como se muestra en la Figura 1.11.



Fig. 1.11 Prótesis mecánica comercial. Tomado de: <https://dogtime.com/trending/>

Estos son aditamentos mecánicos bastante simples y de fácil construcción, y son los más utilizados para aquellos perros que han sido intervenidos para amputación o incluso para la rehabilitación de sus miembros traseros (aunque también se encuentran estas sillas en uso comercial para los delanteros). Su diseño no ha sido realizado para reemplazar el miembro faltante, sino para compensar la funcionalidad de este. Tomando en consideración esto, dado que el diseño no es ergonómico en su totalidad con respecto al plano dorsal, el constante movimiento por zonas irregulares produce esfuerzos de tensión y compresión cíclicos en la zona lumbar, lo cual es peligroso para la salud del perro. Una representación de estas prótesis se muestra en la Figura 1.12.

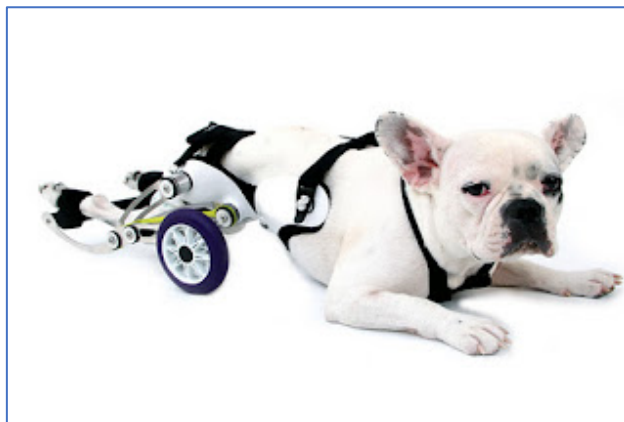


Fig. 1.12 Perro con silla de ruedas delantera. Tomado de: <https://www.ortocanis.com/blog/silla-de-ruedas>

Otro aspecto negativo a destacar es la dependencia total del perro a la atención del dueño, en la que una volcadura producida por la impetuosidad del perro al momento de correr o realizar sus actividades, requiere una rápida atención ante la eventualidad; esto provoca frustración en el animal e incluso, si el accidente es aparatoso, provocar heridas y fracturas.

Cada una de las prótesis revisadas presentan ventajas y desventajas, en mayor o menor medida, siendo la decisión del médico veterinario y los responsables del perro la que determina el tipo de prótesis que será utilizado de acuerdo con el daño y las posibilidades operativas y económicas de cada caso. Para las prótesis permanentes, una intervención quirúrgica es necesaria, esto conlleva costes elevados tanto de operación como de materiales y honorarios médicos. En cuanto a las prótesis removibles, estas son de costos más asequibles, siendo las sillas de ruedas los dispositivos más económicos en el mercado, encontrándose precios de hasta \$350 dólares. Sin embargo, en México las prótesis mecánicas para miembro torácico son escasas pues son pocas las organizaciones que realizan este tipo de prótesis, y aún a día de hoy, con costes de \$1,500 dólares, aproximadamente hasta \$30,000 pesos mexicanos (Bionic Pets, 2021); además, como se ha mencionado en puntos anteriores, limita la movilidad.

El propósito central de la investigación y desarrollo presentado en esta tesis se centra en la creación de un aditamento mecatrónico que, conjuntando elementos mecánicos con un control electrónico programable por medio de un sistema embebido, proporcione al perro dentro del grupo de riesgo que no contempla una prótesis mecánica la movilidad suficiente para elevar su calidad de vida; al mismo tiempo, el aspecto económico también se ha tomado en cuenta. También se ha implementado en el diseño la optimización de material (selección y estudio de diseño) con materiales económicos, junto con el sistema embebido de control, el cual es muy accesible e incluso de un tamaño reducido.

II. ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA CREACIÓN DE UNA PRÓTESIS ROBÓTICA INTELIGENTE

La construcción de una prótesis para aquellos perros que se encuentren en la triste situación de una pérdida sustancial de una de sus extremidades requiere para su desarrollo los aspectos teóricos de la generación del movimiento natural del animal. Este es un terreno de reciente investigación en el que se prima el estudio de todos los elementos que involucran la locomoción de los seres vivos en su entorno.

Los perros, como animales cuadrúpedos poseen elementos biológicos locomotores que los ayudan a desplazarse en su entorno para realizar sus actividades tales como la caza o el juego, una anatomía propia. En estos eventos intervienen la existencia de fuerzas mecánicas en su sistema musculo esquelético, además de esfuerzos propios generados por sus fibras musculares. Otro punto importante que considerar es el control sensorial en coordinación de sus extremidades para conducirse en su hábitat a través de impulsos eléctricos en todo su sistema nervioso central, la correlación puede observarse en la representación gráfica de la Figura 2.1. Cada uno de estos puntos se puede considerar como elementos dinámicos interactuando entre sí en el animal para propiciar la movilidad de todo ser vivo complejo, como los perros o los humanos.



Figura 2.1 Factores en que se involucra la movilidad animal

Todo movimiento posee patrones bajo un control neurofisiológico y la misma estructura de su sistema locomotor, por lo que es importante tomar en cuenta la sinergia de la estructura anatómica de la extremidad, esto con el objetivo de identificar la movilidad de la misma y poder generar un mecanismo que reproduzca dichos patrones. Con el término *sinergia* nos referimos a lo dicho por el fisiólogo ruso Nikolai A. Bernstein con la interacción del sistema musculoesquelético, la dinámica motriz y el control sensorial para que todo animal pueda moverse dada la relación simétrica que presentan todos los animales tetrápodos estudiada por el científico M. Hildebrand a principios de la segunda mitad del siglo pasado.

Con todo esto en mente se propone dividir los aspectos teóricos necesarios para el desarrollo de una prótesis que se sirva de estas características para cumplir de manera óptima todas sus funciones: el estudio de la estructura anatómica del miembro torácico; la mecánica relacionada con la extremidad de modo que sea posible formular un mecanismo capaz de reproducir un movimiento cercano al natural, así como las fuerzas internas involucradas y la selección de un material adecuado que además, sea sustentable; y la generación de un sistema de control inteligente. Se ha propuesto para este la implementación de un sistema embebido que controle un actuador eléctrico a través de un sistema de control por lógica difusa, una de las ramas de la inteligencia artificial, para interactuar tanto con el prótesis como con el sistema locomotor del perro y así reproducir el movimiento deseado.

Anatomía del perro: miembro torácico

En la práctica veterinaria existe una denominación para cada parte del cuerpo respecto a la geometría y su relación con los planos cartesianos, lo cual es apreciable en la figura 2.2; dado a la universalidad de esta nomenclatura, nos serviremos de ella para denominar los elementos de un prótesis. La comunión entre términos de ingeniería y veterinaria es importante para futuros desarrollos.

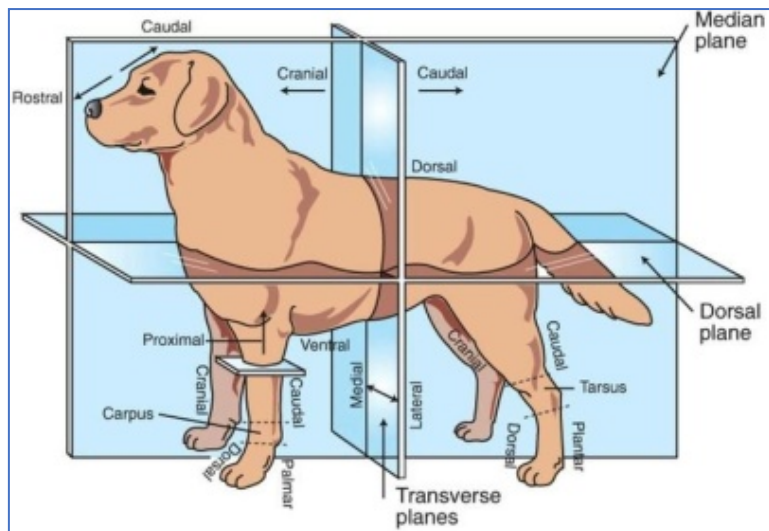


Figura 2.2 Planos anatómicos en el perro. Tomada de: veteriankey.com/principles-of-cell-biology/

Para el miembro torácico, se consideran los siguientes términos que serán utilizados a lo largo del texto en relación a la ubicación de cada elemento. La nomenclatura se basa en la aceptada desde 1968 Nomenclatura Anatómica Veterinaria:

- Dorsal: Cualquier entidad que se encuentre más cerca del dorso.
- Ventral: Cualquier entidad que se encuentre más cercana al vientre.
- Medial: Entidades cercanas al plano medio o dorsal.
- Distal: Cualquier entidad que se encuentre en dirección opuesta al plano medial.
- Proximal: Opuesto al distal, toda entidad que se encuentre en dirección hacia el plano medial.

El miembro torácico, como parte del conjunto que presenta el sistema locomotor en el perro, está dividido en cuatro regiones las cuales poseen huesos y músculos que proporcionan movimientos específicos que en sinergia otorgan el andar característico estos animales. Para una mejor comprensión se subdividirá a la vez estas regiones en sus componentes anatómicos: huesos, articulaciones y músculos.

Hombro

Es la parte proximal de la extremidad delantera y es la región de esta que conecta el tronco con el resto del brazo. Cabe destacar que el hombro del perro no está conectado por ningún hueso como lo es la clavícula en el ser humano, sino por una serie de tendones; por lo que es peligroso alzar a un perro por sus patas delanteras sin el cuidado necesario.

Escápula: Es el componente óseo del hombro. Es un hueso plano en forma similar a un triángulo que se ubica en la zona superior del brazo. Se caracteriza por unirse a la columna por medio de

músculos y tendones sin articulaciones. La Figura 2.3 muestra la forma general de hueso para todos los perros.



Figura 2.3 Escápula derecha del perro en vista medial. Tomada de: König (2001)

Articulación del hombro: En el extremo inferior de la escápula se encuentra una cavidad esférica que se articula con la cabeza convexa del hueso conocido como húmero (König, 2001). La movilidad que presenta esta en relación con el resto de la extremidad es limitada por las dimensiones de los músculos circundantes, las cuales solamente le permiten realizar movimientos alternativos con un solo grado de libertad, movimientos de flexión y extensión. La articulación se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2.4 Articulación del hombro en vista medial. Tomada de: König (2001)

En el caso particular del perro, los movimientos de péndulo se encuentran en un rango no mayor a los 120° en el plano, y la abducción del miembro (movimiento de acercamiento de una extremidad a un plano fijo del cuerpo) con una libertad de 60° .

Músculos del hombro: Todos estos músculos son generadores primarios de movimiento, cumpliendo distintas funciones. En el caso del perro en sus extremidades los músculos cumplen

la función de amortiguamiento de esfuerzos, así como el de apuntalamiento de secuencias de movimiento. Estos se muestran en la figura 2.5.

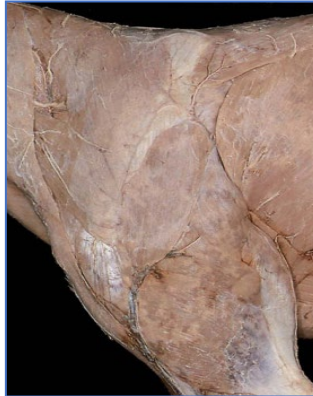


Figura 2.5 Músculos del hombro en vista lateral. Tomada de: König (2001)

Brazo

La siguiente sección es el brazo, el cual está compuesto por un único hueso largo fibroso el cual tiene la función de sostener el 60% del peso del perro.

Húmero: Hueso largo con dos extremos prominentes que sirven de conexión para dos articulaciones mostrado en la Figura 2.6. Es parte fundamental en el movimiento completo de las extremidades delanteras ya que, en conjunción con la escápula provee el movimiento de la mayor parte de la extremidad (acompañado de la mano en los cuadrúpedos).



Figura 2.6 Húmero del perro en vista medial. Tomada de: König (2001)

El extremo distal se presenta la articulación con el antebrazo en una conexión de tipo bisagra. A pesar de ser un elemento poco compuesto pues solamente presenta un hueso puro, es parte del sostén de toda la carga de masa repartida en las cuatro extremidades, en conjunción con el fémur en el miembro pelviano.

Articulación del codo: Esta articulación, si se quiere realizar una analogía mecánica, posee una articulación de tipo bisagra, por lo que la descripción de esa articulación se retomará con mayor detalle más adelante.

Músculos del brazo: Cabe destacar que muchos de los músculos que tienen acción directa en la extremidad delantera nacen en el hombro, y se incrustan en el húmero en la parte inferior. Músculos como el braquial poseen actividad extensora y flexora, de tal manera que pueda realizar un movimiento de bisagra en la articulación. Los músculos del brazo se muestran en la Figura 2.7.



Figura 2.7 Músculos en el antebrazo en vista lateral. Tomada de: König (2001)

Antebrazo

La sección penúltima del miembro torácico es la conductora de la articulación del codo, además de que es la sección que soporta las cargas estáticas referentes al centro de masa del perro.

Huesos del antebrazo (Radio y Ulna): El antebrazo se compone de dos elementos óseos parcialmente fusionados, como se aprecia en la Figura 2.8. El radio es un hueso largo con forma de bastón que, a diferencia de su contraparte trasera, es más grueso. El hueso cúbito, también conocido como ulna, complementa al radio en la formación ósea del antebrazo.



Figura 2.8 Radio y ulna en el perro en vista lateral. Tomada de: König (2001)

Articulación del codo: Esta articulación realiza un movimiento rotacional en el eje que presenta la “bisagra” de su geometría, movimiento mostrado en la Figura 2.9, y que al mismo tiempo restringe movimientos laterales de la misma articulación, tal es la naturaleza de dicha unión si es visualizada como su símil mecánico. En los perros, dicha articulación genera un ángulo natural, dependiendo de la raza, de entre 100° a 140° de apertura, es decir, que su apertura tomando en cuenta el eje de rotación normal al plano de movimiento en el que se encuentran tanto el húmero como el antebrazo, no excede los 30° (König, 2001).



Figura 2.9 Músculos y cartílagos en el codo del perro. Tomada de: König (2001)

La unión que existe entre el húmero y el antebrazo en la bisagra se da gracias a dos ligamentos fibrosos denominados colaterales cubitales medial y lateral.

Músculos en el antebrazo: Es importante mencionar que los músculos presentes en el área del antebrazo son en su mayoría extensores y sirven al perro como sostén pues su característica principal es la de tensionarse ante las cargas estáticas presentes. Los movimientos que se presentan en esta región son los de supinación y pronación. Estos músculos se muestran en la figura 2.10.



Figura 2.10 Músculos en el antebrazo del perro en vista medial. Tomada de: König (2001)

Mano

Está conformada por tres secciones: la sección del carpo, la más superior, constituida por siete elementos óseos dispuestos en filas alineadas. Unidas mediante ligamentos colaterales que nacen desde la parte inferior del antebrazo y se adhieren a estos huesos, formando la articulación de la muñeca. La distribución ósea de las manos o patas se muestra en Figura 2.11.



Figura 2.11 Huesos de la mano del perro. Tomada de: König (2001)

De manera importante cabe destacar el tipo de pisada que presentan las distintas razas de perro, ya que la forma en que está distribuido el peso en el área de pisada y la reacción del suelo es influida por esta característica (Fariña, Smith, & Nestler, 2016).

- Pie de Gato: posee una forma redondeada, los dedos están bastante juntos y presenta un adecuado arqueado de estos. Algunos perros con esta característica son el Terrier o el Dóberman.
- Pie de Liebre: Es alargado, con los dedos medios más largos, dedos bien juntos con un buen arqueado, presentando una forma ovalada. Un ejemplo puede ser el Galgo.
- Pie Abierto: Es una forma intermedia entre el pie de gato y el de liebre, donde los dedos son más cortos y están más bien separados. Un ejemplo puede ser el Husky Siberiano.
- Pie Plano: Es un tipo de defecto que se puede presentar en cualquiera de los tipos anteriores. No hay presencia de arqueado apoyando toda la superficie en el mismo suelo y no solamente sus almohadillas. Debe indicarse que esto es un defecto ortopédico, pero es importante al momento de realizar un estudio de reacción de suelo, que será detallado más adelante.

La representación pictórica de cada una de las formas de pisada que existen se muestra a continuación en la Figura 2.12.

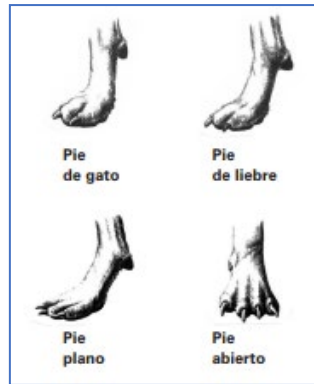


Figura 2.12 Tipos de pata o pie en las razas de perros. Tomada de: Fariña (2016)

Biomecánica del perro en su marcha.

Se conoce como biomecánica al estudio de las interacciones entre fuerzas, velocidades y aceleraciones en los organismos vivos. Toda entidad biológica compleja, especialmente los animales, está sujeta a las mismas leyes de la mecánica clásica que los cuerpos inanimados, con la salvedad de que estos son capaces de “producir” fuerzas propias con la que sus elementos locomotores (huesos, articulaciones, músculos) generen desplazamiento.

Si buscamos una analogía ingenieril, el sistema locomotor es una máquina.

Una definición que podemos tener sobre una máquina, y compararlo a la naturaleza del sistema locomotor biológico de los animales de órdenes más complejos (el caso de los mamíferos) es la siguiente: “es una combinación de cuerpos dispuestos de tal forma que producen un trabajo” (Avello, 2014). En nuestro caso los cuerpos serían los huesos y músculos que, en combinación producen un trabajo. En una descripción gráfica simple podemos designar una máquina como una caja negra en la que, al introducir un estímulo, dada su composición y construcción, nos arrojará una salida, un resultado controlado. La analogía con un bloque de control se puede ver en la Figura 2.13.

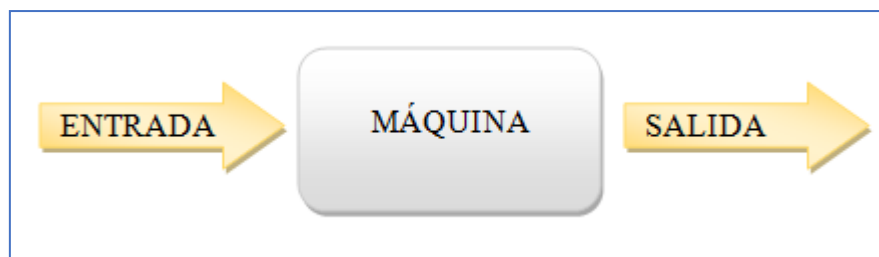


Figura 2.13 Diagrama de bloques de una máquina en lazo abierto

Como toda máquina está constituida de uno o varios mecanismos enlazados entre sí para producir el movimiento deseado. Un mecanismo es un dispositivo mecánico cuyo propósito es el de transmitir el movimiento y/o fuerza de una fuente a una salida (Erdman & Sandor, 1998). La definición cuadra con esta analogía, por lo que si buscamos el entendimiento de la movilidad de un perro en pos de construir una prótesis adecuada que comprenda sus movimientos (la marcha) es imperativo traducir el comportamiento mecánico de control biológico en términos técnicos útiles. La marcha en los animales se compone de movimientos repetitivos y simétricos (Hildebrand, 1965) entre cada una de las extremidades desplazándose a una secuencia claramente observable por métodos utilizados en el estudio veterinario. Una herramienta que estos profesionales usan es el análisis cinematográfico, con el cual es posible visualizar el comportamiento mecánico de la marcha a distintas velocidades, registrando posiciones de las extremidades en movimiento en relación con aquellas que están estáticas, tocando el suelo. Existen de igual manera una serie de movimientos no simétricos, también llamados asimétricos o no secuenciales que carecen de interés para el estudio ya que su complejidad abarcaría un estudio más detallado que este está fuera de los intereses primarios de la investigación. A continuación, se muestra un ejemplo de este análisis en la Figura 2.14, realizado por el autor de este trabajo de tesis con una perra mestiza de ocho años de edad a una velocidad de grabación aproximada de 50fps.



Figura 2.14 Estudio cinematográfico del caminar de un perro

En el breve estudio se mantuvo a la perra en un paso constante y a una velocidad reducida, por lo que se puede decir que su movimiento fue simétrico. Dada la naturaleza de este movimiento, es posible generar un modelo predictivo de comportamiento.

El miembro torácico tiene una forma específica en el tiempo de presentar los eventos de desplazamiento, esta forma se divide en dos fases: la fase de freno o aplomo, y la fase de péndulo o de movimiento (Gillette & Angle, 2012). La descripción de estos será secuencial, es decir, como se genera el movimiento desde el aplomo en un ciclo hasta el desplazamiento.

En la fase inicial se tiene el pie completamente en el suelo. En esta fase se deben considerar como fuerzas presentes el peso del perro y la reacción del suelo. El animal debe vencer estas fuerzas estáticas para comenzar a generar el desplazamiento. Para arrancar, los músculos del hombro (deltoides, tríceps) inician la propulsión del miembro hacia atrás, rompiendo las fuerzas estáticas. La segunda fase es la de movimiento que a su vez se subdivide en tres partes: la primera es un balanceo hacia atrás donde los músculos de función elevadora que implementan un esfuerzo mecánico para generar dicho balanceo, al mismo tiempo que se propicia una flexión en el codo gracias a una reacción de los músculos circundantes. La segunda fase es el movimiento circular hacia adelante donde el codo presenta una extensión de tal manera que el pie avance hasta tocar el suelo; toda esta serie de eventos termina con la última fase, que es la equivalente a la primera parte del estado de aplomo. Los eventos mencionados se pueden apreciar de manera gráfica en la Figura 2.15.

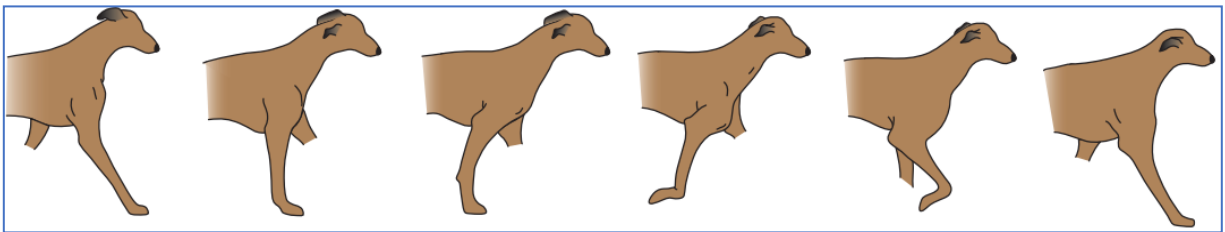


Figura 2.15 Secuencia de movimiento individual del miembro torácico derecho. Tomada de: Carr (2016)

Estos eventos son la base de una serie de desplazamientos que conllevan velocidades entre los elementos de las extremidades, tanto delanteras como traseras y forman parte de los desplazamientos que se buscan modelar.

Cinemática de la marcha canina

En la biomecánica el estudio de la biocinemática, al igual que en la ingeniería mecánica, contempla los eventos móviles sin tener en cuenta las fuerzas que los producen. Esto se ve reflejado en el análisis utilizado para conocer las características del movimiento en los animales cuadrúpedos.

Para Hildebrand, la característica simétrica en la marcha de los cuadrúpedos podía ser numérica y gráficamente utilizada para entender cómo es que estos animales se mueven. A través del antes citado análisis cinematográfico, el fisiólogo determinó los patrones en los que las posiciones de las extremidades mostraban una secuencia repetitiva en el tiempo. A pesar de que el estudio se concentró en caballos, se puede ocupar para cualquier cuadrúpedo. En algunos textos sobre

ortopedia veterinaria (Bhatti & Waqas, 2017) se contemplan la caminata, el paso vivo, el trote y el galope como eventos simétricos.

Caminata: Es el movimiento con menor velocidad y el más común de observar. Se caracteriza por tener únicamente un miembro en el aire en cada evento, siendo los tres restantes el sostén del cuerpo. Si se comparan las cuatro extremidades en movimiento en una gráfica de posición en el suelo con respecto al tiempo se observa que el desplazamiento es en forma diagonal, tal y como se puede observar en la secuencia mostrada en la Figura 2.16.

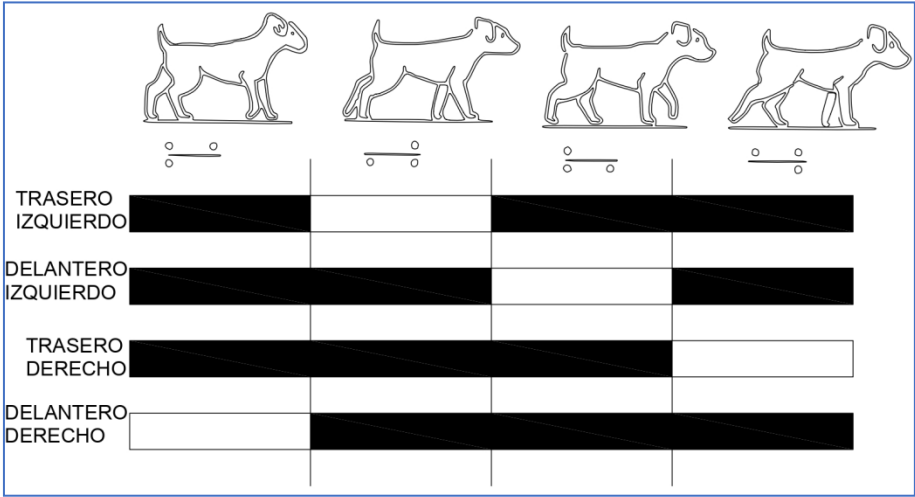


Figura 2.16 Esquema cinemático de la caminata

Paso vivo: Se puede definir como una caminata un poco más rápida, por lo que el análisis es similar al de esta, sólo que con una consideración de tiempo del evento más pequeño. Es exclusivo de las razas grandes por lo que se puede considerar como movimiento anormal si de una generalización de razas se trata (Carr & Dycus, 2016). Este se caracteriza por tener dos pies en el suelo y dos al aire, como se muestra en la Figura 2.17. Aunque en lapsos muy cortos de tiempo, por lo que no es considerable este evento en un análisis cinematográfico. Se considera un evento intermedio entre la caminata y el trote.

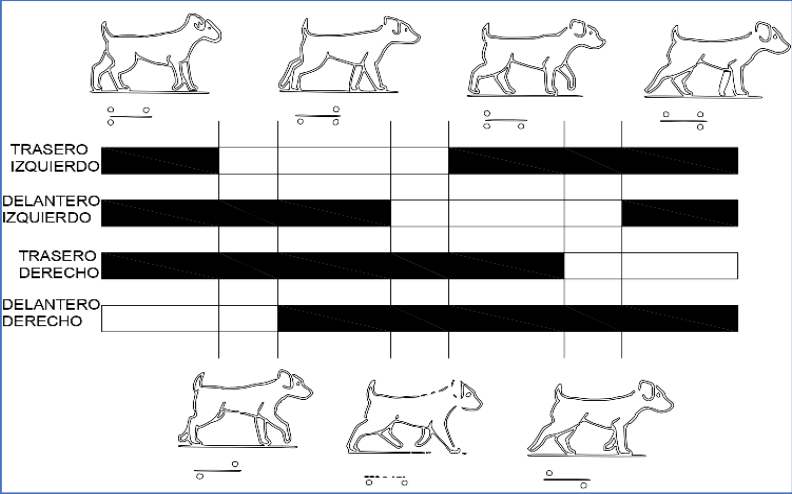


Figura 2.17 Esquema cinemático del paso vivo

Trote: En este movimiento, el contacto con el suelo es ejercido por dos de las cuatro patas. Sin embargo, a diferencia de los dos anteriores, la secuencia gráfica es lineal, además de que en un instante, el cuerpo está completamente en el aire, un instante muy breve. Esto se observa en la Figura 2.18. Es sumamente estable a velocidades controladas por el mismo perro donde la aceleración del centro de masa es cero. Los eventos relacionados con el centro de masa serán tratados en la sección de biocinética.

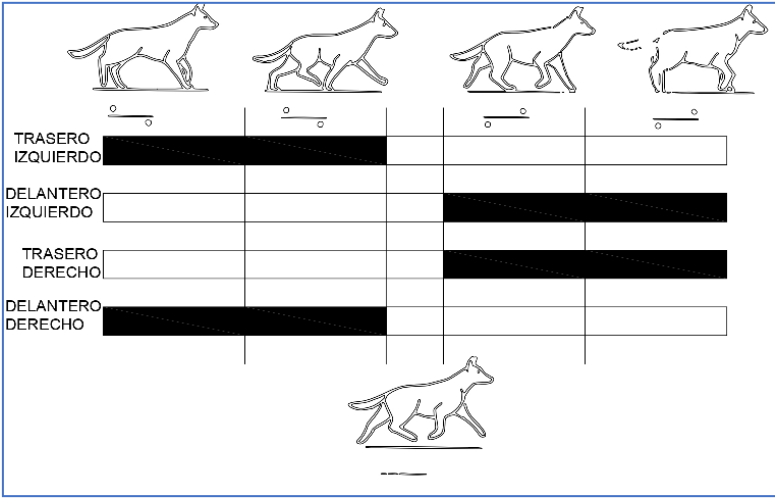


Figura 2.18 Esquema cinemático del trote

Galope: En algunos textos (Gillette & Angle, 2012) no es considerado un movimiento simétrico dado que no presenta un patrón determinado en el análisis gráfico. Es un paso de cuatro tiempos, en el que un pie está en el suelo en cada evento contrario al de la caminata; sin embargo, la secuencia no corresponde con las formas anteriores y esto provoca que las cargas sean repartidas

de forma irregular, lo que provoca un ligero arqueo en la columna, generando la potencia necesaria para mantener la velocidad. Este comportamiento se presenta en la Figura 2.19.

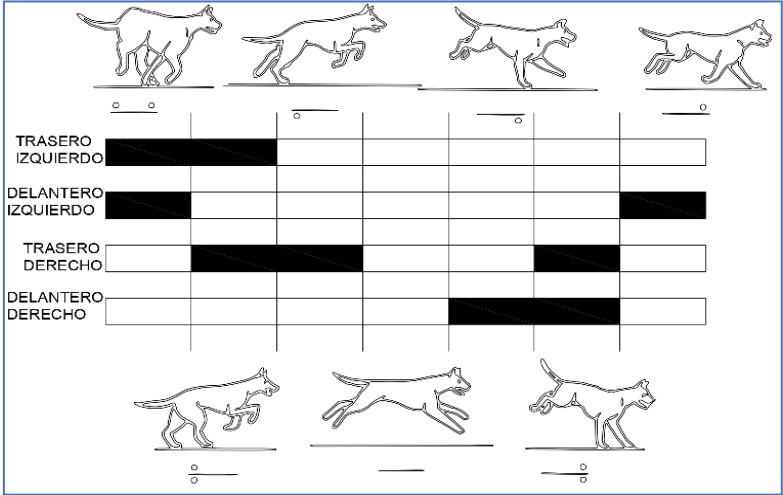


Figura 2.19 Esquema cinemático del galope

Como es observable, el galope no presenta un comportamiento lineal predictivo, como en el caso del paseo en el que se nota el escalonamiento y en el trote el cambio lineal, sino que es un comportamiento cíclico o circular. Este movimiento es menos estable por lo que no será objeto de estudio en el presente proyecto.

Cada una de las líneas verticales que delimita las secciones de contacto de cada pie con el suelo, representa la porción en segundos de un ciclo completo de marcha; se puede considerar una pata como punto de partida para contabilizar el tiempo en que cada extremidad toca el suelo. El tiempo de contacto. En un estudio de movimiento utilizando a un sujeto de prueba es posible considerar la marcha completa en un tiempo determinado por la grabación (Mcomp) y cada uno de los eventos, la cantidad de segundos que dura (Ev). Esto es lo que Hildebrand apunta como la relación de zancada (Z), de un miembro que se atrasa con respecto a la pisada del siguiente tomando en cuenta el inicio del conteo del tiempo.

Esto es expresado es una fórmula conocida como la *fórmula de andadura*, que se muestra en la Ecuación 2.1.

$$Z = \frac{Ev}{Mcomp} \times 100$$

Ecuación 2.1 Ecuación de la zancada

La teoría de Hildebrand trata cada extremidad de manera independiente. Cada lapso de actividad en un evento completo del ciclo corresponde a la actividad de cada una de las extremidades y estas poseen características propias de longitud y forma. Es por ello por lo que perros cuya raza

tiene extremidades más pequeñas, como en el caso del *Bulldog* inglés, son mucho más lentos en la respuesta de su movilidad que, por ejemplo, un *Doberman*. Sin embargo, los estadios descritos anteriormente son aplicables para todos ellos, con la salvedad de las velocidades y aceleraciones que cada una de las razas imprime al desplazarse. Para esto los biólogos y fisiólogos veterinarios se han servido de una herramienta matemática que les ha ayudado a comprender el desplazamiento sin importar el tamaño de las extremidades, introduciendo el número de Froude al estudio de la cinemática y cinética de los animales cuadrúpedos.

Derivado de los estudios en mecánica de fluidos, originalmente el número de Froude es usado para conocer el comportamiento mecánico de un objeto sólido a través de un fluido. Este derivado del concepto de similaridad, en dónde dos cuerpos con movimientos aparentemente similares tenderán a un comportamiento dinámico “similar” sin importar diferencias de tamaño (Alexander, 1989). Se define este factor adimensional como un factor normalizador de la velocidad de un cuerpo móvil respecto a otro de distintas dimensiones respecto a las fuerzas inerciales provocadas por la aceleración de la gravedad (Biewener & Lyman, 2003). La formulación matemática referente a la relación de estos conceptos se muestra en la ecuación 2.2.

$$Fr = \left(\frac{v}{gl} \right)^{1/2}$$

Ec. 2.2 Fórmula para el factor de Froude

Donde:

Fr: es el factor de Froude, adimensional.

v: es la velocidad de un punto de la extremidad

g: constante de la gravedad (9.81 m/s²)

l: longitud característica del punto en la extremidad considerada respecto a un marco de referencia.

Estos parámetros definen la velocidad en relación con la longitud de las extremidades. Es por ello por lo que, en el estudio cinematográfico, es importante hacer una distinción en las regiones y alturas donde los desplazamientos y centros de masa se encuentran, y están en constante cambio. La Figura 2.20 se muestra la distinción de alturas en las que se considera los parámetros de longitudes en que puede utilizarse el número de Froude, la cual determinaría la velocidad de las extremidades.

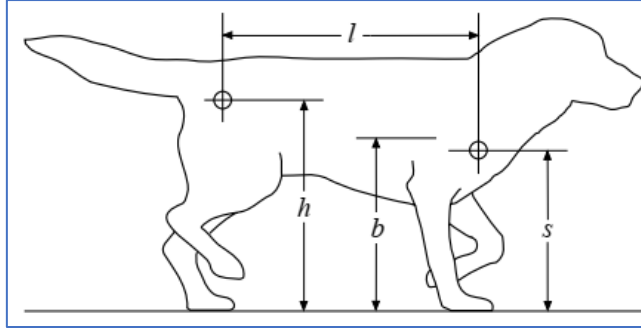


Figura 2.20 Dimensiones de las articulaciones cercanas al tronco del perro, Tomada de: Lee (1999)

Donde las dimensiones críticas son la distancia entre los cinturones pelviano y torácico (l), el centro geométrico del perro respecto al plano medio (b), la altura desde el suelo hasta la cadera (h) y la altura desde el suelo hasta el hombro (s). Estas alturas serán de utilidad en el estudio de la dinámica del movimiento canino. Las extremidades se pueden considerar como elementos móviles a una longitud dada de un punto referencial, los movimientos a través del espacio tienden a generar. Siendo cuerpos inerciales es de considerar su geometría en el espacio; en la Figura 2.21 se pone de manifiesto la forma en la que la velocidad afectará cualquier punto de la extremidad.

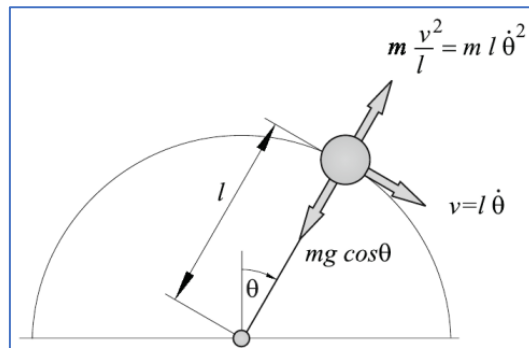


Figura 2.21 Diagrama de partícula en función de la ecuación de Froude. Tomada de: Biewener (2003)

En la figura 2.21 se puede apreciar la relación cinemática respecto a un punto de masa m a una distancia l de un punto de apoyo. Este parámetro posee una mayor aplicabilidad bajo conceptos de la cinética, la cual se estudiará a continuación; sin embargo, es menester comprender que el punto principal de la determinación y conocimiento del factor de Froude es la interacción de la velocidad frente a diferentes diseños biomecánicos, lo cual es el punto de interés de la cinemática. Dada la definición de velocidad lineal respecto a una variación angular, se puede verificar que, para cada velocidad tangencial en cada punto de un evento concreto, la inclusión

de velocidades y aceleraciones angulares para el estudio del modelo mecánico es de suma utilidad en el análisis de cuerpo rígido de toda la extremidad.

En estudios previos de la cinemática de la andadura de los perros (Jays & Alexander, 1978), han asignado algunos cálculos empíricos de número de Froude 0.1 a 0.3 para caminata, 0.3 a 4 el régimen de trote, y para coeficientes más elevados para el galope. Con estos datos empíricos, y considerando que las proporciones son consideradas por la teoría para cualquier dimensión, por lo que es una fuente de información para el estudio de un mecanismo.

Dinámica de la marcha canina

En la biomecánica, la biocinética, al igual que en ingeniería mecánica, se encarga de estudiar y analizar las fuerzas que intervienen en el movimiento de los seres vivos.

Estos son tejidos proteínicos constituidos por dos elementos: miosina y actina (formando un conjunto llamado sarcómero). Estas proteínas forman conjuntos de tejidos en forma de tubos, los cuales son las fibras musculares. Toda la acción mecánica que puede generar el sistema locomotor proviene de la contracción y extensión de las fibras musculares, que pueden entenderse como una suerte de resortes como se puede observar en la Figura 2.22 (a), donde la interacción de estos dos elementos, a través de la interacción electroquímica (Murray & Granner, 2003) desde el sistema nervioso central, operadas por las neuronas motoras, y la capa electrolítica que cubre las fibras musculares. Esto es producto de la actividad sensorial y el control neuronal que ejerce el cerebro en los entes vivos complejos. Dicha estructura se muestra en la Figura 2.22 (b).

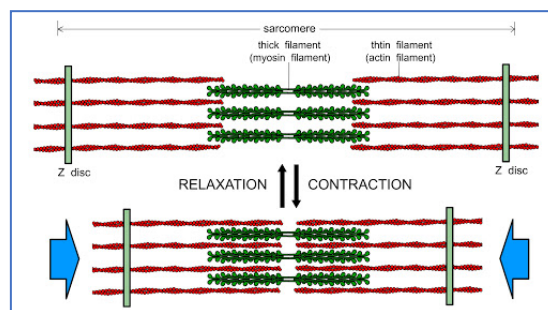


Figura 2.22 a) Acción de la actina y la miosina. Tomado de: <http://www.facmed.unam.mx/Libro-NeuroFisio/10-Sistema%20Motor/10a-Movimiento/Textos/MuscAnatomia.html>



Figura 2.22 b) Acción neuromotora de los músculos. Tomada de: Klein (2013)

Este es el principio de generación de potencia muscular. Sin embargo, el conjunto del mecanismo locomotor es mucho más complejo en su estudio. Considerar únicamente el miembro torácico en un análisis biocinético es una irresponsabilidad, por lo que para entender cómo es que se genera el desplazamiento y las fuerzas involucradas se tomará el cuerpo entero como base.

Se ha mencionado que los cuartos traseros en el perro son aquellos que generan la potencia motora, esto se puede ver en un análisis de cuerpo libre de los músculos propulsores y cómo estos afectan el centro de masa.

Podemos entender un sistema músculo-hueso como un sistema mecánico en el que existe un elemento fijo, una fuerza y un cuerpo que siente dicha fuerza. Para generar un movimiento rotacional en torno a un eje, en este caso el eje cruzará el plano de acción perpendicular desde la articulación, la resultante de fuerzas tanto de la que provoca el movimiento como de la masa por mover, debe cruzar dicho punto pivote. Toda la biocinética depende de esta interacción. Es por ello que podemos ocupar un diagrama de cuerpo libre en donde se manifiestan estas fuerzas sobre el elemento conducido.

Las características fisiológicas sobre la composición de los músculos son de relevancia en la medicina veterinaria; sin embargo, en lo relativo a un modelo ingenieril no es necesario. La complejidad del tema no será tratada por motivos prácticos. Un modelo gráfico de este sistema se puede observar en la figura 2.23 donde se marcan las fuerzas con vectores en flechas.

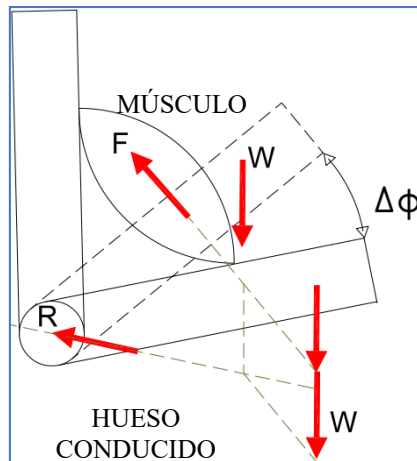


Figura 2.23 Acción cinética del sistema músculo-hueso. Tomada de: Getty (2005)

Gracias a este modelo se puede explicar cómo la acción muscular genera momentos a lo largo de los componentes estructurales y los balances generados. Siendo que existe en él una fuerza F ejercida por la contracción del músculo, una fuerza mayor al peso del elemento conducido W y un desplazamiento angular $\Delta\Phi$, esta sobreentendido que existe un trabajo ejercido sobre el hueso conducido, el cual originalmente se encuentra en reposo. Sin embargo, el trabajo de los músculos circundantes a articulaciones no sólo tiene que movilizar los huesos que forman el par cinemático, sino también contrarrestar el peso entero del perro para poder movilizarlo.

La determinación de la ubicación del centro de masa del perro es realizable empíricamente mediante una metodología muy sencilla: ésta consiste en ubicar al animal en una plataforma en donde un instrumento medidor de peso es colocado en un extremo y un pivote en el otro, formando una balanza. Se ubica al perro a una distancia determinada de la plataforma y se observa la cantidad medida por el instrumento. Este estudio empírico mencionado en los textos sobre biomecánica veterinaria (Getty, 2005) demuestra que el mayor porcentaje del peso sostenido en los animales tetrápodos o cuadrúpedos, es sostenido por los miembros delanteros, tesis que se ha venido repitiendo a lo largo de este escrito. La comprobación dinámica de este hecho recae en un análisis de posiciones respecto al centro de masa del perro, así como las fuerzas que actúan para conseguir un equilibrio en el animal al momento de desplazarse. A través de estas distribuciones espaciales se puede entender cómo afectan las fuerzas musculares sobre la estructura ósea y se consigue un desplazamiento, las cuales son observables en la figura 2.24.

La potencia ejercida por los cuartos traseros se ve conducida en dirección por los miembros anteriores que sirven de palanca. Las fuerzas de reacción de los músculos circundantes a la

articulación del hombro ante el impulso vertical generado por las patas traseras actúan de manera similar a los anteriores por lo que el análisis de los segundos servirá también para los primeros, siempre y cuando se considere las fuerzas estabilizadoras que serán revisadas en la sección destinada a la biostática.

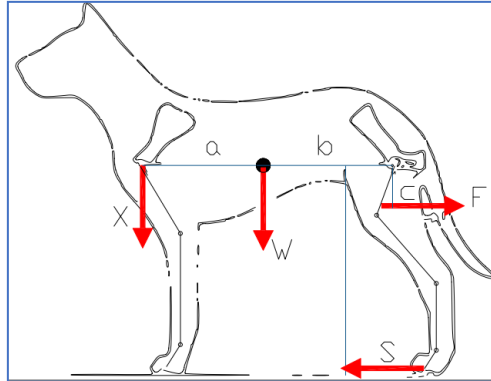


Figura 2.24 Fuerzas que se involucran en el movimiento del perro. Tomada de: Getty (2005)

De acuerdo con la figura, la distancia a es la determinada entre el centro de masa de la escápula X y el del centro total del cuerpo; asimismo, la distancia b es la determinada entre la de pelvis, cuya acción sufre la tracción F de los músculos como el cuádriceps o los glúteos para contrarrestar el efecto de fricción S causado por el suelo contra los pies del animal; esto para salvaguardar el equilibrio del cuerpo aun estando en movimiento.

De este modo, la relación de posiciones entre los cinturones pelvianos y torácicos respecto al centro de masa define el estado de aceleración sin desestabilizar al animal; el arranque o fuerza impulsora puede estar definido para los miembros torácicos por la ecuación 2.3, mostrada a continuación.

$$F = W \left(\frac{b}{a + b} \right) - \left(\frac{S * h}{a + b} \right)$$

Ec. 2.3 Formulación de fuerza impulsora para el miembro torácico

Donde:

F.- Fuerza impulsora dinámica del músculo

a.- Distancia del cinturón torácico al centro de masa

b.- Distancia del cinturón pelviano al centro de masa

S.- Fuerza propulsora, resultado de los momentos producidos en las extremidades.

F.- Fuerza impulsora del mecanismo motor (músculos motores como pueden ser el bíceps o el omotransverso en los torácicos o los cuádriceps en los pelvianos)

Los eventos cinéticos están estrechamente relacionados con los eventos estáticos, ya que ambos en el cuerpo del perro priman la estabilidad del sistema locomotor

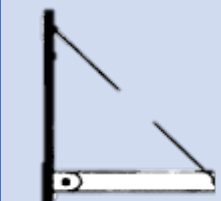


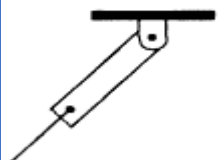
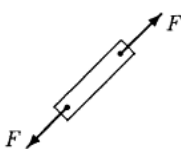

Estática en la marcha canina




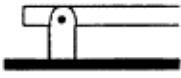
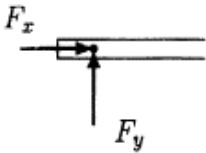




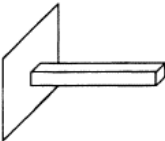
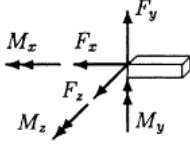
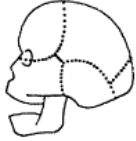
En la biomecánica, al igual que en la mecánica aplicada, la estática tiene por función comprender las fuerzas bajo las que están sometidas los cuerpos en equilibrio. De este modo, podemos decir que existen muchas fuerzas que actúan al mismo tiempo en el momento en que el perro se encuentra en reposo o con una velocidad constante. Como se ha visto en la sección anterior, las principales fuerzas que intervienen en la estructura motriz de un animal cuadrúpedo son su peso y la reacción del suelo, estas influyen de manera directa en la composición de su estructura y está estrechamente relacionada con el tamaño y el balance del animal.

Recuperando lo dicho anteriormente sobre el sistema músculo-hueso, recordamos que esta estructura se compone de tres elementos: la bancada, el impulsor y el impulsado. El músculo es aquel que proporciona la fuerza para realizar movimientos, sin embargo, tanto para el hueso que funge como bancada o sujeción fija, y aquel que es movido, sufren de manera diferente las reacciones dada su forma y sus características propias.

Tal como en los sistemas mecánicos, los sistemas biológicos en movimiento están sometidos a fuerzas internas y externas que los mantienen en equilibrio. Los sistemas articulados presentan las similitudes más grandes con elementos mecánicos como, por ejemplo, un sistema de bisagra. Las similitudes entre sistemas se muestran como ejemplos en la tabla debajo.

Tabla 2.1 Comparación de sistemas de fuerzas entre elementos mecánicos y elementos biomecánicos. Tomada de: Özkaya (2017)

Tipo de Soporte o Junta	Representación Mecánica	Diagrama de Cuerpo Libre	Representación Biológica	Incógnitas
Miembros Flexibles				Tensión producida por el músculo
Sistemas sometidos por dos fuerzas				Fuerza en el músculo (aislado)

Sistemas de soporte simple y de rodillo				Magnitud de la fuerza en el soporte
Sistemas articulados por juntas				Esfuerzos sobre la articulación
Sistema rotulado				Magnitud de las fuerzas sometidas sobre la articulación
Empotramientos o sistemas fijos				Magnitud de las fuerzas sometidas sobre la articulación

Todas las fuerzas están presentadas como reacciones derivadas de fuerzas bajo las que las articulaciones y soportes están soportados en cada elemento articulado del cuerpo de cualquier vertebrado. Esto incluye las extremidades, pues poseen gran cantidad de articulaciones.

En el caso del miembro torácico, se presenta una actividad más dedicada al sostén del cuerpo por parte de los músculos del antebrazo que a la de potencia, por parte de los músculos en el cinturón torácico; esta tarea es realizada por los miembros pelvianos, de ahí la importancia de la consideración de ambos extremos para mantener un panorama completo.

En la sección anterior, dedicada a la dinámica, quedó de manifiesto que las fuerzas en las extremidades se presentan siempre en pares, obedeciendo con esto a la tercera ley de Newton: pares de fuerzas opuestas que generan momentos angulares. A continuación, se presenta un modelo similar al que presenta el sistema compuesto por los metatarsos, el radio junto con la ulna y los músculos flexores en las extremidades anteriores. Este modelo parte de la misma teoría explicada en la sección dinámica, el cual es mostrado en la figura 2.25.

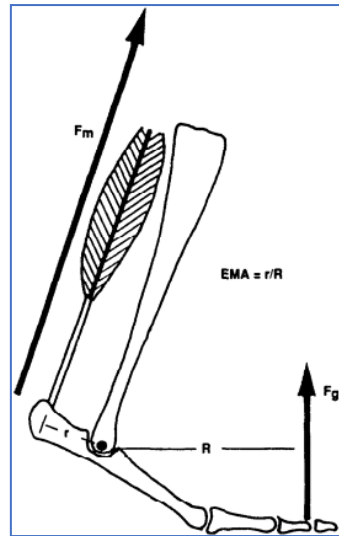


Fig. 2.25 Fuerzas de reacción presentes en el sistema tarso-radio-flexor. Tomada de: Getty (2005)

En la imagen es observable el par de acoples presentes en el caso ideal de la mano y el antebrazo en un perro. La fuerza F_m en dirección normal al vector de posición r representa el acople formado por el musculo, el cual está conectado al hueso del antebrazo (en este caso suponemos que es el radio) y que antagoniza la reacción del suelo F_g con un vector de posición hacia el mismo punto de acción R . En el modelo se prevé un comportamiento estático, es decir, donde la suma de fuerzas y momentos generados sobre la articulación, la cual se representa como el punto común del cual parten estos vectores de posición. Se sabe que en las condiciones de equilibrio la sumatoria de momentos es igual a cero $\sum M_i = 0$. Siguiendo la regla de la mano derecha para conocer las direcciones de estos acoples, se define entonces la ecuación 2.4.

$$\sum M_{SIST} = (+F_g * R) + (-F_m * r) = 0$$

Ec. 2.4 Ecuación de sumatoria de momentos

Según las leyes de la estática, las conocidas como leyes del equilibrio mecánico, la sumatoria de todas las fuerzas aplicadas a una partícula o un cuerpo rígido es igual a cero. Para que el cuerpo del perro se mantenga en equilibrio al momento del aplomo o el avance. Para un viaje horizontal con una velocidad conocida en un delimitado tiempo de acción, se puede conocer la dirección en la que la reacción de suelo actúa sobre las extremidades a través de la técnica de la plataforma de fuerzas, utilizada en gran parte de los estudios de la biomecánica del perro (Jays & Alexander, 1978). En la figura 2.26 se puede observar un diagrama de cuerpo libre en el que la reacción del suelo actúa en el miembro pelviano, utilizando éste como ejemplo, en el estado propulsivo de la reacción del suelo y la dirección que esta toma.

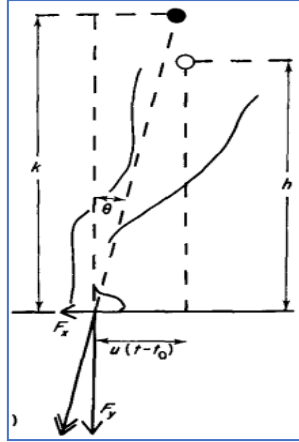


Fig. 2.26 Reacción del suelo en propulsión en miembro pelviano. Tomada de: Jayes & Alexander (1978)

Para determinar las reacciones que se involucran en las extremidades, se puede considerar estas como columnas sólidas dimensionalmente aproximadas a la composición estructural, ya sea para las extremidades anteriores o posteriores. Considerando la sección transversal de dicha columna y las cargas a las que está sometida, se puede verificar la importancia de considerar las articulaciones en un mecanismo para realizar un dispositivo de prótesis.

Sobre la estructura músculo-hueso. Como se ha dicho, el sistema está compuesto por tres elementos: el hueso bastidor o sostén fijo, el músculo o inductor de movimiento y el hueso inducido. Desde el punto de vista de la biostática el hueso bastidor es muy importante; se posiciona entonces un hueso en el plano y un músculo sujeto a él que ejerce una fuerza F con sus respectivas componentes en el plano xy . Una reacción normal N correspondiente a la componente en el eje de las ordenadas de la fuerza F y que juntos, ejercen un esfuerzo sobre el área transversal del hueso, fuerzas cortantes y momentos de flexión, los cuales pueden ser visualizados en la figura 2.27, aplicados si se toma un segundo plano XX' en el que se presenta la sección transversal.

En el hueso se manifiestan un esfuerzo de tracción sobre la sección transversal, la cual se presenta como una carga axial en respuesta a la fuerza del músculo, la cual se puede determinar con la fórmula: $\sigma = N/a [=] kg/cm^2$. Asimismo, se presenta una fuerza cortante derivada de la componente en el eje de las abscisas sobre la sección en el plano XX' , la cual se puede determinar con la fórmula: $\tau = H/a [=] kg/cm^2$. Y ambas fuerzas recrean un momento flexionante debido al acoplo derivado por estos, generado esfuerzos combinados que producen deformaciones en el hueso, desplazamientos internos de la estructura que son de sumo interés

en el diseño de elementos prostéticos tales como los de osteointegración. Estos desplazamientos se presentan invariantes en el tiempo, únicamente como variables de la cantidad de esfuerzos axiales a los que se sometan; por lo que un análisis simple de esfuerzo-deformación arroja la información suficiente para un sistema no dinámico, de utilidad por su simpleza, sin embargo, el comportamiento de los materiales biológicos obedece otras leyes mecánicas son registradas en documentación especializada (Blatz, Mae Chu, & Wayland, 1969).

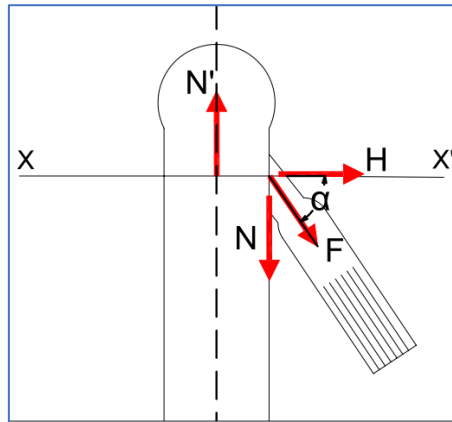


Fig. 2.27 Esquema de fuerzas sobre un hueso. Tomada de: Getty (2005)

En el siguiente ejemplo, utilizando las extremidades posteriores tanto como una columna sólida y la sección transversal circular de 4cm de diámetro y una carga de $W=100$ kgf.

La carga posee una componente dirigida a lo largo del hueso desde un punto de origen h_1 , tal como se muestran en la figura 2.28(a), este punto h_1 corresponde a la articulación de la cadera. En tanto la articulación de la rodilla se encuentra en el punto h_2 . Si consideramos el punto h_1 como un pivote para un estudio de esfuerzos y momentos flexores, encontraremos que la principal carga la tiene la rodilla, la cual posee un elevado esfuerzo cortante respecto a su sección transversal, al igual que un elevado momento de torsión en la pierna del animal.

Sin embargo, aplicando un arreglo de articulaciones en las que intervienen músculos flexores, los cuales ejercen de forma independiente cargas hacia la pierna (t_1 y t_2) y la rodilla (las primeras para sostener y las segundas para movilizar), podremos ver que los esfuerzos se reducen en la sección rotular, pero aumentan en la sección de la pierna, razón por la cual el fémur en los mamíferos es el hueso más largo y con mayor sección transversal de todos. Esto es observable en la figura 2.28(b), al mismo tiempo que un par de diagramas de esfuerzo-momento, tal como se puede ver en un análisis realizado en 1965 (Badoux, 1965).

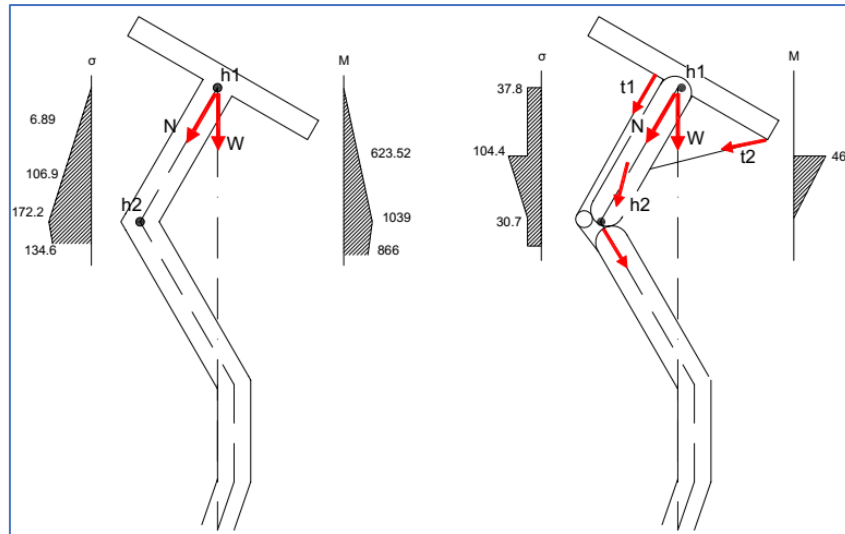


Fig. 2.28(a) Extremidad pelviana considerada como columna rígida y sus esfuerzos; (b) Extremidad pelviana considerada como un sistema de articulación y sus esfuerzos. Tomada de: Getty (2005)

Como se puede observar en los diagramas, existen un par de fuerzas en el sistema articulado que parten de secciones anteriores a la articulación en las que se presenta el mayor momento y esfuerzo cortante. Sin embargo, la aplicación en el sistema de la articulación y tensiones musculares reducen el impacto y lo enfocan en el fémur. Para el caso del miembro torácico el análisis actúa de la misma manera.

Los esfuerzos que sufre tanto el húmero como el fémur se manifiestan en cargas variables pues la mayor parte del tiempo el perro se encuentra en movimiento, estas causan esfuerzos cortantes sobre el área transversal y momentos de torsión. Las estructuras óseas poseen características particulares para cada mamífero dado que, como se ha mencionado, la condición predatoria de algunas especies determina el diseño natural en el sistema locomotor.

Las propiedades de los huesos en cada animal es un punto importante para la ortopedia técnica en la medicina veterinaria. Como es sabido en la ingeniería mecánica, cada material posee propiedades físicas intensivas y extensivas; tales como densidad, tenacidad, dureza, resiliencia. Es por ello que el estudio de las características mecánicas en materiales justifica el diseño biológico presente en todos los mamíferos.

Inteligencia Artificial: La lógica difusa como controlador

Como último punto de los elementos a utilizar para el desarrollo y fabricación de una prótesis con un control inteligente se encuentra la utilización de una de las ramas de las ciencias computacionales con mayor auge en los últimos años.

Se conoce a la inteligencia artificial como la capacidad que tiene las máquinas de interpretar e interactuar con el medio de manera muy similar a como lo haría el ser humano. Estas interacciones se dan a través de dos características fundamentales, las cuales son atribuidas al concepto general de *inteligencia*: el razonamiento y el aprendizaje. En la teoría general de la I.A. se contemplan tres ramas fundamentales cuya naturaleza es la de imitar las dos características anteriores, estas son la lógica difusa, las redes neurales artificiales y los algoritmos genéticos. En un sistema inteligente, la toma de decisiones autónomas basadas en parámetros de entrada puede ser administradas de manera eficiente por la lógica difusa. A continuación, se presenta una explicación breve de los conceptos más generales de esta rama de la I.A. y cómo puede ser utilizado en el presente proyecto.

La lógica difusa es una rama de la inteligencia artificial que permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y lo verdadero (Ponce Cruz, 2011). Fue desarrollada a principios de la segunda mitad del s. XX por el matemático azerbaiyano Lofti A. Zadeh, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de California Berkeley. Como es bien sabido, las máquinas poseen un lenguaje (conocido como lenguaje máquina), el cual está basado en un sistema de numeración binaria; es decir, solamente acepta estados de niveles bajos o “ceros” y estados de niveles altos o “unos”. La mayoría de nuestros equipos modernos con control electrónico poseen sistemas digitales que únicamente comprender estos estados binarios y responden a la lógica booleana, la cual toma su premisa de la lógica formal. La lógica booleana admite operaciones tales como conjunciones entre estados (AND), disyunciones (OR) y negaciones (NOT) en los cuales solamente pueden operar estados absolutos, ceros o unos. Esta forma de interpretar las cosas naturales es útil para operaciones predeterminadas donde un usuario puede ingresar instrucciones a través de un lenguaje de programación de medio o alto nivel (un ejemplo es el lenguaje Ensamblador) a una máquina o un sistema embebido cualquiera; pero en las cuales, las decisiones son preconcebidas en la misma programación de un sistema electrónico basado en microcontroladores dadas las entradas de información, ya sea por parte del usuario o del medio ambiente a través de una amplia gama de sensores. Un ejemplo de estas aplicaciones son los circuitos combinacionales que se construyen con las famosas compuertas lógicas. Estas, a través de una serie de combinaciones entre ellas respetando estas operaciones básicas y teniendo en cuenta la cantidad de entradas, se obtienen valores absolutos en todo momento, ceros y unos. Sin embargo, la lógica difusa ofrece

una solución más completa pudiendo esta interactuar con todo un universo de valores entre cero y uno, es decir, considerar claros y oscuros y valores intermedios que se asemejan más a la comprensión humana de las cosas que percibe de su medio, de la información entrante que perciben los sentidos. La figura 2.29 muestra de manera simplificada la comparativa entre estas dos formas de lógica.

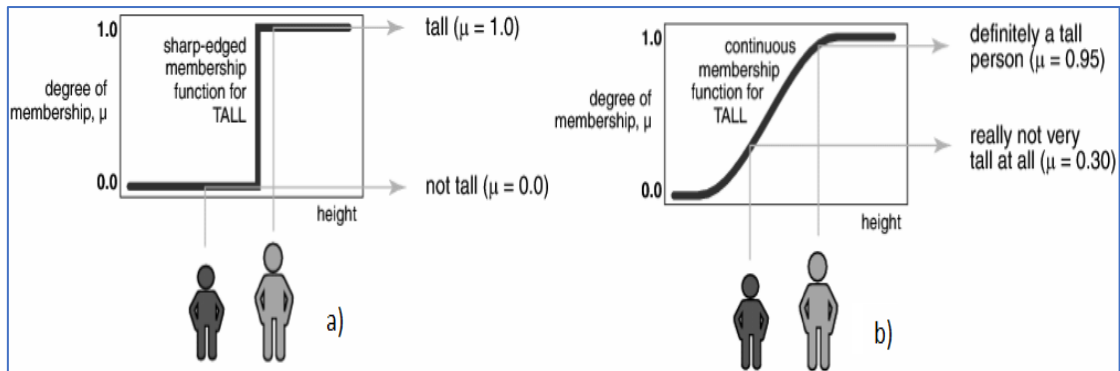


Fig. 2.29 a) Lógica formal con valores absolutos (persona alta y persona no alta); b) Lógica difusa con valores intermedios (persona alta y persona no tan alta). Tomada de: The Mathworks Inc. (1997)

Principios de diseño de un control difuso

Con lo explicado anteriormente se demuestra la flexibilidad de la lógica difusa para interactuar con el medio exterior. La forma en la que puede interpretar estos datos es a través de una similitud que tiene esta forma de procesamiento de información con la humana, por medio del concepto de *variable lingüística*. Un ejemplo muy simple que se le puede dar a este concepto podría ser el siguiente: “Juanito no gusta de la leche caliente porque le quema la lengua. A Juanito le gusta la leche tibia”.

El concepto que se están manejando en esta frase, la naturaleza de lo que se habla, es la temperatura de una bebida, la leche. Aquí se encuentran dos conceptos bien conocidos por las personas: “caliente” y “tibio”. Un valor dentro de la lógica formal sería 10 °C como una bebida fría y 60 °C como una bebida caliente. Sin embargo, para una persona que no sea Juanito, 60 °C podría parecerle no tan caliente, o incluso los 10 °C le puede parecer “tibio”. Estos “claroscuros” son lo que define la variable lingüística, un concepto en el que se pueden incluir varios datos dentro de un universo muestral o incluso varios universos.

El concepto de “tibio”, de una manera muy burda, se puede decir que se encuentra entre caliente y frío; es decir, si caliente es el máximo (uno) y frío es el mínimo (cero), el concepto de tibio no podría entrar en la lógica formal. Este solamente entraría en el de la lógica difusa como un 0.5, la pertenencia del valor de tibio es de mitad para el caliente y mitad para el frío.

Explicado esto, entra en el juego un segundo concepto de suma importancia para entender de manera completa la lógica difusa: *grado de pertenencia*. Este concepto refiere al índice de pertenencia de la variable lingüística dentro de un universo de datos, es decir, que tanto de un parámetro de inicio se encuentra dentro de un campo o conjunto de datos.

Retomando el ejemplo de Juanito y la leche, se tienen dos universos muestrales: todos los valores de temperatura que Juanito considera fríos para su bebida y todos los valores que Juanito considera calientes. Entre ambos existen las temperaturas tibias, 50% de estas se encontrarán en el conjunto de las frías y el otro 50% en las calientes. Estos conjuntos en la lógica difusa se conocen como *conjuntos difusos*, por lo que el grado de pertenencia de “tibio” en los conjuntos mencionados sería de 0.5 cada uno.

Sin embargo, tibio también puede tener su propio conjunto difuso, teniendo en su universo datos más amplios, donde algunos pueden compartir un grado de pertenencia con los otros conjuntos y así, dependiendo de los conjuntos que todo el estudio pueda contemplar. El ejemplo de cómo estos conjuntos interactúan entre sí en un sistema difuso es observable en la figura 2.30.

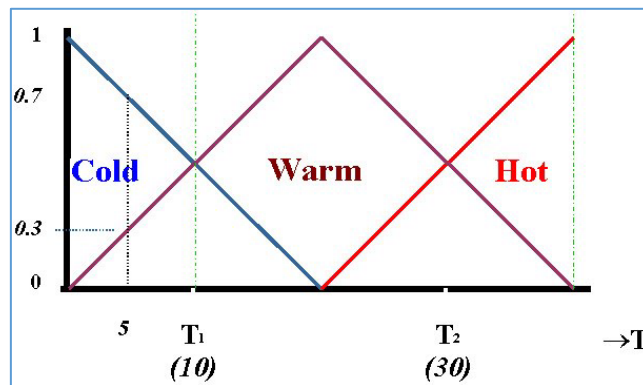


Fig. 2.30 Conjuntos difusos de las temperaturas frío, tibio y caliente. Tomada de:

<https://sites.google.com/site/mrstevensonstechclassroom/hl-topics-only/4a-robotics-ai/fuzzy-logic?overridemobile=true>
En la imagen se puede observar una temperatura de ejemplo, 5 °C. Este tiene datos sobre el eje de las ordenadas tanto en el conjunto de “tibio” como en el conjunto de “frío”. Para el conjunto de “tibio”, el grado de pertenencia de 5 °C es de 0.3, mientras que para el de “frío” es de 0.7. no significa por ello que 5 °C sea frío en absoluto, sino que, según la percepción del diseñador de los conjuntos difusos de las temperaturas, la temperatura de ejemplo es más fría que tibia, pero que es tibia y fría al mismo tiempo.

Sin embargo, los conjuntos y los grados de pertenencia son sólo la forma en que el sistema informático experto (se le dice experto ya que para generar un sistema difuso es necesario que un “experto” en los parámetros a tratar diseñe los conjuntos del sistema) interpreta los datos

para analizarlos por medio de los grados de pertenencia. Esto es sólo la punta del iceberg, ya que el objetivo de un controlador es, en función de datos de entrada, obtener datos de salida útiles para las aplicaciones que se requieran. Para ello es necesario seguir una serie de etapas importantes en la metodología del diseño de un controlador difuso, el cual se basa enteramente en los tres conceptos que ya hemos visto en esta introducción. En la figura 2.31 se puede observar un diagrama de bloques que ilustra el proceso para generar un controlador difuso a través de los parámetros base ya presentados.

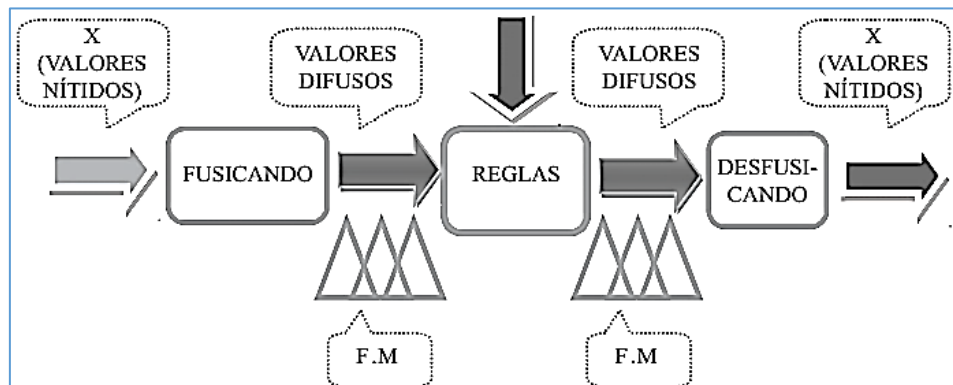


Fig. 2.31 Proceso para la generación de un control difuso. Tomada de: Ponce (2011)

1. Los valores deseados se deben interpretar en conjuntos. Estos valores pueden tener un rango tan amplio como se quiera tomando en consideración la distribución de los datos dentro de los mismos. En la teoría de la lógica difusa existen varias formas en las que los grados de pertenencia (que ahora pasan a denominarse funciones de membresía dada su relación con el conjunto a diseñar) se pueden representar. Los más comunes suelen ser las funciones de saturación, donde se inicia con un valor nulo de pertenencia y en un punto determinado este comienza a crecer mediante una pendiente constante hasta alcanzar un máximo. Su opuesto es la denominada función hombro. Otra función es la triangular, la cual es creciente en un determinado intervalo hasta un valor máximo y, tras alcanzar éste (por lo general un valor único), decrece en la misma pendiente hasta un valor nulo. Esta función es de gran utilidad para un valor óptimo central. La función trapecio es similar a la triangular, con la salvedad de que existe más de un valor óptimo, una serie de datos que dan una planicie de valores óptimos cualesquiera. Por último, cabe mencionar la función sigmoideal, la cual es similar a la de saturación o al tipo hombro; sin embargo, esta no presenta cambios drásticos en los datos ya que su forma de función de segundo grado da “suavidad” a la función. A continuación, se presentan estas formas en la figura 2.32.

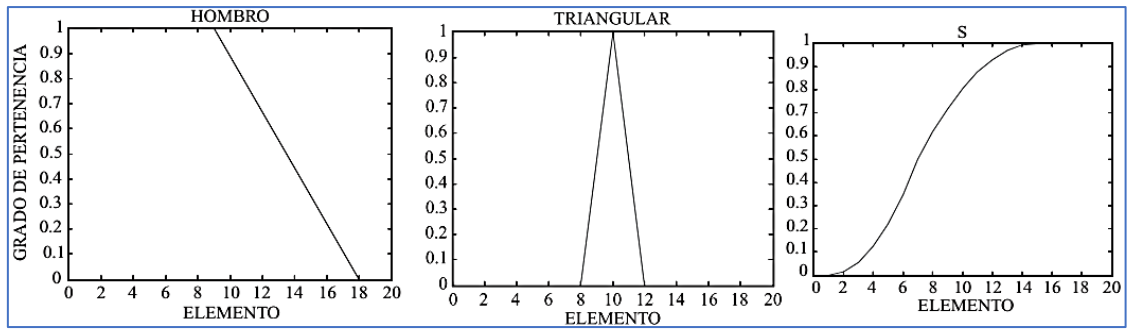


Fig. 2.32 Funciones de membresía (hombro, triangular y sigmoidal). Tomada de: Ponce (2011)

- Una vez se selecciona la naturaleza de los datos que se requieren, se procede al proceso de *fusicación*. Esto quiere decir que se deben generar los datos de entrada en conjuntos difusos para conocer las relaciones que existen en el sistema experto. Retomando el ejemplo de Juanito y la leche, se requiere construir un control para la temperatura de la leche del niño. A él no le gusta muy fría ni mucho menos muy caliente; por lo que Juanito, como experto en lo que a temperatura de la leche con chocolate se refiere, diseñó la siguiente entrada *fusicada*. También se puede considerar otra variable en la que la temperatura ambiente es considerada. Como a todos a Juanito le gusta su bebida dependiendo de cómo está la temperatura ambiente: si hace mucho frío puede permitirse un poco caliente su bebida de leche con chocolate; en cambio, si la temperatura es muy caliente, le gusta que su bebida sea un tanto fría. Según él, la temperatura adecuada de la leche con chocolate debe ser de 25 °C. Estas funciones de pertenencia son presentadas en la figura 2.33, las cuales fueron realizadas en el software Matlab.

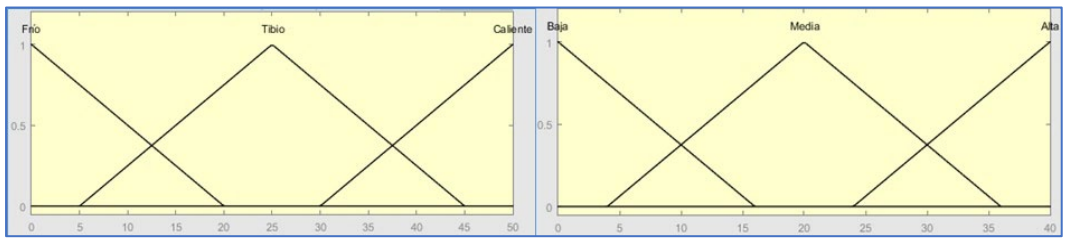


Fig. 2.33 Fusicado de los conjuntos difusos de temperatura de la leche con chocolate y la temperatura ambiente

- El siguiente paso es la asignación de reglas. Esta puede realizarse a través de una matriz de decisiones o reglas, bajo la que las entradas interactuarán. Es muy similar a lo que ocurre en un circuito combinacional de lógica booleana, donde las relaciones AND y OR se hacen presentes. A continuación, se presenta en la tabla 2.2 esta matriz de decisiones y su relación utilizando el operador de conjunción para formular.

Tabla 2.2 Matriz de Reglas para el control difuso

Temp. Amb.	Temp. Lech	Salida
Baja	Fría	Caliente
	Tibia	OK
	Caliente	OK
Media	Fría	OK
	Tibia	OK
	Caliente	Enfría
Alta	Fría	OK
	Tibia	Enfría
	Caliente	Enfría

4. Con esta matriz de decisiones formulada a partir de unir las entradas y obtener una salida (por ejemplo, si la temperatura ambiente es fría como en invierno y la leche que se le va a dar a Juanito está fría, esta debe calentarse). Se debe generar una salida de la misma naturaleza que sus entradas. En este caso una serie de conjuntos difusos de parámetros similares a los de las entradas de temperatura de la leche con chocolate y la temperatura ambiente. Para el caso de los extremos se optó a la entrada por funciones hombro y de saturación respectivamente, por lo que la salida en forma de valores difusos puede ser de igual forma, en el caso del ejemplo se realizó igual. El conjunto OK, se da para el valor de temperatura óptima que se requiere, considerando que la temperatura óptima para tomar una leche con chocolate tibia es con la variable lingüística de “más o menos”, un 0.5. La salida en valores difusos se puede observar en la figura 2.34, la cual fue realizada en el software matemático.

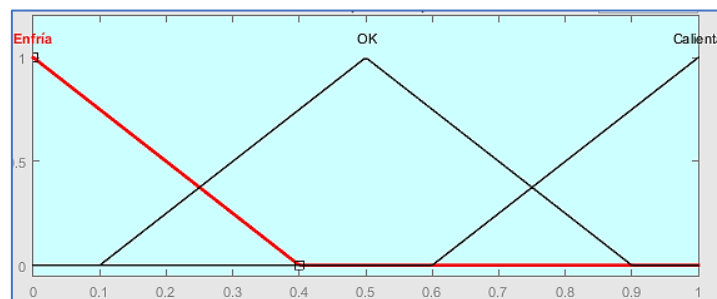


Fig. 2.34 Salida del control difuso en valores difusos.

5. El último punto del proceso es la *desfucicación*. Es decir, convertir los valores difusos del conjunto de salida en valores nítidos o valores capaces de ser interpretados por una máquina. Para ello, existen dos métodos: el método de Mamdani y el de Sugeno.

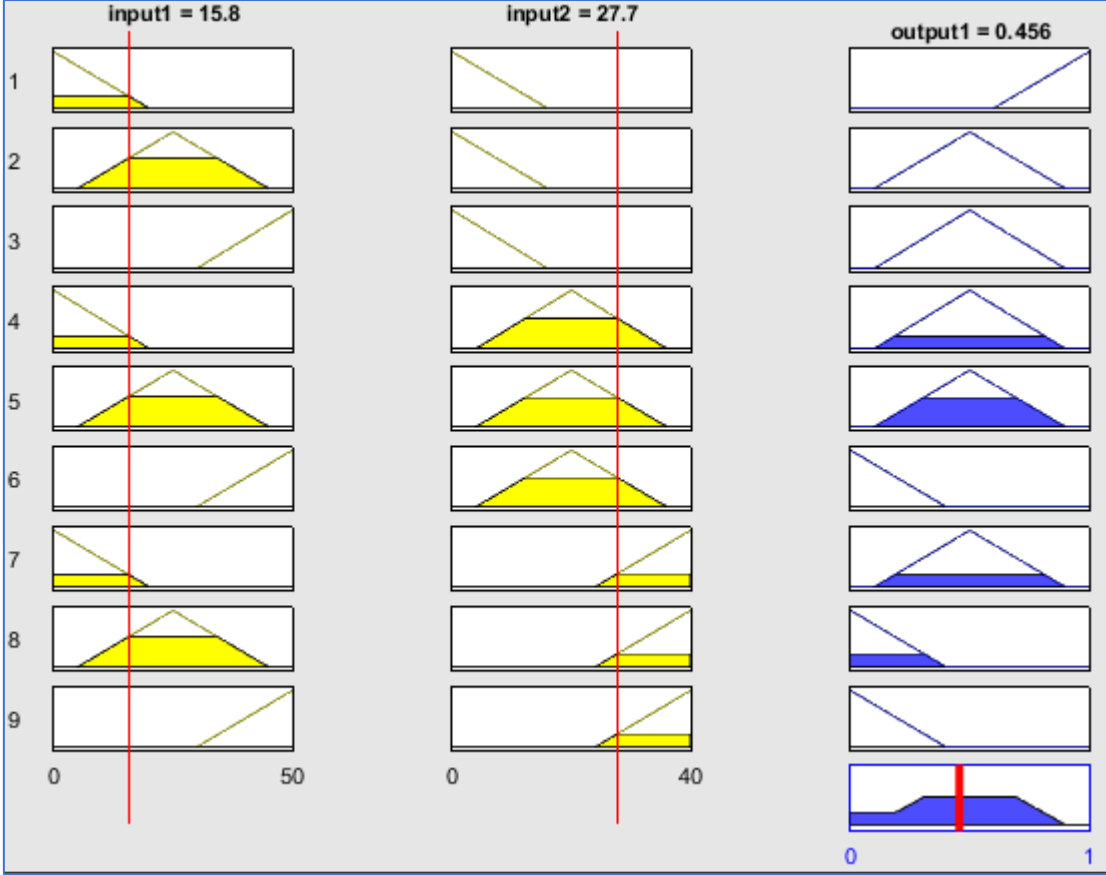


Fig. 2.35 Método de Mamdani para obtención de una salida concreta (defusificación)

Dada la facilidad de aplicación y entendimiento el más utilizado es el primero. El cual consiste en tomar los datos de entrada y generar, bajo cada una de las reglas formuladas, una función de pertenencia sombreando el conjunto difuso formado (de ahí la importancia de las formas de las funciones de membresía), las cuales generarán áreas en las salidas que, al sumarse geoméricamente, formarán una figura de salida, este se muestra en la figura 2.35. El valor de salida deseado se encuentra en el centroide de esta figura resultante. En el ejemplo se muestra que una temperatura de 15.8 °C ambiente y una de 27.7 °C en la leche con chocolate de Juanito tiene una aceptación de 45.6% por parte del niño.

Con este procedimiento en mente, toda esta sinergia de información y entendiendo lo multidisciplinario que es la tarea de poder no sólo diseñar sino también manufacturar y configurar un sistema mecatrónico en favor de un animal; es posible determinar el alcance del proyecto, además de delimitar objetivos para el mismo.

III. OBJETIVOS DEL PROYECTO

- Desarrollar a modo de prototipo experimental una prótesis robótica con la posibilidad de suplir el uso de las actuales prótesis mecánicas que se encuentran en el mercado.
- Sintetizar un mecanismo capaz de seguir la trayectoria de la pata del perro de acuerdo con lo que se plantea en los antecedentes teóricos, siguiendo los pasos de la marcha del perro en su extremidad delantera.
- Diseñar los componentes mecánicos que forman parte del mecanismo generador del movimiento de acuerdo con la síntesis.
- Validar el comportamiento mecánico del prototipo ante esfuerzos mediante el método de elementos finitos y conocer los puntos de fragilidad para evitar problemas futuros en el diseño.
- Utilizar la información obtenida del estudio de MEF para obtener diseños optimizados de los eslabones que componen al mecanismo de prótesis de cara a su fabricación.
- Fabricar las piezas mecánicas que componen el diseño del prototipo de prótesis, de acuerdo con la optimización del diseño.
- Diseñar los sistemas electrónicos de control y diseñar algoritmos adecuados para estos sistemas.

IV. HIPÓTESIS DE FUNCIONAMIENTO

De acuerdo con la teoría de M. Hildebrand, descrita en los antecedentes teóricos sobre la acción de desplazamiento de las extremidades en cuadrúpedos; se toma un sistema electrónico para registrar la posición de la extremidad sana en un sujeto con pérdida de un solo miembro en la sección delantera y, a través de un control por lógica difusa, para la acción de un mecanismo por un servomotor para la reproducción lo más eficientemente posible de la trayectoria que traza la pata en la caminata a velocidades bajas.

V. PRESENTACIÓN DEL SUJETO DE ESTUDIO

Milo: paciente a la espera de su prótesis

Para poder hacer este proyecto realidad se ha encontrado un perro con la triste situación de no contar con su extremidad delantera derecha. Este es el caso de Milo.

Milo en la figura 5.1 (izquierda) es un perro mestizo adulto de aproximadamente 6 años de edad. En una revisión de rutina con su médico veterinario, los datos anatómicos obtenidos de Milo fueron los siguientes:

- Masa total: aprox. 30.5 Kg.
- Altura hasta la cruz: 58 cm.
- Longitud normal de escápula izquierda: 19 cm.
- Longitud normal de húmero izquierdo: 23 cm.
- Longitud normal de ulna izquierda: 14 cm.
- Longitud normal de extremidad residual derecha: 11 cm.
- Ancho de brazo: 7.3 cm.

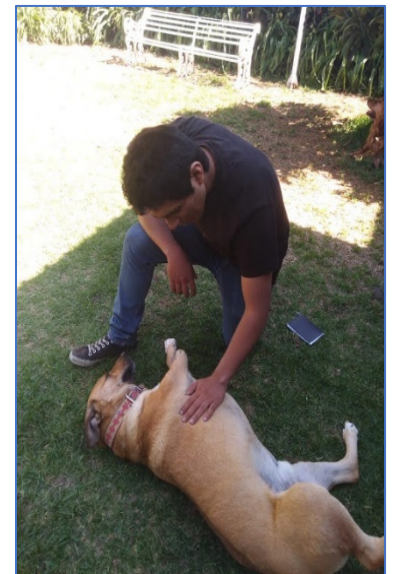
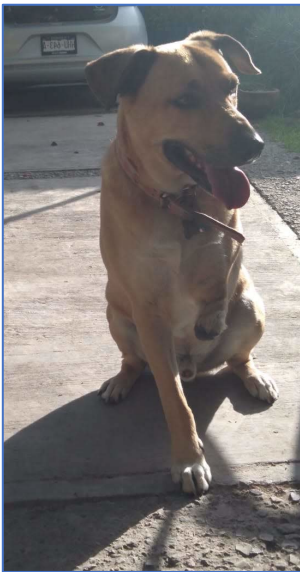


Figura 5.1 Perro Milo (izquierda), Revisión a Milo (derecha), Pruebas sobre Milo (centro)

Se hace referencia en los datos anteriores a una distancia “normal” la cual corresponde a la longitud total de la parte de la extremidad. Estos datos se tomaron en consideración para conocer la distribución original (con algunas diferencias pequeñas, como en todos los seres vivos) de la pata que el perro perdió.

Un punto importante que cabe destacar respecto al estado de salud de Milo es que la intervención para la amputación de su extremidad se realizó en la región de la cavidad glenoidea. Al no serle colocada una prótesis mecánica tradicional, la escápula tendió a descender sobre el plano medio; la pequeña protuberancia que se logra ver en él es esta región cubierta del resto de piel tras la intervención quirúrgica, asemejando un muñón. Con un entrenamiento adecuado con una prótesis convencional, Milo podría recuperar la movilidad flexora de su hombro; sin embargo, lo que se busca es que él mismo adapte el protésico a su forma de andar por lo que se espera que con la experimentación de la prótesis mecatrónica, él mismo recupere la movilidad en su hombro y no requiera entrenamiento sino únicamente vigilancia cuando use el dispositivo.

Al momento en que se terminó de escribir este trabajo, Milo se encuentra bien de salud a pesar de su condición. Está a la espera de probar el prototipo funcional desarrollado y esta es la parte más difícil de todo el proceso. Las figuras 5.1 (centro) y 5.1 (derecha) muestran el proceso de preparación para pruebas de Milo por parte del creador de este trabajo.

VI. DESARROLLO DE LA PRÓTESIS

El proceso de diseño mecánico del mecanismo de prótesis

En infinidad de textos referentes al diseño en ingeniería se pueden encontrar una serie de pasos consecutivos e iterativos con los cuales se puede generar un producto diseñado final. Los pasos son similares entre cada uno de los procesos descritos, claramente con algunas variaciones. Sin embargo, muchos de estos textos pueden estar bastante desactualizados para el contexto actual de la ingeniería, en la que la era de las computadoras ha llegado a facilitar en gran medida el trabajo de los diseñadores e ingenieros a la hora de crear un producto.

Para poder llevar a cabo el desarrollo de un producto de manera ordenada y secuencial (Budynas & Nisbett, 2019), esto con el objetivo de poder detectar problemáticas dentro del proceso de diseño y manufactura, es preciso tener una metodología de diseño clara que nos permita contemplar todos los aspectos requeridos por el cliente para su producto. Antes de comenzar a realizar una idea sobre el concepto de lo que queremos realizar, en nuestro caso sabemos que queremos hacer una prótesis para perros, es importante determinar una serie de requerimientos y especificaciones que cubran una necesidad, por lo que se puede encuestar a veterinarios, dueños o voluntarios sobre qué aspectos consideran para un prótesis para las mascotas. El siguiente factor es el diseño conceptual, derivado de las necesidades registradas y evaluadas; esta fase también se consideraría como definición del problema. Para el diseño conceptual se puede hacer uso de bocetos, tanto a mano como en algún software CAD para dejar asentado una idea preliminar de lo que a consideración del desarrollador podría ser una solución. Es recomendable que se haga más de un diseño conceptual para poder determinar un diseño ganador que cumpla de manera eficiente con los requerimientos de modo que podamos elegir con metodología adecuada ese diseño deseado. El siguiente paso es la síntesis o desarrollo del arte conceptual: es la fase de generación de la solución desde los datos obtenidos por el cliente, el modelado matemático y por los factores ambientales en los que estará el producto. No es un diseño refinado ya que aquí se deben considerar los factores de modo general para determinar la aplicabilidad de los diseños; de aquí debe surgir el diseño ganador al que se hace mención en la parte anterior. El refinamiento o detalle del diseño ganador implica el análisis de este mismo con las condiciones límite de operación (más cercanas a la realidad y lo que se espera de este producto de forma más particular) y la optimización de diseño. Aquí también intervienen

aspectos económicos, de manufactura e incluso de publicidad y distribución de producto terminado; este podría denominarse también un proceso de evaluación del proyecto, para este fin es recomendable el uso de herramientas tanto matemáticas como computacionales tales como uso de Método de Elementos Finitos, Fluidodinámica Computacional, simulación para Manufactura Flexible y/o Aditiva y Análisis de Costo/Beneficio. Finalmente es posible presentar los resultados al cliente el cual podrá o no avalar el proyecto. Esto nos servirá como desarrolladores para obtener una retroalimentación positiva para mejorar nuestro producto, generando incluso versiones 2.0 de los productos creados. En la figura 6.1 se puede observar un diagrama que explica el proceso de diseño y las relaciones iterativas que existen entre cada fase, por lo que la sinergia entre conocimientos es más que vital para crear el producto deseado.



Figura 6.1 Fases del proceso de diseño de ingeniería

Matriz de Requerimientos

Lo primero que se debe tomar en cuenta es la necesidad, el QUÉ de lo que se pretende realizar. Para ello es necesario basarnos en los detalles teóricos para identificar qué necesita el perro en cuestión a diferencia de los otros perros. También si es que existen aspectos similares que puedan ayudar a casos distintos. Como se ha visto, la movilidad en los perros es similar entre cada una de las razas, por lo que se puede hacer un solo modelo conceptual para cada raza y cada tamaño; este es un factor que se debe tomar en cuenta. A continuación, en la tabla 6.1 se encuentra una matriz de requerimientos diseñada a partir de las necesidades particulares de Milo y del entorno general en el que los perros viven, tomando en consideración que él vive en una zona urbana y en una casa con jardín, donde puede correr y caminar a gusto.

Tabla 6.1 Matriz de requerimientos.

Características del Requerimiento	Requerimientos del cliente
OBLIGATORIO	Que sea articulada
OBLIGATORIO	Que soporte el 30% del peso total del perro
OBLIGATORIO	Que sea ligero y fácil de colocar en el perro
OBLIGATORIO	Que tenga la menor cantidad de cableado
OPCIONAL	Que la batería dure aproximadamente 1 hr de uso continuo
OPCIONAL	Que sea ergonómico
OBLIGATORIO	Que se pueda anclar de forma fácil en el torso del perro
OPCIONAL	Que no se caliente demasiado
OBLIGATORIO	Que sea barata
OBLIGATORIO	Que sea estable y no vibre
OPCIONAL	Que sea estética
OBLIGATORIO	Que sea pequeño o que no tenga demasiados elementos

Con esta matriz podemos ver qué puntos son los más importantes a tratar para continuar con la propuesta de soluciones varias, o también llamados “Artes Conceptuales”. Se puede tomar en consideración una mayor cantidad de parámetros para la construcción de una prótesis cada vez más efectiva, sin embargo, se tomarán en cuenta las seis características más importantes para la construcción de un prototipo funcional versión 1.0 del protésico. Cada uno de los puntos que se tomarán como imprescindibles para el diseño se le colocará un puntaje del 1 al 5 de relevancia para el diseño y se realizará un histograma para una comparativa de cobertura de los requerimientos por parte de los artes conceptuales. El histograma realizado se presenta en la figura 6.2 los puntos requeridos para el análisis son:

- Que sea articulada.
- Que soporte el 30% del peso del perro.
- Que el control sea reducido y de bajo consumo de potencia.
- Que tenga la menor cantidad de cableado posible.
- Que sea barata.
- Que sea pequeña y con la mínima cantidad de elementos.

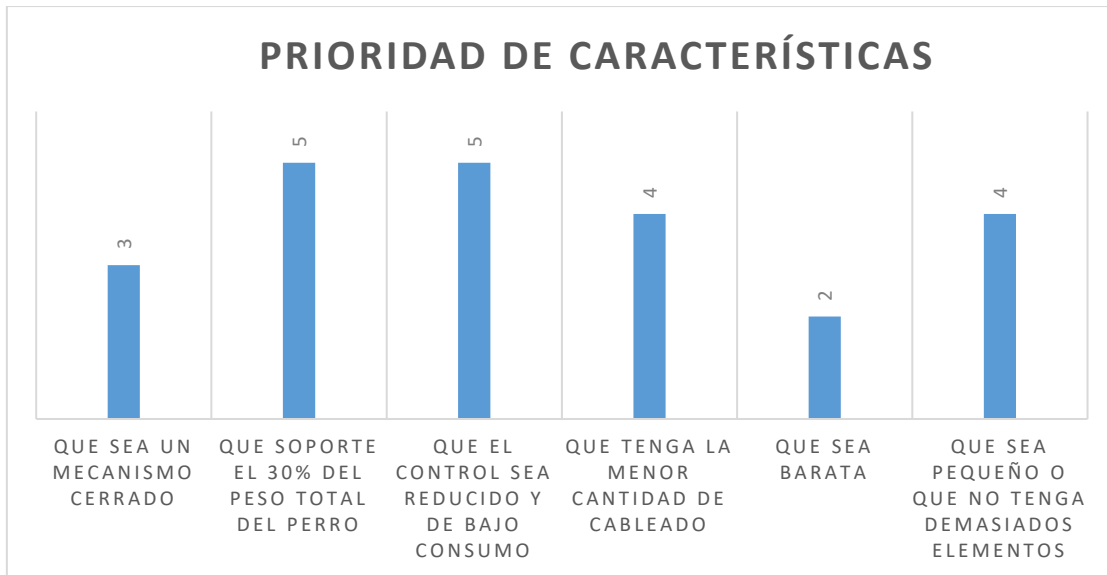


Figura 6.2 Histograma de prioridad de requerimientos

Gracias a este histograma sabemos que el mayor peso de importancia para el diseño radica en las características estructurales; es decir, se debe prestar suma importancia en el factor de seguridad del diseño y en la selección y desarrollo de un sistema de control compacto, lo que se ve reflejado en un bajo consumo de corriente.

Para poder dar prioridad a estos dos puntos (en la gráfica el problema del soporte contemplado en la parte estructural y en la parte del control) se dividirá el trabajo en dos secciones separadas que al final, una vez se encuentren desarrolladas, se podrán unir en un sistema sinérgico que valide la hipótesis planteada para este trabajo: el estudio del mecanismo y el estudio del control.

Presentación de los Artes Conceptuales Preliminares

El arte conceptual o diseño preliminar se puede definir como un elemento gráfico que busca transmitir ideas en bocetos realizados ya sea a mano o por computador (generalmente estos se realizan a mano), sobre las ideas preliminares que se tienen del producto. Estas ideas surgen de analizar el problema y proponer una serie de soluciones viables e ideas finales de lo que se espera sea el producto terminado. Los diseñadores industriales (en el caso de que el producto surja de alguna empresa consolidada) se encargan de realizar los bocetos y crear modelos de concepto en hule espuma, madera o plastilina (Bertoline & Wiebe, 1994).

Para el caso de la prótesis se utilizaron bocetos conceptuales basados en algunas ideas preliminares que puedan cumplir con los puntos más importantes de la matriz de requerimientos.

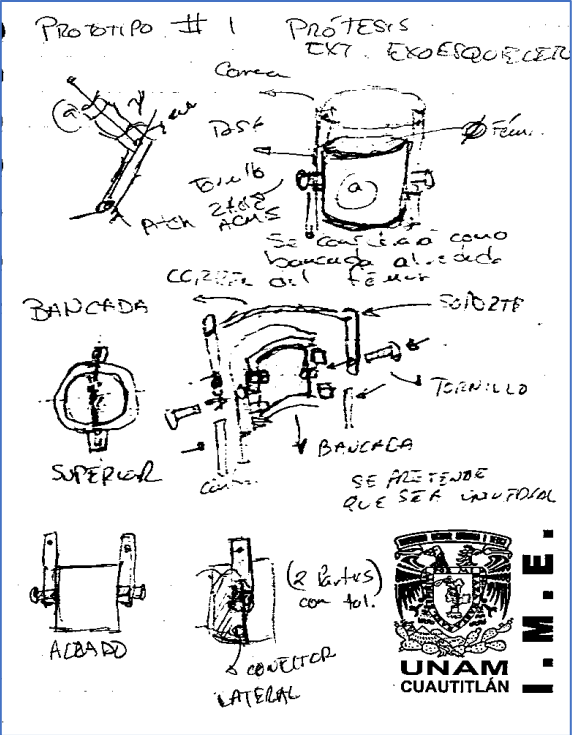


Figura 6.3 Primer diseño conceptual de prótesis

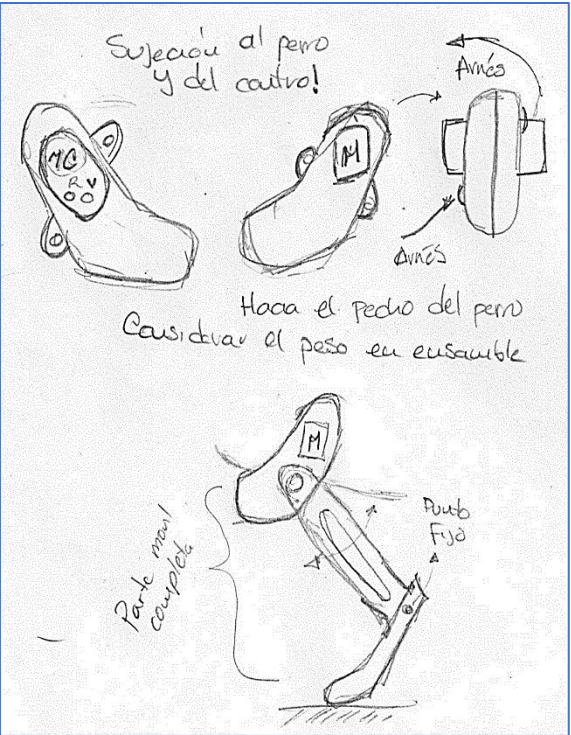


Figura 6.4 Segundo diseño conceptual de prótesis

Estos son bocetos hechos a mano en donde se pretende dar una visión de la distribución del orden tanto del sistema embebido que se pretende usar para controlar el protésico; tanto en la figura 6.3 y 6.4 se pueden observar algunos diseños conceptuales realizados por el desarrollador del proyecto para el diseño de la prótesis. Estos son diseños realizados a mano que se utilizaron como guía para la generación de un concepto en 3D realizado en un software CAD de un mecanismo robótico del producto final esperado en la figura 6.5.

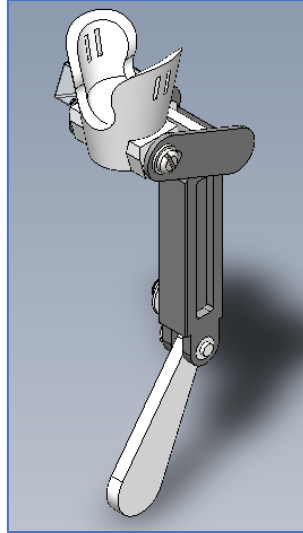


Figura 6.5 Diseño CAD como arte conceptual de prótesis

Estos modelos no pretenden ser los productos finales ya que son únicamente ideas preliminares que pretenden satisfacer los puntos más importantes señalados en la matriz de necesidades de acuerdo con las prioridades marcadas en el histograma. Estos puntos a considerar son la movilidad, la cual proporcionará la cantidad de eslabones y el tipo de pares cinemáticos que compondrán el mecanismo; el comportamiento estático de los eslabones a razón de proporcionar un factor de seguridad óptimo para la carga viva; el tipo de dispositivo de control y el tipo de sincronización de acuerdo con el consumo de potencia deseado, la facilidad de programación y de aplicación de un control inteligente, así como el elemento de potencia motriz adecuado para obtener la movilidad del dispositivo.

Síntesis cinemática de mecanismos para la obtención de diseños funcionales

En este punto se realizará el proceso de síntesis cinemática para la obtención de un mecanismo cerrado que proporcione un movimiento cercano al natural en la extremidad delantera del perro. En este apartado se involucran las dos tareas básicas de la síntesis cinemática: la síntesis de tipo y la síntesis dimensional. Estas nos ayudarán a generar un par de diseños conceptuales de acuerdo con el orden de elementos que compongan el mecanismo y que aseguren a través de una entrada, la salida deseada.

Se define a la síntesis de tipo como el primer paso de la síntesis de mecanismos, la cual es utilizada por el diseñador o ingeniero para determinar el tipo de mecanismos que permitirán cumplir la tarea: un sistema de levas, un tren de engranajes, un mecanismo de barras de revolución o una combinación de estos. Derivado de este tipo de síntesis se tiene la síntesis de número, en la que dependiendo del tipo de mecanismo seleccionado; de este se puede generar

una tabulación de familias de mecanismos con el mismo número de elementos designado por el diseñador y los mismos grados de libertad (Hernández, 2004). Se entiende por grados de libertad a la cantidad de parámetros de entrada necesarios para determinar todas las posiciones de los eslabones de un mecanismo (Erdman & Sandor, 1998). La naturaleza de este concepto se puede visualizar en la ecuación 6.1, la cual corresponde a la denominada ecuación de Grübler:

$$M = 3N - 2(p_2 + 2p_3)$$

Ec. 6.1 Ecuación de Grübler de movilidad

El concepto de grados de libertad es importante para el estudio de un mecanismo con propósitos biomecánicos, ya que con este concepto se puede definir el tipo de mecanismo a utilizar: mecanismos abiertos o mecanismos cerrados; ejemplos de estos se muestran en la figura 6.6 y, por tanto, la metodología a usar para la generación del dispositivo mecánico.

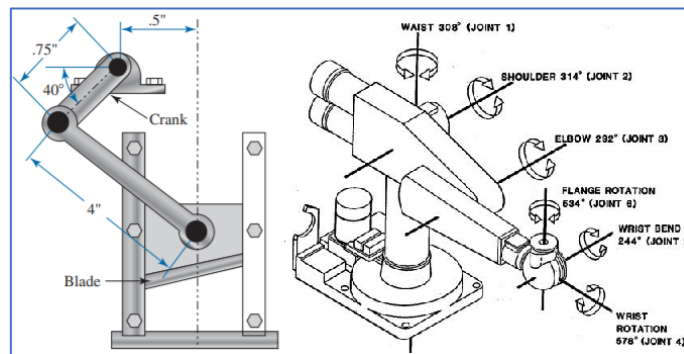


Figura 6.6 Mecanismo cerrado de 1 GDL (Izquierda); Mecanismo abierto de 6 GDL (Derecha). Tomada de: Norton (2009) y <https://freedomforlife.wordpress.com/grados-de-libertad/>

En la figura 6.6 se puede observar que en el mecanismo existe solamente una entrada y una sola salida con una única dirección, es decir, un único grado de libertad. En tanto que la figura en la derecha presenta un grado de libertad por cada entrada en el mecanismo, entrada independiente. Es decir, que para el mecanismo cerrado de guillotina de un solo grado de libertad se requiere un único elemento motor, ya sea un actuador neumático angular, un motor eléctrico o un servomotor; mientras que para el brazo robótico es necesaria la aplicación de un servomotor por cada grado de libertad, lo que incrementa complejidad de diseño, así como costo y operabilidad. Armados con este conocimiento, lo que queda entonces es proponer por simplicidad un mecanismo cerrado. Tomando en consideración lo explicado sobre la distribución anatómica del miembro torácico, se tienen músculos flexores, depresores y extensores (romboides, omotransverso, braquial, bíceps braquial) actuando en cada articulación, por lo que por cada una de las articulaciones habrá un grado de libertad.

Una forma de simplificar la estructura ósea de las extremidades caninas se puede recurrir a este diseño estructural, mostrado en la figura 6.7. Aquí se nos presenta una distribución angular de tres segmentos, el cual es un modelo muy usual para el estudio de cinemática en cuadrúpedos, así como un modelo de simplificación dinámica y de estabilidad (Fischer & Blickhan, 2006).

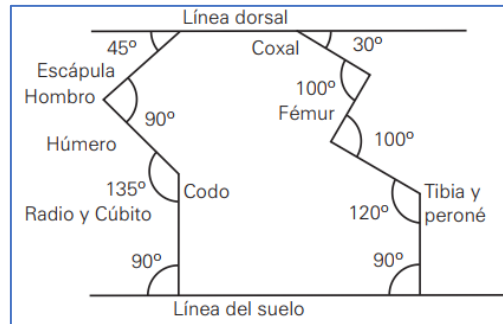


Figura 6.7 Angulación entre extremidades, torácicas y pelvianas. Tomado de: Fariña (2016)

A pesar de que existen tres elementos simplificados, estos no se deben considerar como elementos del mecanismo cerrado; ya que como se observa, cada uno de los eslabones o segmentos que componen las extremidades es movido y sostenido por una serie de músculos interdependientes. Cada articulación representa un grado de libertad, por lo que de forma simplificada se puede decir que el sistema locomotor del perro por extremidad posee 3 grados de libertad en el plano. Dado que el concepto de grado de libertad es referente a la entrada de potencia o movimiento y uno de los requerimientos propuestos involucra la simplicidad, por lo que se opta por una única entrada de potencia y movimiento, lo que reduce el mecanismo a generar a un mecanismo de solo un grado de libertad. Dicho esto, se puede entonces decir que el primer enunciado para resolver el problema se reduce al siguiente: *Encontrar una serie de posibles mecanismos de 1 GDL y 6 a 8 eslabones*. Se recomienda hasta 8 eslabones ya que uno de los requerimientos de cliente en la matriz de necesidades es que no posea demasiados elementos. Lo más óptimo sería generar un mecanismo con pares puros de revolución y después, dependiendo de las necesidades derivadas del diseño, evaluar la posibilidad de generar transformaciones a otro tipo de pares. Dada la ecuación de movilidad de Grübler, se tiene la consideración para determinar el número más óptimo y el que ofrece la mayor cantidad de posibilidades de diseño de las cuales partir. Entonces, si la movilidad $M = G + 3$ para $G=1$ GDL, entonces $M = 1 + 3 = 4$, por lo que la cantidad mínima de eslabones en el mecanismo es de 4.

Ahora, para el máximo orden (i) del mecanismo, es decir, el grado máximo de pares de revolución que admitirá el mecanismo de revoluta, se tiene que $i = \frac{(N-G+1)}{2}$. Para tener un mayor control del movimiento se elegirán entre 6 y 8 eslabones, esto si por cuestiones de espacio y control de potencia es preciso convertir los pares cinemáticos como se mencionó. Donde $N=6$ el número de eslabones propuesto; $G=1$ los grados de libertad obtenidos. Entonces se tiene que $i = \frac{(6-1+1)}{2} = \frac{6}{2} = 3$. Por tanto, el orden máximo de los pares se encuentra entre pares binarios y terciarios. Además, tomando en consideración la ecuación de la relación entre el número y tipo de pares $2p_2 + 3p_3 + \dots = 2n_2 + 3n_3 + \dots$ el cual define la proporcionalidad entre los pares cinemáticos en un mecanismo y el número de pares de elementos que se pueden formar. Dado que para su funcionalidad se requieren un soporte fijo es posible generar transformaciones en pares cinemáticos; sin embargo, dada la naturaleza de esta obtención, es poco útil recurrir a esta técnica para 6 eslabones, por lo que el número de eslabones debe ser aumentado a un par, es decir, a 8 elementos que constituyan el mecanismo.

Para este caso se puede realizar la misma metodología que para los 6 eslabones y con ello, realizar una matriz de pares-eslabones para facilitar la identificación de los diseños cinemáticos conceptuales.

- Para movilidad $M=4$; $N=8$ eslabones y $G=1$ grados de libertad.
- Orden máximo de pares cinemáticos $i = \frac{(N-G+1)}{2} = \frac{(8-1+1)}{2} = \frac{8}{2} = 4$, es decir, existen pares tanto binarios como terciarios y cuaternarios. Para simplicidad se utilizarán únicamente eslabones binarios y ternarios.
- Relación tipo/número de pares dada por la ecuación: $2p_2 + 3p_3 = 2n_2 + 3n_3$.
- Cantidad de tipos de pares totales en el mecanismo si $N = n_2 + n_3 = 8$.
- Dada la ecuación de Grübler $M = 3N - 2(p_2 + 2p_3)$ para la cantidad de pares en el mecanismo de siete eslabones.

Como se puede observar, se tienen tres ecuaciones resultantes que poseen cuatro incógnitas. No es posible generar un sistema de tres ecuaciones y resolverlo de forma analítica ya sea por el método de Cramer o por Eliminación de Gauss o por técnicas relacionadas con el álgebra de matrices. Las ecuaciones resultantes quedan como en las ecuaciones 6.2 a) a la c).

$$n_2 = 8 - n_3 \quad \text{a)}$$

$$4 = 3(8) - 2(p_2 + 2p_3) \rightarrow p_2 = 10 - 2p_3 \quad \text{b)}$$

$$2(10 - 2p_3) + 3p_3 = 2(8 - n_3) + 3n_3 \rightarrow n_3 = 4 - p_3 \quad \text{c)}$$

Ec. 6.2 a) Tipos de pares en el mecanismo; b) Relación Par/Tipo; c) Ecuación de Grübler generalizada

Con estos datos se pueden encontrar las variables restantes sustituyendo el resultado de la ecuación c) en a) con lo que resultaría para cantidad de pares terciarios $8 = n_2 + (4 - p_3)$, y sabiendo a la vez que la cantidad total de eslabones de tipo binario debe ser $4 \leq n_2 \leq 8$, las características de los mecanismos resultantes y posibles para ocho elementos y un grado de libertad se muestran en la tabla 6.2 a continuación.

Tabla 6.2 Naturaleza cinemática de los diseños conceptuales

Pares binarios (p_2)	Eslabones binarios (n_2)	Pares ternarios (p_3)	Eslabones Ternarios (n_3)	Configuración Cinemática
10	4	0	4	(4,10,4,0)
8	5	1	3	(5,8,3,1)
6	6	2	2	(6,6,2,2)
4	7	3	1	(7,4,1,3)
2	8	4	0	(8,2,0,4)

Estas ecuaciones ayudan a restringir algunos parámetros de modo que el diseñador pueda elegir aquellos que le son útiles. En nuestro caso, emplear mecanismos cuaternarios complicaría la estructura del mecanismo, por lo que a pesar que el coeficiente i , referente al orden máximo de pares que permite un máximo de pares cuaternarios, pero es posible restringirlo a solamente tres. Asimismo, se busca la menor cantidad de pares ternarios ya que estos también ocupan un mayor volumen, por lo que se elegirán las configuraciones cinemáticas (7,4,1,3) y (8,2,0,4), ya que estos son de mayor utilidad y de mejor distribución. A continuación, se presentan un par de mecanismos de estas dos configuraciones en la figura 6.8 (izquierda) y 6.8 (derecha) donde se puede elegir el eslabonamiento más óptimo para la ejecución del mecanismo. Lo anterior corresponde a una síntesis tanto de tipo como de número. Los mecanismos obtenidos son dos ya conocidos en el mundo de la robótica. El primero, el de la figura 6.8 (izquierda), corresponde a una degeneración del mecanismo Theo Jansen que contiene ocho eslabones con la configuración obtenida del cálculo de síntesis de número. El segundo corresponde a un mecanismo con únicamente eslabones binarios proveniente de un reciente estudio realizado para la generación de mecanismos simples de 1gdl.

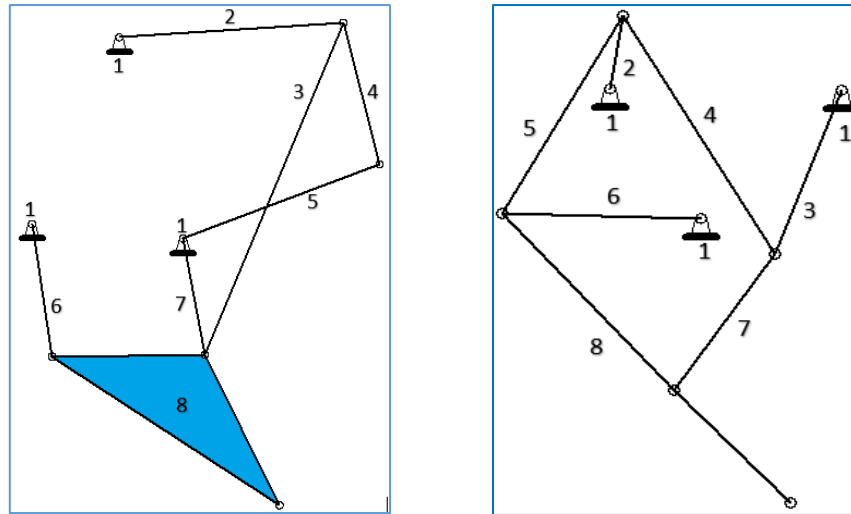


Figura 6.8 Mecanismo de configuración (7,4,1,3) (Izquierda); Mecanismo de configuración (8,2,0,4) (Derecha)

Sin embargo, el mecanismo propuesto no sólo debe cumplir con las condiciones de movilidad sino también con la potencia mecánica suficiente para movilizar el peso de cada uno de los eslabones, así como también dejar una sección de fácil cálculo para una síntesis dimensional, es decir, una síntesis que permita determinar las condiciones geométricas de cada eslabón de acuerdo con las dimensiones del paciente y que a su vez, permita la movilidad a razón de un movimiento simétrico que es el que se está buscando. Por lo que se optará por una segunda síntesis de tipo donde es posible transformar cadenas cerradas de cuatro barras en un juego de dos engranes. Se han elegido engranes ya que estos elementos de máquinas son útiles para proporcionar tanto movimiento angular como para transmitir potencia. En este apartado no se hará el diseño de los engranes ni se hará el cálculo de número de dientes ni forma del adendum, sino que simplemente se determinará la conversión de la cadena cerrada de cuatro elementos más cercana a la bancada para ambos mecanismos obtenidos.

Dado a que la bancada del mecanismo se pretende encontrar en la región proximal de la escápula izquierda, se pretende realizar esta conversión cinemática en el primer cuadrilátero conectado al eslabón 1 para las dos propuestas de diseño conceptual. En el mecanismo de la figura a) se realizará en el cuadrilátero conformado por los eslabones 1, 2, 4 y 5; mientras que para el de la figura b) será en los eslabones 1, 2, 3 y 4. Dado que es posible generar un mecanismo asociado conforme las características de los pares inferiores donde los eslabones de manivela y oscilador son representados por los centros de curvatura de las envolventes en el punto de contacto entre engranes. En la figura 6.9 se visualiza una representación de la transformación de un par superior

de contacto puntual con su respectivo mecanismo de cuatro barras asociado (Erdman & Sandor, 1998).

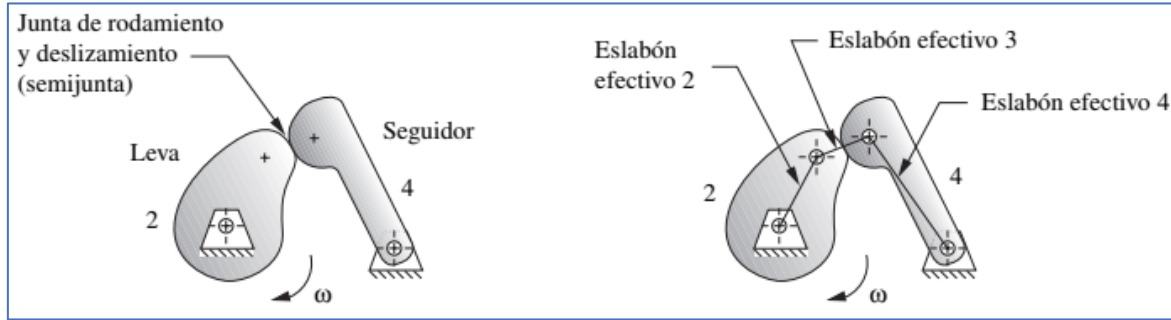


Figura 6.9 Mecanismo asociado de cuatro barras para mecanismo de par superior. Tomada de: Norton (2016)

Realizando esta modificación en ambas propuestas de mecanismos, se debe verificar que los grados de libertad, así como la movilidad sigan sin alteraciones ya que la transformación cinemática solamente se efectuó a razón de reducir y optimizar el mecanismo original para una mayor transmisión de potencia. De acuerdo con la degeneración cinemática de ambos mecanismos, se puede observar en la figura 6.10 (izquierda) y (derecha) se pierde un eslabón; para verificar que no se hayan perdido las propiedades originales de los mecanismos se comprobará con la ecuación de evaluación de grados de libertad derivado de la ecuación de Grübler citada arriba en la página 57 de este documento. La ecuación 6.3 se presenta a continuación:

$$G = 3(n - 1) - 2P_{inf} - P_{sup}$$

Ec. 6.3 Ecuación extendida de Grübler para grados de libertad

Entonces, considerando que para los mecanismos con solo pares de revoluta se encuentra que $n=8$ eslabones, y pares inferiores o pares de contacto lineal $P_{inf}=10$. Para el caso donde el primer circuito cerrado cinemático fue convertido en un par de engranes, la cantidad de eslabones $n=7$, los pares inferiores $P_{inf}=8$ y pares superiores o de contacto puntual (el que corresponde al contacto entre los dientes de los engranes) $P_{sup}=1$. Entonces, en las ecuaciones 6.4 a) y b):

$$G = 3(8 - 1) - 2(10) - (0) = 3(7) - 20 = 21 - 20 = 1 \text{ gdl} \quad \text{a)}$$

$$G = 3(7 - 1) - 2(8) - 1 = 3(6) - 16 - 1 = 18 - 17 = 1 \text{ gdl} \quad \text{b)}$$

**Ec. 6.4 a) Ecuación Grübler para los mecanismos con sólo pares revolución;
b) Para los mecanismos con par superior de engranes**

Es de recordar que los pares con más de un eslabón conectado se considera +1 en el cálculo de pares a considerar en las ecuaciones de grados de libertad, es decir, si en un nodo se conectan tres elementos, se considera como doble dicho nodo, así como en los mecanismos obtenidos con

engranes, a pesar de eliminarse un eslabón para ambos casos, el contacto superior otorga un elemento más en la naturaleza del mecanismo. Con esto identificado se puede decir que el mecanismo se puede dividir en dos, los engranajes procurarían potencia y entrada por medio de la biela de conexión hacia la segunda mitad la cual sí estará formada por un cuadrilátero articulado.

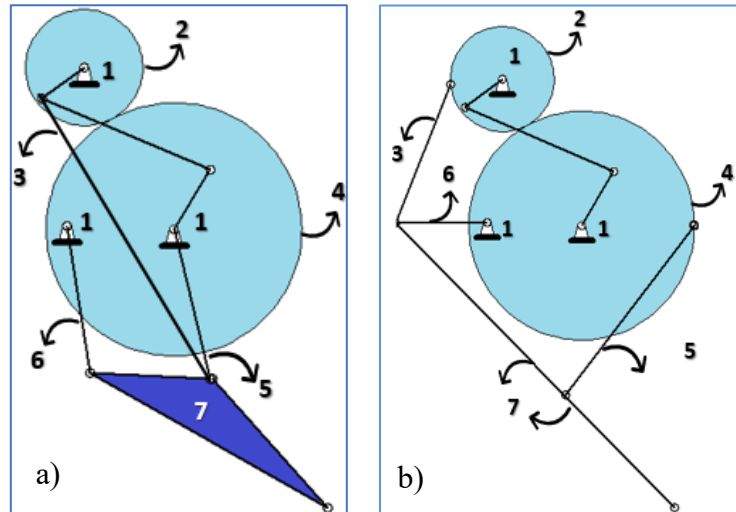


Figura 6.10 Mecanismo de configuración (7,4,1,3) (Izquierda); Mecanismo de configuración (8,2,0,4) (Derecha)

En el primer caso se respeta el eslabón de tres lados o ternario mientras en el segundo continúan los pares binarios.

Cabe destacar que en las figuras arriba, los engranes (de rellenos claros) están exagerados para visualizar la distribución de estos en la transformación de un circuito cerrado de cuatro barras de par revoluta por un par de engranes. Ya que en la figura 6.10 b) el oscilador o eslabón 5 está conectado en el engrane 4, dificultará ciertamente la obtención de dimensiones de cada eslabón, por lo que el modelo ganador obtenido es el de la figura 6.10 a). Esto ya que solamente un elemento emitirá la entrada de movimiento al efector final y será mucho más sencillo el cálculo correspondiente a la síntesis dimensional de la mitad inferior.

La última parte de la síntesis de mecanismos es la denominada síntesis dimensional. Esta busca encontrar las características dimensionales de los eslabones que conforman el mecanismo para que cumplan una determinada tarea. Esta forma, se deriva en tres metodologías diferentes: *guiado de sólido rígido* (el cual se encarga del control de movimiento de una recta perteneciente a un sólido rígido en el plano), *generador de funciones* (el cual establece la posición de un eslabón respecto al de entrada mediante una función $f(x)$ específica) y la *generación de trayectoria* (que consiste en determinar un mecanismo para que un punto específico siga una

determinada trayectoria en el plano). Siendo estas las principales formas de síntesis dimensional en el diseño de mecanismos (Guerra Torres, 2016).

La síntesis de mecanismos para cadenas de cuatro barras tiene como prioridad el comportamiento deseado de la biela o acoplador. En ambos mecanismos propuestos, el elemento de interés es la biela del segundo circuito de cuatro barras, la cual es una representación del antebrazo del perro, el elemento que estará en contacto con el suelo. Para indicarle al mecanismo el movimiento en el plano que llevará a cabo, se realizó un estudio de movimiento consistente en un estudio cinematográfico a un perro de tamaño similar a Milo, esto para respetar las proporciones dimensionales al movimiento realizado por el perro en las fases de caminata y paso vivo, ambos simétricos. Debido a que el análisis depende de un software y hardware especializado que no se encuentra al alcance del autor del presente trabajo de tesis, se realizó una búsqueda de un análisis cinematográfico previo, el cual se muestra en la figura 6.11. El análisis de cambios de posición (variaciones angulares en las juntas) representa el comportamiento descrito en el marco teórico durante el evento móvil de las extremidades delanteras, el cual puede ser descrito como una función respecto a un evento promedio de 2 segundos desde el impulso hasta el retorno de la planta del pie. Dado que estos equipos no están al alcance se tomará como referencia la forma de un estudio previo (SimiSystems, 2009).



Figura 6.11 Estudio cinematográfico para la variación angular de las articulaciones. Tomado de: SimiSystems (2009).

El registro de cada evento se realizó de manera manual y tabulado en cada uno de los mismos respecto a una porción del evento y, considerando que serán los ángulos en el plano descritos por cada parte de la extremidad. Sin embargo, si bien es posible generar un mecanismo a partir de una síntesis de función con los datos obtenidos por el estudio cinematográfico, esta no proporcionará una panorámica adecuada para las dimensiones del primer circuito de en los cuales se encuentran los eslabones 5, 6 y 7. Para poder determinar una dimensión más adecuada se optará por la metodología de síntesis de generación de trayectoria; este trata de situar un punto del acoplador en una serie de puntos sobre una trayectoria ya preestablecida. Por lo general el uso de métodos gráficos ayuda a una mejor visualización de una solución utilizando un máximo

de cinco puntos de precisión, pero es posible obtener un resultado bastante bueno utilizando únicamente cuatro. Como se mencionó, esta trayectoria corresponde a la temporización de los eventos planteados en los diagramas cinemáticos de paso (págs. 26-28). En todos los diagramas de movimiento se consideran las dos etapas: la etapa de aplomo o donde la pata tiene contacto con el suelo y la etapa de balanceo o donde la pata se encuentra en el aire realizando un movimiento curvo. Se puede plantear una serie de trayectorias que cumplan con dichos parámetros, es decir, una trayectoria que sea completamente horizontal en una porción de tiempo y otra que genere una curva en el equivalente o complemento. En las figuras 6.12 a) y b) se muestran dos trayectorias propuestas donde se elegirán los cuatro puntos de precisión para generar los mecanismos, a partir de lo mencionado en la página anterior.

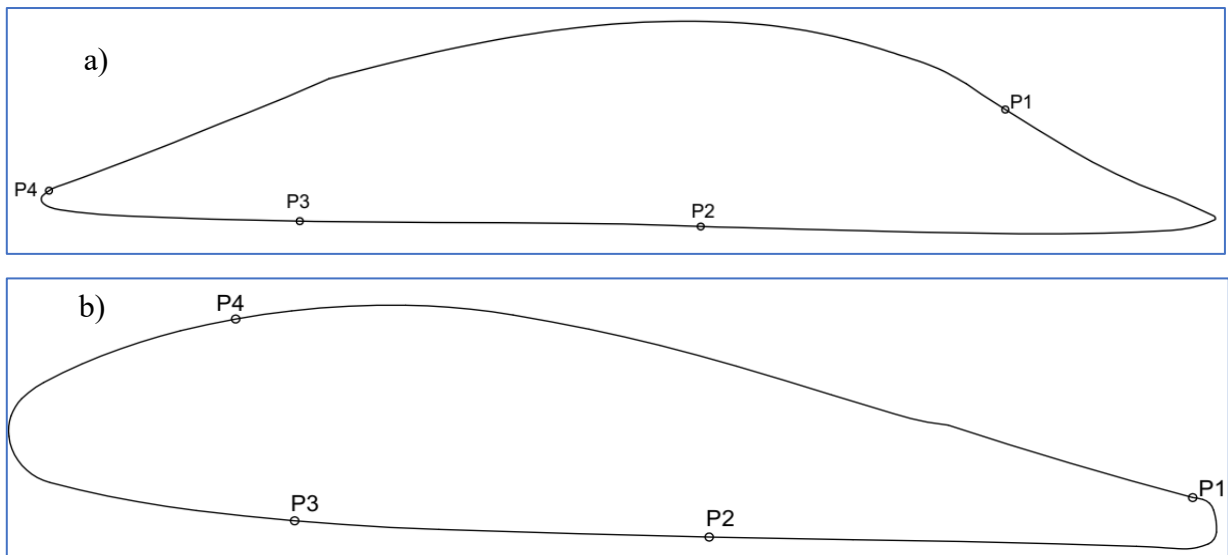


Figura 6.12 a) Trayectoria con máximo en el lado derecho; b) Trayectoria con máximo en el lado izquierdo

Como se puede observar en estas figuras, ambas obedecen las reglas prescritas en los gráficos de movimiento: existe una posición de la trayectoria en donde la pata está en contacto con el suelo y otra correspondiente al momento en donde esta se encuentra en el aire. De acuerdo con las medidas obtenidas de manera empírica a Milo de aproximadamente 58 cm de alto (hasta la cruz), por lo que se puede afirmar que la altura promedio del mecanismo debe estar entre los 30 y los 32 cm de longitud, por lo que este dato debe ser considerado para la biela extendida, ya que el método de generador de trayectoria se basa en ubicar un punto de una biela en la trayectoria y el uso de eslabón ternario es lo más recomendable, además de ser el propuesto en la síntesis de número y tipo.

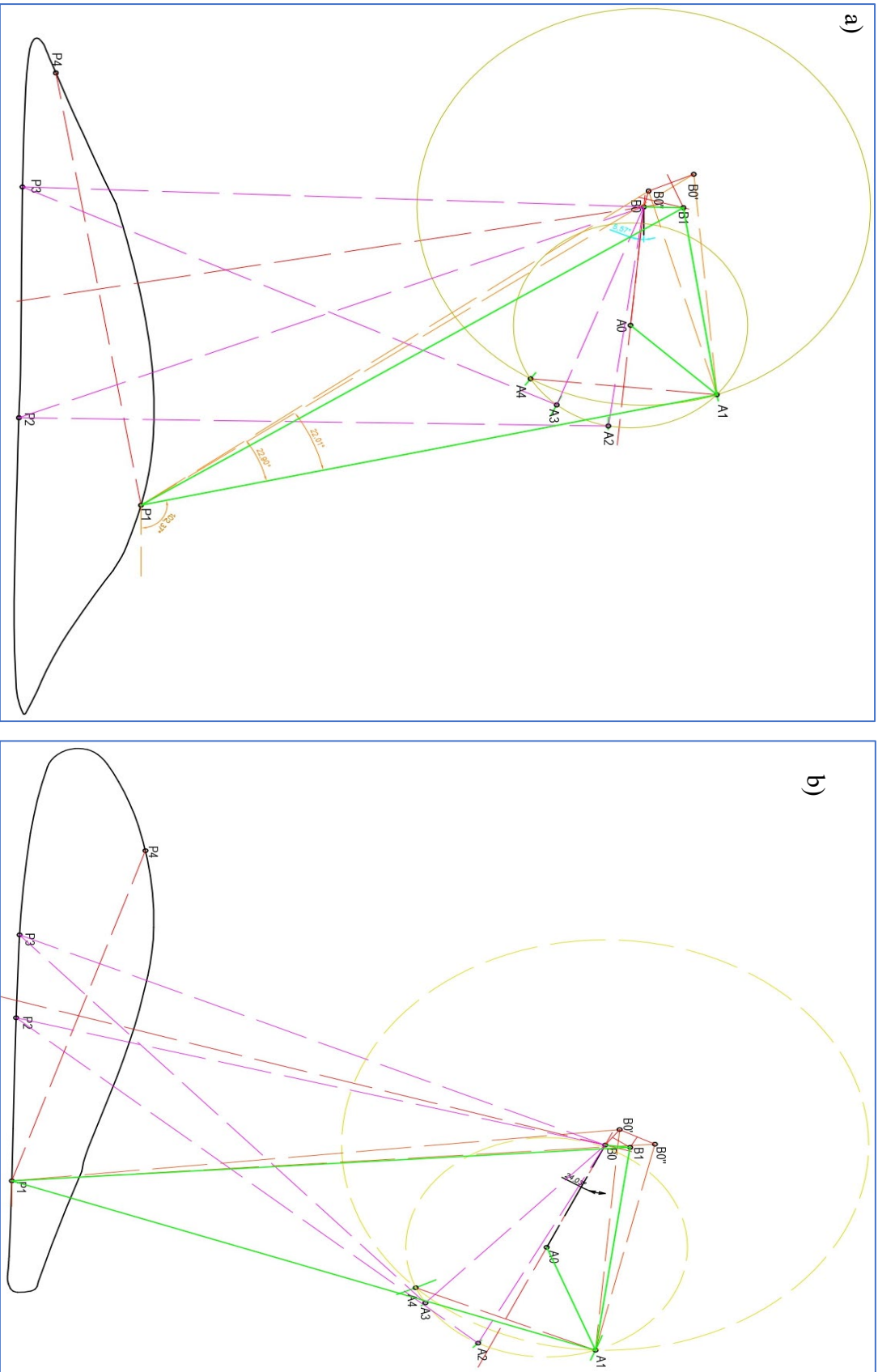


Fig. 6.13 a) Síntesis de trayectorias para máximo a la derecha; b) Síntesis de trayectoria para máximo a la izquierda

Para la base se propone una distancia entre bancadas de 60 mm, los cuales serán colocados en la síntesis gráfica de acuerdo con las medidas del sujeto de prueba. Cabe destacar que el procedimiento de síntesis por generación de trayectoria involucra la consideración de parámetros arbitrarios, tales como la localización primera de los puntos de la rotación del nodo A respecto al nodo A0, sin embargo, este parámetro es únicamente indicativo para garantizar la rotabilidad del eslabón A0A. De las síntesis mostradas en las figuras 6.13 a) y b), los datos de cada eslabón dimensionado se muestran en la tabla 6.3 a continuación:

Tabla 6.3 Dimensiones de los mecanismos obtenidos por síntesis de generador de trayectoria

L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	L4 (cm)	E (cm)	θ1 (°)	α (°)	Mecanismo
6	1.75	9.54	5.2	26	-5.57	19.71	Derecha
6	1.05	10.97	5.87	26	-24.03	24.31	Izquierda

Teniendo estos dos modelos cinemáticos resultantes de la síntesis, sin aún definir cuál de los dos es el diseño ganador a primera instancia, se nos permite evaluar la movilidad de acuerdo con la ecuación de condiciones de Grashof, esto para determinar el tipo de mecanismo con el que estamos tratando y las limitaciones que tendrá al momento de operar. Se presenta entonces, de acuerdo con la tabla de arriba lo siguiente:

Para el mecanismo Derecha. - $s + l < p + q \rightarrow 1.75 + 9.54 < 6 + 5.2 \rightarrow 11.3 > 11.2$

Para el mecanismo Izquierda. - $s + l < p + q \rightarrow 1.05 + 10.97 < 6 + 5.87 \rightarrow 12.02 > 11.87$

Con lo obtenido se puede aseverar que ambos mecanismos son de triple oscilador o mecanismos de tipo No Grashof, sin embargo, las diferencias entre las consideraciones son muy pequeñas (de menos de 0.2), por lo que es posible considerar un pequeño ajuste en los mecanismos es posible llegar a la consideración de Grashof. La condición arbitraria propuesta para la generación de trayectoria (como en todos los métodos de síntesis dimensional de mecanismos), fue la distancia entre los elementos A0 y B0, correspondientes a la bancada del mecanismo, sin embargo, aquí se presenta una problemática, la cual refiere a la capacidad del eslabonamiento de generar la trayectoria prescrita, por lo que con este ajuste se debe analizar la trayectoria. Retomando las condiciones cinemáticas de las gráficas de movimiento, el más importante es el movimiento recto sobre la mitad del evento por pata, por lo que siempre que se mantenga esta trayectoria recta (en el caso de perros de razas grandes es de 35-40 cm aproximadamente) el mecanismo se considerará como correcto. Las nuevas medidas se presentan en la tabla 6.4.

En las figuras 6.14 a) y b) se encuentran los mecanismos ya ajustados, para verificar que estos atienden al requerimiento que se planteó arriba se someterá a un análisis cinemático; de no atender estas características, se reiniciará el proceso de síntesis de tal manera que esta atienda a la trayectoria recta, refiriendo al proceso iterativo en el diseño de ingeniería.

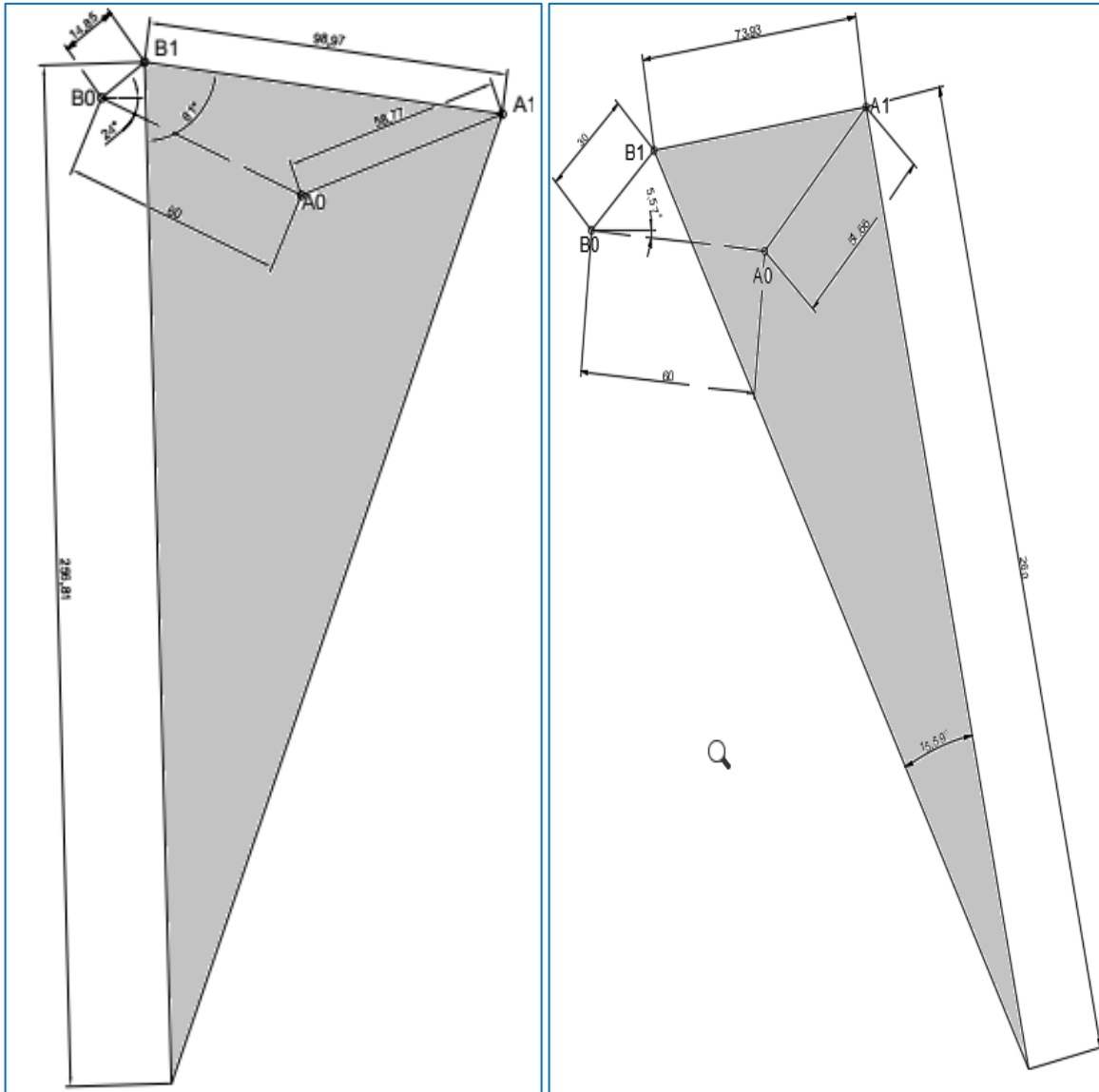


Figura 6.14 a) Mecanismo ajustado para el mecanismo Izquierda; b) Mecanismo ajustado para el mecanismo Derecha
Se realiza de nuevo el cálculo para las condiciones de Grashof:

Para el mecanismo Izquierda. - $s + l < p + q \rightarrow 1.48 + 9.89 < 6 + 5.87 \rightarrow 11.37 < 11.87$

Para el mecanismo Derecha. - $s + l < p + q \rightarrow 3 + 7.39 < 6 + 5.16 \rightarrow 10.39 < 11.16$

Tabla 6.4 Dimensiones de los mecanismos ajustados

L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	L4 (cm)	E (cm)	θ_1 (°)	α (°)	Mecanismo
6	3	7.39	5.16	26	-5.57	15.59	Derecha
6	1.48	9.89	5.87	26	-24	18.59	Izquierda

Para el caso del segundo circuito, el correspondiente al par engranado, es donde se generará el posicionamiento angular derivado del estudio cinematográfico. Para el dimensionamiento de los círculos primitivos (radios) es posible utilizar la síntesis de función partiendo de la premisa de que el cambio de posición angular se da por una relación entrada salida entre el hombro y el codo. La síntesis de generador de función actúa como una caja negra, en donde la salida de datos está relacionada con un comportamiento preestablecido a partir de la entrada de datos, a través del establecimiento de puntos de precisión para la función. Utilizando el estudio obtenido del análisis y tabulando los datos tanto de la relación de entrada como de salida (hombro-codo) y utilizando el software matemático Matlab® con su herramienta de análisis de datos *Curve Fitting* con el fin de obtener un comportamiento matemático que describa de la mejor manera la relación del movimiento, optándose por facilidad de operación y comprensión un comportamiento polinomial de quinto grado en una escala de tiempo de aproximadamente 2 segundos de evento.

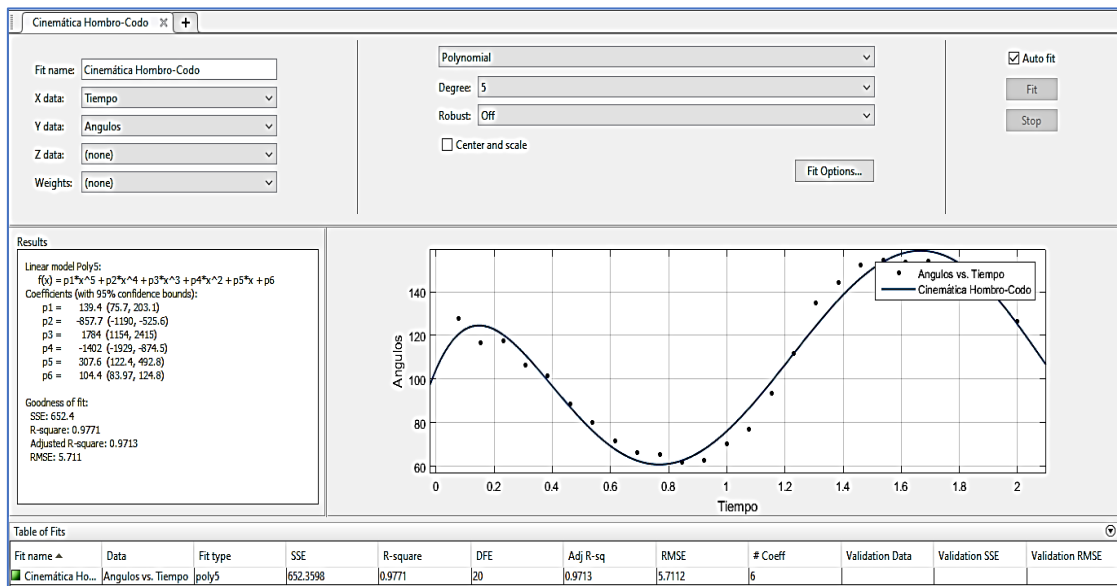


Figura 6.15 Interfaz del *Curve Fitting* para obtención del comportamiento de la función, así como la misma función polinomial

En la figura 6.15 se muestra la obtención de la ecuación 6.5, el cual demuestra la función mostrada en la figura 6.16, de donde se seleccionarán los puntos máximos y mínimos de acción del mecanismo de cuatro barras que seguido de la síntesis será transformado en un par engranado.

Para la ecuación obtenida por aproximación polinómica, se obtuvieron los siguientes coeficientes dada la ecuación polinomial $a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} \dots + a_1 x + a_0$

Para la función polinomial de quinto grado, los coeficientes son: $a_5 = 139.4$; $a_4 = -857.5$; $a_3 = 1784$; $a_2 = -1402$; $a_1 = 307.6$; $a_0 = 104.4$; así se sustituyen los parámetros en la ecuación:

$$f(x) = 139.4x^5 - 857.5x^4 + 1784x^3 - 1402x^2 + 307.6x + 104.4$$

Ec. 6.5 Función para la relación de desplazamiento angular hombro-codo

La gráfica generada para esta función es la siguiente:

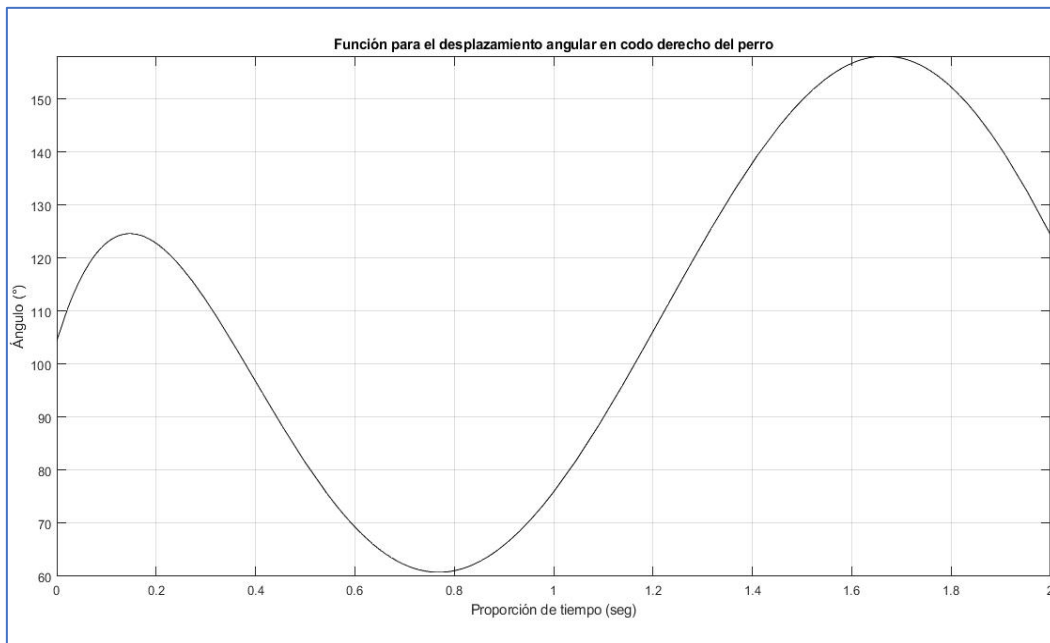


Figura 6.16 Gráfica de la función de desplazamiento angular hombro-codo

Esta es una función ideal propuesta, siendo que se ha elegido una de fácil determinación y cálculo para la realización de la síntesis, la cual depende de dos conceptos propios: espaciamiento en la función de los puntos de precisión y obtención de las soluciones lineales para la *ecuación de Freudenstein*, la cual relaciona vectorialmente las posiciones de cada eslabón del cuadrilátero articulado. Para el primer paso, el denominado *espaciamiento de Chebyshev* es de utilidad para dar una proporcionalidad para un máximo de cinco puntos de precisión; para estos es necesario determinar un punto mínimo y uno máximo donde se van a

localizar dichos puntos de precisión. Esta se calcula con la ecuación 6.6 a) basado en la inscripción de un polígono de seis lados en un círculo, con ello podemos reducir el error estructural o error entre la función calculada y lo obtenido al momento de realizar la síntesis; esto tanto para los valores de entrada como los de salida (los cuales se obtienen evaluando los puntos de precisión). El siguiente paso es la obtención de un parámetro denominado *factor de escala*; este factor relaciona un determinado intervalo de acción para el eslabón de entrada y el de salida con la diferencia de los puntos máximos y mínimos de las entradas y las salidas; la ecuación puede observarse en la 6.6 b). Finalmente, para la denominada *ecuación de Freudenstein* para cada punto de precisión, se involucran el espaciamiento y el factor de escala como se muestra en la ecuación 6.6 c), lo que derivará en un sistema de ecuaciones de tres por tres, fácilmente solucionable por los métodos conocidos en la ingeniería.

$$x_i = 1/2(x_0 + x_{n+1}) - 1/2(x_{n+1} - x_0) \left[\frac{\cos(\pi(2i - 1))}{2n} \right]; i = 1, 2, \dots, n \quad \text{a)}$$

$$R_\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}; R_\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta y} \quad \text{b)}$$

$$K_1 - K_2 \cos(\varphi_i) + K_3 \cos(\theta_i) = -\cos(\varphi_i - \theta_i) \quad \text{c)}$$

Ec. 6.6 a) Ecuación de espaciamiento de Chebyshev para n puntos de precisión; b) Ecuaciones de factor de escala para entradas y salidas; c) Ecuación de Freudenstein para cada punto de precisión

El cálculo manual de la síntesis por generador de función es bastante engorroso y puede tender a errores al operarlo, por lo que para este trabajo se optó por la generación de un código en lenguaje C (en Anexo 2) para el cálculo de todos los parámetros, así como la solución del sistema de ecuaciones para la obtención de las constantes de Freudenstein y el cálculo del dimensionamiento de los cuatro eslabones. Todo esto depende en gran medida de que se conozcan los parámetros iniciales tales como los intervalos de acción $\Delta\varphi$ y $\Delta\theta$ para las entradas y las salidas, así como un ángulo de inicio. Para esto se recurrió a un estudio previo realizado en perros de razas grandes (Gillette & Angle, 2012) donde se encuentran estos parámetros para cada una de las extremidades y cada articulación. Estos datos son los que se usarán para el cálculo: $\Delta\varphi=34.81^\circ$; $\Delta\theta=59.59^\circ$; $X_0=118.2^\circ$ como parámetro de entrada (hombro) y $Y_0=95.65^\circ$ como parámetro de salida (codo).

Al ejecutar el programa este proporciona los siguientes puntos de precisión en el eje x si se considera un límite en la función de $0.8 \leq x \leq 1.7$: $x_1 = 0.860$; $x_2 = 1.25$; $x_3 = 1.64$ y evaluando

en la función, junto con los límites: $y_0 = 61.055$; $y_1 = 63.274$; $y_2 = 114.559$; $y_3 = 157.85$ y $y_4 = 157.687$. De estos parámetros se obtendrá los factores de escala $R_\varphi = 38.678$ y $R_\theta = 0.617$. Y con esto se puede obtener la matriz de ecuaciones de Freudenstein para los tres puntos de precisión obtenidos en el espaciamento:

$$\begin{pmatrix} K_1 & 0.508 * K_2 & -0.122 * K_3 : -0.917 \\ K_1 & 0.715 * K_2 & -0.625 * K_3 : -0.993 \\ K_1 & 0.872 * K_2 & -0.909 * K_3 : -0.997 \end{pmatrix}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones para obtener los coeficientes que serán usados para la obtención del dimensionamiento del cuadrilátero articulado superior al mecanismo completo por el método de Gauss-Jordan se tiene: $K_1 = -1.3425$; $K_2 = 0.9697$ y $K_3 = 0.5502$. De acuerdo con las ecuaciones de Freudenstein para calcular la longitud de los eslabones del cuadrilátero articulado, se tiene las ecuaciones 6.7 a-c) que parten de la relación vectorial de todos los puntos o articulaciones del mecanismo.

$$K_2 = \frac{l_1}{l_2} \rightarrow l_2 = \frac{l_1}{K_2} = \frac{5}{0.9697} = 5.1561 \quad \text{a)}$$

$$K_3 = \frac{l_1}{l_4} \rightarrow l_4 = \frac{l_1}{K_3} = \frac{5}{0.5502} = 9.0882 \quad \text{b)}$$

$$l_3 = \sqrt{(5)^2 + (5.156)^2 + (9.088)^2 - 2(5.156)(9.088)(-1.3425)} = 16.124 \quad \text{c)}$$

Ec. 6.7 a) Ecuación para la obtención del eslabón I2; b) ecuación para la obtención del eslabón I4 y c) Ecuación para la obtención del eslabón I3

Con esto es posible evaluar un mecanismo que tiene las dimensiones considerables para un espacio semi reducido. Se optará para este esquema reducido el uso de un par de engranes cónicos, esto para optimizar el espacio dentro del control como se muestra en los artes conceptuales. La viabilidad de ambas síntesis se verificará en el siguiente apartado, donde se seleccionará el diseño ganador a través del análisis cinemático.

Análisis cinemático de posición para validar trayectorias en el diseño propuesto

El análisis en la cinemática de máquinas corresponde a la obtención de los datos de posicionamiento, velocidades y aceleraciones en los eslabones y nodos dentro de los mecanismos. Esto es consecuencia de la síntesis mecánica que relaciona las dimensiones de cada eslabón y su posición en el plano.

Como se mencionó en la sección anterior, el mecanismo de prótesis completo se ha dividido en dos para poder atender dos problemáticas cinemáticas importantes: la tasa de variación de

posición del eslabón del codo referente al de la escápula (este punto se decidió por la relación de los movimientos de elevación y depresión que tienen los músculos de la articulación del hombro respecto al resto de la extremidad), el cual se pretende generar a través de un par engranado; y la generación de un mecanismo de cuatro barras cuyo efector final trazará una trayectoria determinada por el comportamiento mecánico del pie del perro en un ciclo de movimiento completo. Para determinar la eficacia de los dos mecanismos mostrados en la página 68 del presente trabajo, se ha considerado la formulación vectorial propuesta en la teoría vectorial de Freudenstein, en la cual se relacionan un ángulo de entrada (θ) por lo general en la manivela, el ángulo de salida correspondiente (ϕ), el ángulo de biela de arrastre (ψ) así como las dimensiones de los eslabones, resultando en un sistema en función de ángulos y dimensiones $f(a, h, b, q, \theta, \psi, \phi)$. Se consideran estas como posiciones vectoriales relacionados por los nodos del cuadrilátero articulado tal como se muestra en la figura 6.17. Lo anterior es la base para el análisis cinemático de posición y desplazamiento donde, con una posición de entrada se determinará la localización de todos los puntos del mecanismo en un instante de tiempo predeterminado; la notación vectorial de la posición relativa del nodo de la diada h_i y b_i es el que determinará todo el análisis.

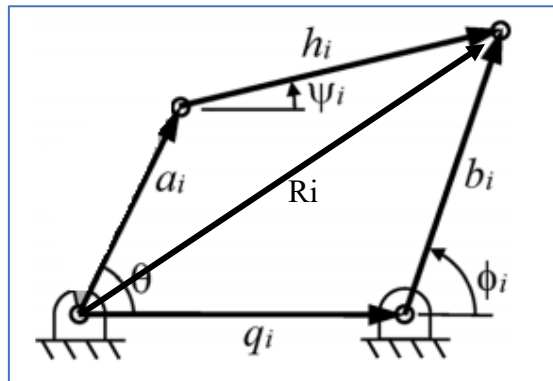


Figura 6.17 Diagrama vectorial del mecanismo articulado de cuatro barras. Tomado de: Hessein (2017). *The Synthesis of Function Generating Mechanisms for Periodic Curves Using Large Numbers of Double-Crank Linkages*

Siendo que la posición de interés es el nodo entre b_i y h_i puede ser tanto relativa al vector a_i y el vector h_i , como de los vectores b_i y q_i , se tiene entonces que $R_i = a_i + h_i$ como una suma vectorial mostrada en el triángulo de posiciones. Estas posiciones derivan en una relación entre eslabones y posiciones que dan origen a las ecuaciones de Freudenstein utilizadas en la síntesis de generación de función. Para evitar el engorroso procedimiento de obtención de posición, el cual se puede encontrar en cualquier texto sobre cinemática de máquinas, aquí se mostrará únicamente una pequeña ecuación que servirá para la obtención la posición angular final del

eslabón seguidor (ya sea manivela y oscilador) en la ecuación 6.8. Esta ecuación está definida por literales, las cuales, surgen del proceso de análisis vectorial ya mencionado.

$$\theta_4 = \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right) \pm \cos^{-1}\left(\frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right)$$

Ec. 6.8 Ecuación de posición angular del seguidor respecto a la horizontal

Donde $A = 2l_2l_4 \cos(\theta_2) - 2l_1l_4$, este relaciona la componente horizontal de los eslabones respecto al ángulo de entrada y el nodo de la diada del seguidor; $B = 2l_2l_4 \sin(\theta_2)$, este relaciona la componente vertical respecto al ángulo de entrada y el nodo de diada de seguidor y finalmente $C = l_1^2 + l_4^2 + l_2^2 - l_3^2 - 2l_1l_2 \cos(\theta_2)$. El dato del desplazamiento angular del seguidor es necesario para el cálculo del ángulo resultante entre el eslabón de la biela y la horizontal, mostrado en la ecuación 6.9; la cual también es definitoria para la posición del efector final en un mecanismo con una biela de topología bidimensional, el cual es nuestro caso. Para determinar estas ubicaciones en el plano también se debe considerar si existe un ángulo entre las bancadas; estas se originan de la síntesis de generación de trayectorias (en el caso de haber obtenido esta topología por la consideración del diseñador).

$$\theta_3 = \tan^{-1}\left(\frac{l_1 \sin(\theta_1) + l_4 \sin(\theta_4) - l_2 \sin(\theta_2)}{l_1 \cos(\theta_1) + l_4 \cos(\theta_4) - l_2 \cos(\theta_2)}\right)$$

Ec. 6.9 Ecuación de posición angular de la biela respecto a la horizontal

Dadas las ecuaciones se puede generar un algoritmo de apoyo para poder graficar las trayectorias. Por lo general cuando se realizan gráficas de análisis de posición en mecanismos es sobre la gráfica de comportamiento de posiciones en X y Y, es decir, su relación. Sin embargo, es posible graficar la trayectoria considerando el efector final y la geometría de la biela. El programa (cuyo código se encuentra en el Anexo 2 de programas) solicita las dimensiones de los eslabones, así como los grados de la biela entre el lado L3 y el cateto adyacente, el ángulo ente bancadas y el ángulo de inicio para conocer el de salida. Con un vector de 360 grados para el giro completo de la manivela y estos serán los puntos que se van a graficar. En las figuras 6.18 y 6.19 se muestra el resultado para los mecanismos Derecha e Izquierda. Como se puede observar, el mecanismo Derecha presenta una pequeña porción completamente recta de casi diez centímetros y un levantamiento de aproximadamente también diez centímetros; en tanto que para el mecanismo Izquierda se puede observar que no existe una

posición completamente recta pero la horizontalidad es más constante a diferencia del primero, por lo que con esto se puede considerar al mecanismo Izquierda como el mecanismo ganador.

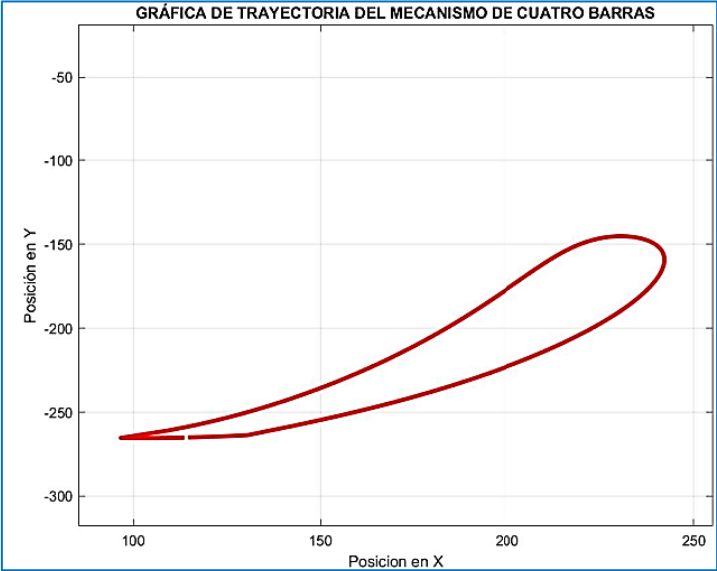


Figura 6.18 Trayectoria generada por el mecanismo Derecha

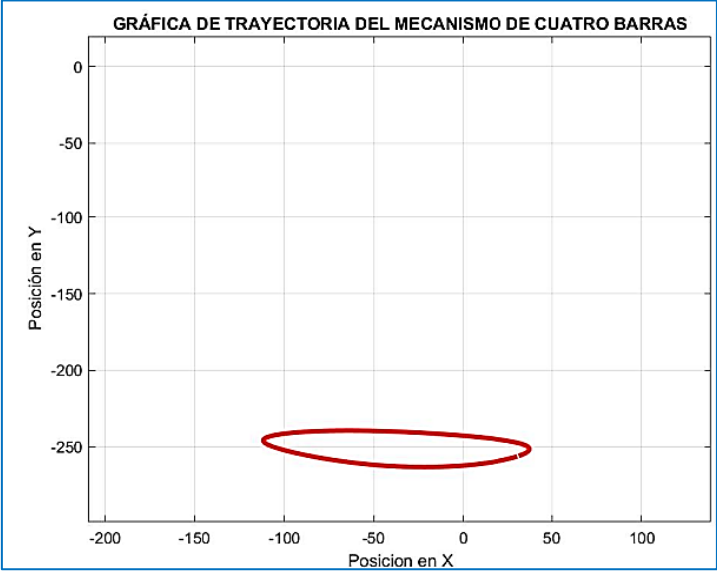


Figura 6.19 Trayectoria generada por el mecanismo Izquierda

Ahora, es importante mencionar ciertas cuestiones antes de continuar. Siendo que la selección de grados de libertad que se tomó para determinar el tipo de mecanismo que se plantea desarrollar como protético se redujo de 2 (considerando que el perro Milo aún conserva la articulación del hombro y presenta un muñón en la zona distal de su escápula) a 1, las razones no fueron explicadas. Se ha tomado esta decisión considerando la delimitación de la problemática, complicación que se le presentó al autor de este trabajo al iniciar las investigaciones sobre el marco y necesidades teóricas: recursos, conocimientos y tiempo.

Siendo este un proyecto de desarrollo, los recursos financieros y económicos estaban bastante limitados, además de que la magnitud de los temas que se desarrollan en este apartado del trabajo requiere de una amplia documentación por parte del autor sobre temas que, al iniciar el proyecto, eran de conocimiento si no básico, técnicamente desconocidos pero que era esenciales para el diseño y generación de los sistemas a utilizar, siendo estos los menos. El uso de mecanismos de 1 GDL y cerrados, así como su análisis y determinación son temas ya conocidos a nivel licenciatura, por lo que se primó el uso de este tipo por su facilidad de síntesis y análisis contra los mecanismos abiertos de más de 2 GDL, más complicados.

Continuando, sobre el mecanismo Izquierda se realizará los análisis de velocidad y aceleración con el fin de determinar el comportamiento del mecanismo a nivel cinemático. Cabe destacar que en este apartado es necesario indicar un sistema de transmisión de potencia mecánica, el cual es un actuador electromecánico que proporcionará la velocidad y el torque necesario para los fines del proyecto.

Propuesta de actuador de potencia mecánica para transmisión

Es necesario recordar que el comportamiento del mecanismo, el cual será accionado por el actuador electromecánico, se encuentra descrito por la velocidad y la aceleración que tienen sus nodos y puntos de interés. En un mecanismo articulado es importante considerar los efectos que provocan tanto las velocidades como las aceleraciones angulares. Estas son descritas como la tasa de cambio de la posición angular de un punto determinado del mecanismo sobre un radio de giro en un tiempo determinado ($\frac{d\theta}{dt} = \omega$). Un ejemplo es qué tan rápido se mueve el nodo A de un mecanismo articulado de manivela en dos segundos. Y junto con este concepto se encuentra la aceleración angular, la cual se puede describir como la tasa de cambio de la velocidad angular respecto al tiempo ($\frac{d\omega}{dt} = \alpha$), este como un valor significativo para conocer las condiciones de la aceleración centrífuga, ya que es uno de los componentes de la aceleración lineal de un punto del mecanismo (Beer & Johnston, 1973).

Uno de los elementos electromecánicos más utilizados en la robótica y en todo tipo de industria tanto mecánica como electrónica en la actualidad son los motores de CD, debido a su eficiencia, bajo coste y capacidad de alimentación por fuentes de voltaje de bajo coste energético y tamaño. Entre estos existen diferentes tipos de motores los cuales han sido diseñados para diversas aplicaciones. Para el caso de este proyecto el tipo de motor que se ha elegido por su tamaño, eficiencia, velocidad de accionamiento y torque generado, es el servomotor.

Un servomotor es un tipo de motor de CD el cual posee en su interior un tren de engranajes con el que se puede controlar el giro de su rotor en un rango entre 0 y 180 grados. Es alimentado con un voltaje que va desde 5 a 6 volts y que puede obtener alguna pequeña variación (aunque significativa) de algunos de sus parámetros de operación. Como se muestra en la figura 6.20, el motor posee tres cables de conexión: tierra, alimentación y un cable de control o señal, este último se puede conectar a la salida de un microcontrolador el cual envía una señal conocida como modulación de ancho de pulso o PWM por sus siglas en inglés (Tojeiro Calaza, 2012). Esta señal se tratará en el apartado de control.



Figura 6.20 Servomotor con sus cables de conexión

Este tipo de actuador es de fácil programación ya que depende única y exclusivamente de la variación en el ancho de pulso enviado por un microcontrolador para variar el ángulo de operación en el que trabaja, por lo que el objetivo de este proyecto, como se mencionó, es el de controlar los ángulos que proporciona la entrada del mecanismo, es decir, el ángulo proporcionado por el hombro de la extremidad opuesta a la que se realizará el prótesis.

En el mercado existen diversos tipos de servomotores, entre los cuales destacan el tipo mini. Estos son reducidos en tamaño, proporcionan buenos torques para aplicaciones pequeñas y su coste no es muy elevado. El autor de este trabajo ha propuesto cuatro de los motores más comunes de este tipo que se pueden encontrar, realizando una tabla comparativa (tabla 6.5) tanto en coste como en torque y velocidad de operación, se pretende obtener los parámetros de velocidad para el análisis cinemático y el torque para el análisis dinámico realizado más adelante.

Tabla 6.5 Tabla comparativa de los servomotores a utilizar. Fuente: Naylampmechatronics.com y Sandorobotics.com para la ficha técnica. MercadoLibre.com para los precios.

MOTOR	MODELO Y MARCA	COSTE (MXN)	TORQUE (Kg/cm)	VELOCIDAD (seg/deg)
	SG5010 <i>TowerPro</i> ®	\$95.00	6.5	0.4/60
	MG995 <i>TowerPro</i> ®	\$104.00	11	0.16/60
	MG996r <i>TowerPro</i> ®	\$99.00	10	0.16/60
	S3003 <i>Futaba</i> ®	\$90.00	4.1	0.4/60

Así, a partir de los datos de las características de los servomotores, es posible calcular los datos cinemáticos angulares de cada uno para conocer el comportamiento. Para esto es necesario realizar algunas suposiciones que, si bien restan exactitud al diseño del dispositivo, es posible su uso para obtener de manera matemática estos datos.

Para poder realizar estas suposiciones es necesario tomar en consideración el sistema de potencia propuesto en la síntesis de tipo donde se ha propuesto el uso de un sistema engranado que partirá desde el servomotor.

Generación del sistema mecánico de transmisión de potencia

Uno de los elementos mecánicos más útiles para transmitir potencia desde un eje a otro es el engrane. Estos son elementos de máquinas también conocidos como ruedas dentadas especialmente usados por su precisión y eficiencia, la cual es capaz de alcanzar el 98% de la potencia mecánica transmitida (Guerra Torres, 2016). Así, las ruedas dentadas se pueden determinar utilizando su relación de velocidad y los diámetros primitivos, ya que el uso de los engranes es más común en la reducción o aumento de la velocidad de un eje hacia otro. El estudio cinemático de los engranes está basado en tres factores o parámetros: número de dientes, velocidades angulares y radios primitivos. Una complicación que podemos encontrar para esta aplicación es la forma en que estas ruedas de contacto puntual se van a montar en el prótesis. El utilizar engranajes rectos y cilíndricos presentaría varios problemas, entre los que se encuentra el espacio en donde se montará el par engranado y la restricción de movimiento del piñón, el cual es el que estará acoplado al actuador. El servomotor únicamente puede dar 180° por lo que este tipo de engranes, a pesar de ser el tipo más sencillo de diseñar, presenta problemáticas para esta aplicación.

Para resolver la primera problemática es posible acoplar dos ejes perpendiculares gracias a los engranes cónicos; analizando este tipo de acoplamiento es posible visualizar que existe entre dos conos lisos con un contacto puntual entre ellos, elementos de rodadura pura al igual que los cilindros dentados, por lo que, para la reducción de espacio de acoplamiento, esta síntesis de tipo ha sido adecuada. Para la segunda cuestión, se puede considerar un engranaje cónico recto y con dos engranes igualmente cónicos, es posible generar un movimiento de levantamiento de la biela de mayor tamaño a través de este acople. Aquí se genera una hipótesis interna sobre el sistema mecánico del prótesis: la posibilidad de generar medios engranes, de forma similar a la de la leva, la cual podrá producir un giro completo dividido en dos eventos: el avance del piñón y su retroceso.

Con esto se refiere construir dos eventos para un piñón y engrane individuales que comparten un mismo eje, el cual impulsará la manivela del cuadrilátero articulado inferior.

Para crear estos acoplamientos podemos tomar en cuenta lo obtenido en el generador de función. Siendo que esta es una relación de radios, no es necesario tomar estos como radios primitivos, ya que la generación de este depende del concepto de ángulo de presión, referente al ángulo de contacto en el que se encuentran los dientes de los engranes, por lo que no es posible tomar de manera literal el concepto mencionado en la página 61 de este trabajo. Se considerará los datos

obtenidos como una relación de velocidades descrita en la ecuación 6.10, donde se obtendrán los perfiles. La determinación se muestra a continuación:

$$\frac{\omega_P}{\omega_G} = \frac{N_G}{N_P} = \frac{D_G}{D_P} = \frac{9}{5} \approx \frac{10}{5} = 2$$

Ec. 6.10 Relación de velocidad de par engranado. Numerador corresponde al conducido (G) y denominador al conductor (P)

Esta es la relación cinemática básica de todo par engranado. Con esto se posibilita generar un perfil de rueda para ambos casos. En el caso particular de este mecanismo habrá un piñón o conductor y dos conducidos o engranados. Por lo general el piñón es el de menores dimensiones, sin embargo, el estudio de velocidades nos permitirá determinar el comportamiento del efector final fácilmente analizable con el programa realizado para dicho fin en el Anexo 2 de programas. Ya que los dos conducidos se encuentran sobre el mismo eje y solamente se encontrarán alternados con la envolvente del piñón al momento del retroceso de este, basta con calcular dos perfiles. Para la generación de los ángulos primitivos de contacto se debe tomar en cuenta que la relación de velocidad y sus equivalencias determinan el ángulo del elemento directamente proporcional en número de dientes; siendo que el ángulo entre los ejes es de 90° la ecuación 6.11 a) y b) se aplicará para determinar el contacto del par.

$$\tan \gamma_G = \frac{D_G}{D_P} = \tan^{-1} \frac{10}{5} = 63.435^\circ \quad \text{a)}$$

$$\tan \gamma_P = \frac{D_P}{D_G} = \tan^{-1} \frac{5}{10} = 26.565^\circ \quad \text{b)}$$

Ec. 6.11 Ángulos primitivos de los conos en contacto a) Ángulo primitivo de la rueda; b) Ángulo primitivo del piñón

Con esta relación se está obteniendo un reductor de velocidad, sin embargo, es posible determinar el comportamiento cinemático una vez esté concluida la construcción del elemento. Por lo que es posible determinar un número de dientes a partir de una cantidad arbitraria pero acorde a la relación de velocidades. Así, si se selecciona para el conducido un número de dientes Z_G es de 24, la relación determinará que $\frac{\omega_G}{\omega_P} = 2 = \frac{Z_P}{Z_G}$, entonces el número de dientes del piñón será de 12. Seguido de esto es necesario conocer el radio de paso, este depende enteramente del módulo del engrane, el cual corresponde al parámetro obtenido al dividir el número de dientes entre el paso circunferencial; es decir, el número de dientes por pulgada del diámetro del círculo de paso (Guillet, 1973), el cual es el que se requiere para continuar la construcción del perfil.

Ya que se requiere un diámetro menor a 10 cm para ambos casos, nos podemos auxiliar de una galga de pasos diametrales normales, los que se muestran en la figura 6.21, de la cual seleccionamos un paso diametral normal de 12 dientes/plg. La determinación de los diámetros de paso y, por consiguiente, los radios, para el perfil de las ruedas cónicas se presenta en la ecuación 6.12 a) y b), considerando el módulo $m=2$ por la relación entre dientes.

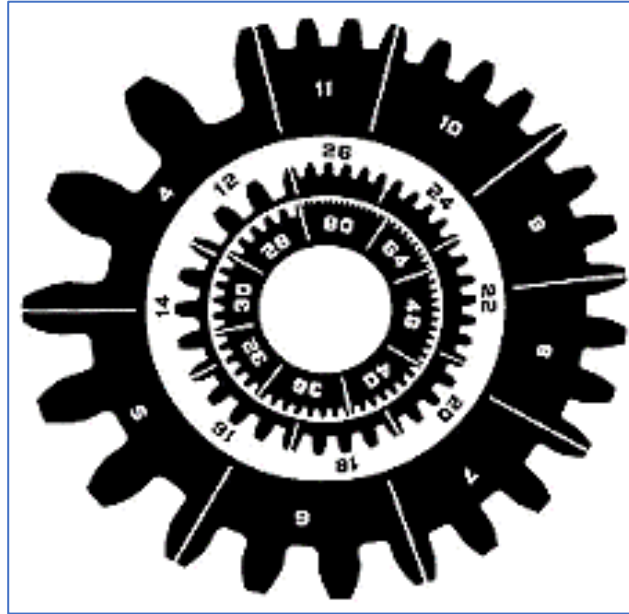


Figura 6.21 Galga de dientes con pasos diametrales normalizados.

$$D_p = m * Z_p = (2) * (12) = 24 \text{ mm} \quad \text{a)}$$

$$D_G = m * Z_G = (2) * (24) = 48 \text{ mm} \quad \text{b)}$$

Ec. 6.12 Diámetros primitivos de los conos en contacto a) Diámetro primitivo de la rueda;

b) Diámetro primitivo del piñón

De las características geométricas derivadas del número de dientes por paso en la circunferencia es posible determinar los demás elementos del perfil. Si se puede considerar estos como un corte en el plano alzado del arreglo de engranes, las dimensiones faltantes son la altura de la cabeza de los dientes y el fondo del mismo. Por lo que para estas dimensiones son posibles de obtener por las ecuaciones 6.13 y 6.14 considerando el diámetro de los pasos ya considerados y el módulo, el cual obedece la relación $ha = 1/p$, es decir, la relación inversa del valor del paso diametral de la galga en pulgadas. Para conocer el valor en sistema métrico solamente se tiene que convertir el valor a milímetros.

$$h_{ap} = \frac{1}{P} = \frac{1}{12 \frac{\text{dientes}}{\text{pulgada}}} = 0.08334 \text{ plg} \approx 2.11667 \text{ m}$$

Ec. 6.13 Ecuación de la altura de cabeza del diente a partir del círculo de paso

$$h_{fp} = \frac{1.157}{P} = \frac{1.157}{12} = 0.0964 \text{ plg} \approx 2.449 \text{ mm}$$

Ec. 6.14 Ecuación del fondo del diente a partir del círculo de paso

Así, se ha generado el perfil del acoplamiento engranado, el cual se puede visualizar en la figura 6.22. En el Anexo 3 de planos y diagramas se muestra de manera detallada estos perfiles completamente acotados.

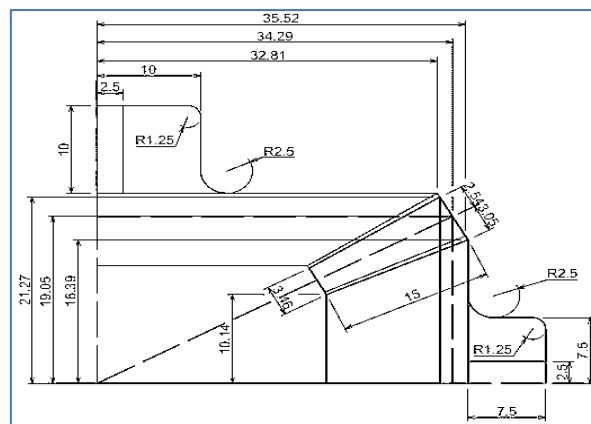


Figura 6.22 Perfil de los engranes obtenido de piñón (gris) y el conducido (negro)

Siendo que los diámetros obtenidos tanto el de paso, como el de la cabeza de los dientes y el fondo del perfil del diente mostrados en el plano 1 del Anexo 3 son únicamente para los perfiles cónicos, es necesario generar el perfil del diente correspondiente a las características de la envolvente espiral. Una técnica sumamente útil para la generación de perfiles de diente en los perfiles cónicos es la conocida como Aproximación de Tredgold; la cual consiste en generar un modelo geométrico para un engrane cilíndrico de acuerdo con los parámetros obtenidos desde el cono posterior, es decir, el punto de intersección de la línea media del engrane y una línea extendida con origen desde la punta de la cabeza del diente del engrane desde el lado exterior del perfil (Budynas & Nisbett, 2019). En la figura anterior es posible ver la formación de los conos primitivos; en el engrane conducido (derecha) el cono es formado por el ángulo primitivo $\gamma_P=26.565^\circ$ y el ángulo primitivo del conductor (abajo) por $\gamma_G=63.435^\circ$. El método de Tredgold requiere el radio generado por el cono posterior para realizar el cálculo, es por ello que la relación $r'_{bP} = D/2\pi * \gamma_{G/P}$ es utilizada para la creación del perfil del diente. Esta metodología

se presenta realiza para formar el conductor y el conducido y se presenta la generación gráfica en los documentos correspondientes en los anexos. Al realizarse el componente mecánico en un software CAD 3D, se ha encontrado la dificultad de generar un movimiento de giro completo para un actuador que genera únicamente 180°; sin embargo, la misma relación de radios primitivos realizará este giro por lo que es menester la generación del control para conseguir estos giros completos, lo que se tratará en la sección correspondiente al control. Se planeaba que el montaje de engranaje cónico recto fuera compuesto de los medios engranes, sin embargo, este proceso dificultaría el montaje; se propondrá en futuros trabajos el empleo de los medios engranes en un futuro prototipo del prótesis. Los documentos dimensionales mecánicos para ambos engranes se encuentran en el Anexo 3.

Análisis de velocidad y aceleración de un prototipo de prótesis

Con los datos cinemáticos obtenidos es posible determinar las condiciones que entrarán al circuito articulado inferior al sistema de potencia. Para conocer las condiciones de entrada volvemos a la relación de velocidad de los engranes. A partir de la tabla 6.5 se consideran los datos para las velocidades angulares y, a su vez, las aceleraciones angulares del motor. Siendo el punto de partida $\theta_0=0^\circ$ y una velocidad angular inicial, al estar el eje en reposo en el instante $t=0$ de $\omega_0=0$ [rad/s]. Considerando las ecuaciones cinemáticas mostradas en las ecuaciones 6.15 a) y b) para la aceleración y la velocidad angular respectivamente, para cada uno de los motores se muestran los parámetros en la tabla 6.6. Considérese el tiempo como el indicado en la velocidad de la tabla anterior para un $\theta=60^\circ \approx \theta=1.047$ rad.

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \rightarrow \alpha = \frac{2\theta}{t^2} \quad \text{a)}$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \rightarrow \omega = \alpha t \quad \text{b)}$$

Ec. 6.15 Ecuaciones cinemáticas a aceleración angular constante. a) Aceleración angular y b) velocidad

Tabla 6.6 Consideraciones cinemáticas para cada motor propuesto

MODELO DE MOTOR	ACELERACIÓN ANG (rad/seg)	VELOCIDAD ANG (rad/seg)
SG5010 <i>TowerPro</i> ®	13.0875	5.235
MG995 <i>TowerPro</i> ®	81.8125	13.0875
MG996r <i>TowerPro</i> ®	81.8125	13.0875
S3003 <i>Futaba</i> ®	13.0875	5.235

Así, con la ecuación de relación de velocidad de engranes $\frac{Z_2}{Z_3} = \frac{\omega_3}{\omega_2}$ entonces se obtiene la entrada para el mecanismo articulado tal como se muestra en la tabla 6.7. La relación de velocidades angulares, junto con las fórmulas cinemáticas, dará como resultado las aceleraciones de entrada.

Tabla 6.7 Entradas cinemáticas para el circuito de cuadrilátero articulado

MODELO DE MOTOR	ACELERACIÓN ANG (rad/seg)	VELOCIDAD ANG (rad/seg)
SG5010 <i>TowerPro</i> ®	23.562	9.424
MG995 <i>TowerPro</i> ®	147.2625	23.562
MG996r <i>TowerPro</i> ®	147.2625	23.562
S3003 <i>Futaba</i> ®	23.562	9.424

Con estos datos, se requerirá realizar un análisis sobre los puntos de centro de gravedad (CG) de cada eslabón, ya que conocer el comportamiento cinemático de estos puntos es necesario para el análisis dinámico, como ya se ha mencionado. Este análisis se basa enteramente en el análisis geométrico del cuadrilátero articulado como el que se muestra en la página 73 de este documento, en la figura 6.17. Aquí se parte la ecuación de posición relativa tanto para el centro de gravedad de la biela extendida como en los de la manivela y el oscilador, donde se consideran los ángulos dominantes tanto para estos dos últimos con θ_2 y θ_3 respectivamente. Para facilitar la operación de las ecuaciones de posición relativa es necesario recurrir a la forma de Euler, pues se debe recordar que para obtener las velocidades y aceleraciones es necesario derivar esta ecuación, denotada como $R_B = R_A + R_{B/A}$, siendo esta la posición relativa del nodo B respecto al de A y $R_P = R_A + R_{P/A}$, siendo esta la posición relativa del nodo de los CG respecto al de A. De la notación de Euler para la posición del CG de oscilador $R_{CG4} = l_2 e^{j\theta_2} + R_{CG4} e^{j\theta_4}$ como ecuación de posición relativa a la salida y para el CG de biela $R_{CG3} = l_2 e^{j\theta_2} + R_{CG3} e^{j\theta_3 + \gamma}$, siendo γ el ángulo interno entre l_3 y el vector de posición del CG de biela. Considerando que la velocidad es la derivada de la posición y la aceleración lo es de la velocidad, se pueden encontrar las velocidades y aceleraciones resultantes para cada una de las posiciones en forma general, dependientes del desplazamiento angular de cada uno de los eslabones respecto a la horizontal, tal como una suma de vectores. El resultado de estas derivaciones se encuentra en las ecuaciones 6.16 y 6.17, aunque solamente se manifiestan como componentes resultantes, es posible definir de estas las componentes tanto tangenciales a la curva de movimiento descrita por los nodos, así como las aceleraciones normales.

$$V_{CG3} = jl_2\omega_2e^{j\theta_2} + jR_{CG3}\omega_3e^{j(\theta_3+\gamma)}$$

$$V_{CG4} = jl_2\omega_2e^{j\theta_2} + jR_{CG4}\omega_4e^{j\theta_4}$$

Ec. 6.16 Ecuaciones de velocidad en notación de Euler

$$a_{CG3} = [jl_2\alpha_2e^{j\theta_2} - l_2\omega_2^2e^{j\theta_2}] + [jR_{CG3}\alpha_3e^{j(\theta_3+\gamma)} - R_{CG3}\omega_3^2e^{j(\theta_3+\gamma)}]$$

$$a_{CG4} = [jl_2\alpha_2e^{j\theta_2} - l_2\omega_2^2e^{j\theta_2}] + [jR_{CG4}\alpha_4e^{j\theta_4} - R_{CG4}\omega_4^2e^{j\theta_4}]$$

Ec. 6.17 Ecuaciones de aceleración en notación de Euler

Con estas ecuaciones vectoriales en notación de tipo Euler es posible generar un programa para obtener el comportamiento en una revolución completa de la manivela a través de una gráfica en la que se relacione el tiempo en el que el servomotor dará una vuelta completa (de acuerdo a la velocidad nominal en la ficha técnica el tiempo que le toma a la primer y cuarta opción es de 2.4 segundos y para las opciones restantes es de 0.96 segundos).

La información ya obtenida ayuda a diseñar una primera propuesta de eslabones para obtener datos tanto cinemáticos (ubicación de los centros de gravedad respecto a la línea de centros de conexión de los eslabones) como dinámicos (masa y momento de inercia). Esto se logró con un software de tipo CAD para obtener tanto las posiciones de los CG como un punto indicativo en el espacio de cada eslabón. Esto se puede observar en la figura 6.23.

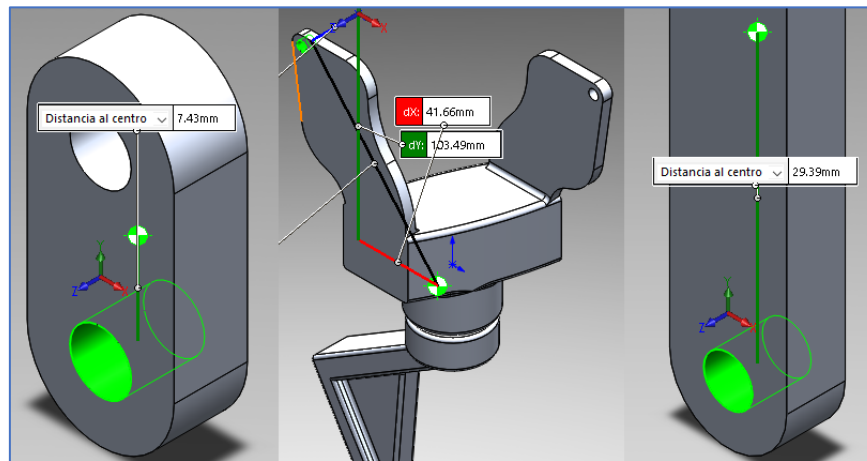


Figura 6.23 Centros de gravedad de manivela (izquierda), biela (centro) y oscilador (derecha)

Para operar el programa es preciso cambiar la forma de Euler a la forma rectangular y analizando por cada grado posible de la manivela, a lo largo de 360° como se ha mencionado. En las figuras 6.24 y 6.25 se muestra el comportamiento completo del análisis de posición tanto para el CG de

biela como para el CG de oscilador para las dos condiciones cinemáticas de entrada. El código se encuentra en el Anexo 2 de programas.

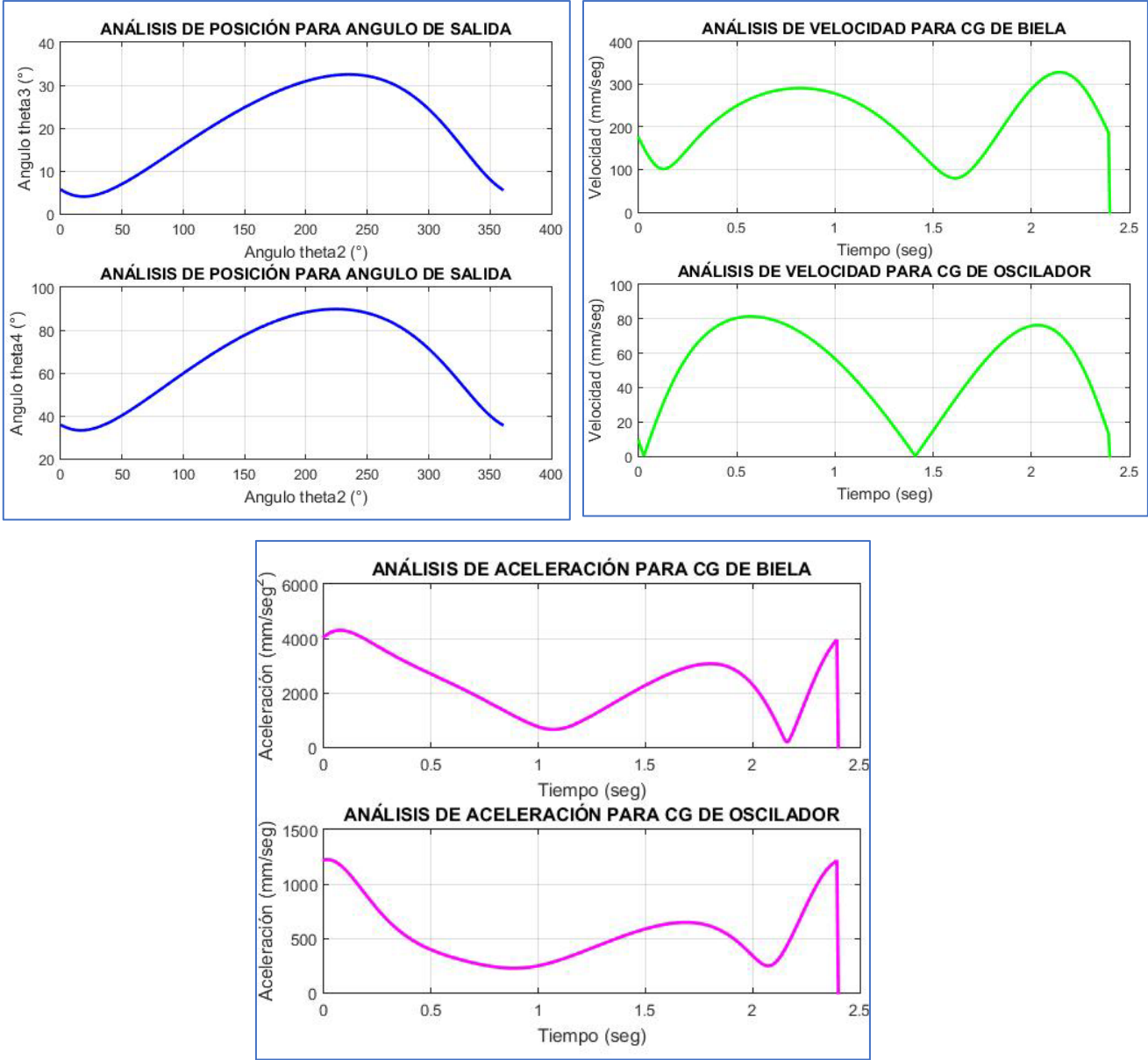


Figura 6.24 Análisis cinemático de posición, velocidad y aceleración correspondientes a los servomotores SG5010 TowerPro® y S3003 Futaba®

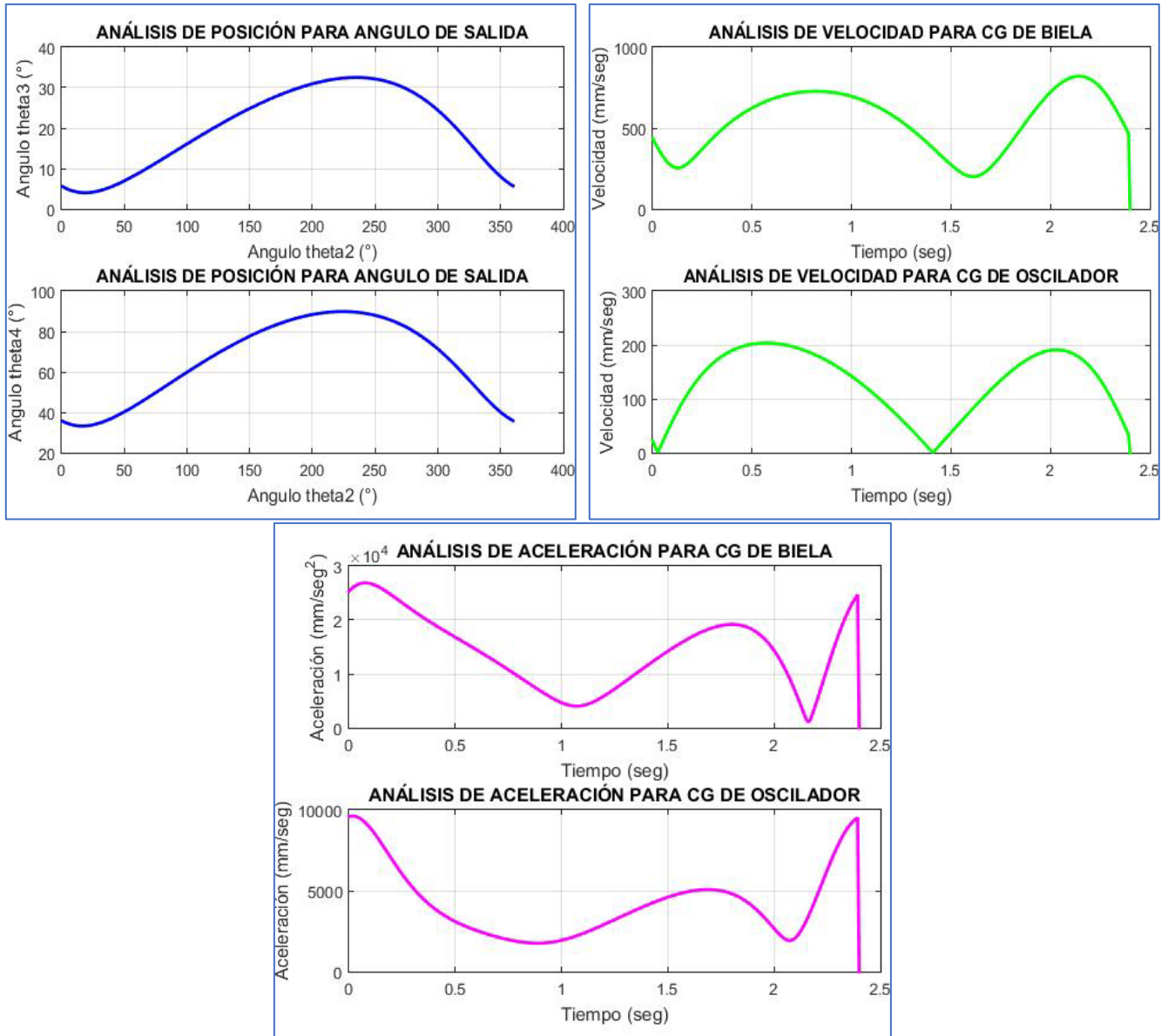


Figura 6.25 Gráficas de comportamiento cinemático de los CG de biela y manivela utilizando los servomotores MG995 TowerPro® y MG996r TowerPro®

Materiales para la manufactura de la prótesis

Una de las partes más importantes en el diseño de ingeniería, sobre todo para piezas que serán manufacturadas, es la selección del material más adecuado que permita al dispositivo realizar de la manera más óptima el trabajo para el que fue diseñado. Si bien por lo general, la decisión de elección se toma antes de establecer las dimensiones de la pieza (Budynas & Nisbett, 2019), para este caso se realizó después dados los análisis propuestos en los siguientes puntos de este capítulo para la generación del prototipo. Siendo necesario conocer algunas características cinéticas de los eslabones del mecanismo obtenido por síntesis y analizado previamente de manera cinemática (como se mencionó en la página 84 de este documento), es imperativo

realizar una propuesta de los materiales que se van a requerir para la creación del prototipo de prótesis. Los datos necesarios para realizar un análisis dinámico de todo el mecanismo recaen en información que sólo se puede obtener con la selección de materiales de acuerdo con las capacidades de producción con las que se contó.

Antes que nada, hay que entender que los materiales (ya sean metales ferrosos, no ferrosos, cerámicos, plásticos o compuestos) poseen atributos físicos: densidad, esfuerzos últimos, costos, resistencia a la corrosión, etc. Y en la ingeniería es importante contar con una gama de materiales con los que se tiene intención de trabajar, por lo que con esto se tienen dos puntos de inicio para realizar esta estimación:

- ✓ La identificación de los atributos que se necesitan en el diseño.
- ✓ La comparación de los materiales que empaten con los atributos requeridos por el diseño.

Con esto en mente, es importante mencionar que para seleccionar un material óptimo se debe conocer la relación entre los atributos de los materiales, así como la estructura o forma del dispositivo, la función que éste tendrá y el proceso por el cual la materia prima será transformada para generar el producto (Ashby, 2005). Este se puede explicar con el diagrama de la figura 6.26 donde se relacionan estos parámetros entre sí.

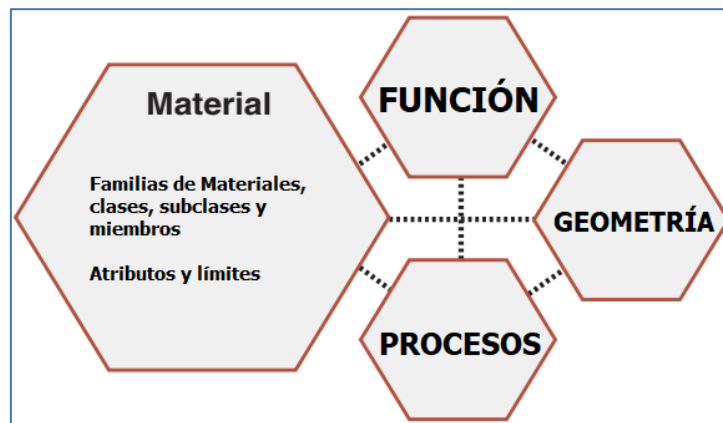


Figura 6.26 Relación entre función, geometría y procesos para la selección de materiales. Tomada de: Ashby (2005)

Dicho esto, la selección de materiales para la construcción de un prótesis a nivel de prototipo depende del equipo con el que se realizará el dispositivo, por lo cual existe ya una restricción de materiales por procesos. Las geometrías son sencillas por lo que cualquier material podría estar involucrado en la generación desde el prototipo experimental, funcional y hasta el producto finalizado. La función es la parte más restrictiva, ya que esta tiene funciones puntuales: soporte de esfuerzos, ventajas mecánicas y generación de movimientos; estas características estructurales permitirán la elección por el comportamiento estático de la propuesta de prótesis.

Es así que los dos parámetros que definen la elección del material son los procesos, en primera instancia, y la función en segunda instancia. Para los procesos, dos de los más asequibles para el desarrollo son la fundición por arena verde y la manufactura aditiva. La primera es especial para metales y en metales no ferrosos tal como el aluminio es sumamente útil, fácil de realizar y sobre todo económico, además de que es posible reciclar los metales para producir el prototipo. El segundo, un tanto más caro ya que el equipo casero que utiliza es un dispositivo mecatrónico que utiliza polímeros termo formables para crear productos a través de un diseño CAD que interpreta la interfaz electrónica. Esta operación es la impresión 3D del tipo Modelado por Deposición Fundida, el cual utiliza materiales termo plásticos como PLA, ABS o PET. A continuación, se explican de manera breve los métodos propuestos.

Fundición en arena verde.

Siendo esta una técnica de conformado de metales tanto ferrosos como no ferrosos, la fundición en arena presenta una gran ventaja para manufacturas caseras a través del reciclaje y reutilización de los metales. El término “verde” se refiere al hecho de que, al vaciarse el metal en su interior, la arena en el molde está húmeda; el moldeo con arena verde es la metodología más económica en la fabricación de moldes. La fundición en arena consiste en a) colocar un modelo con la forma de la pieza que se desea manufacturar en la arena para crear una especie de huella en esta, b) se coloca en el molde un sistema de vaciado para que pueda penetrar el metal fundido, c) se llenan las cavidades con el metal fundido, d) se deja reposar el metal hasta el enfriamiento y finalmente e) romper el molde desmoronando la arena y limpiar el resultado del fundido. En la figura 6.27 se muestra el cómo se trabaja un molde de arena verde para fundición de aluminio.



Figura 6.27 Fundición en arena verde utilizando aluminio. Tomada de: <http://www.fundicion-de-aluminio.es/procesos-de-fundicion/moldeo-en-arena-verde/>

La mayoría de las operaciones de fundición en arena utilizan arena de sílice (SiO_2), el cual es el producto de la desintegración de las rocas. La arena es económica y adecuada como material y con alta resistencia térmica. Para estas operaciones de conformado se optan por dos tipos de arenas: naturalmente unida (arena de banco) y sintética (arena de lago). El molde deberá tener una buena “colapsabilidad” a fin de no generar defectos en el colado, como grietas o rechupes, por lo que la selección de las arenas es importante para este proceso (Kalpakjian & Schmid, 2002). A continuación, se presentan las partes de un molde de arena estándar que se puede fabricar de forma casera:

- ✚ Molde: el cual está soportado por una caja de moldeo. Los moldes de dos piezas formados por una tapa superior e inferior unidos por bisagra en algunos casos.
- ✚ Copa de vaciados: donde se vacía el fundido.
- ✚ Bebedero: a través del cual el metal fundido fluye hacia el interior del molde.
- ✚ Alimentadores: son los canales que llevan el colado desde la mazarota a la cavidad del molde. Los denominados *ataques* son las entradas a la cavidad del molde.
- ✚ Mazarotas: suministran metal adicional a la fundición conforme esta se contrae en la solidificación. Sirve como auxiliar en el proceso.
- ✚ Corazones: son los insertos hechos de arena. Se colocan en el molde para crear huecos en la fundición. Estos también se utilizan en la parte exterior de la fundición para formar características, como letras sobre la superficie de la pieza o barrenos ciegos.
- ✚ Respiraderos: se colocan en los moldes para extraer los gases producidos al contacto del colado con la arena y los corazones. También deja salir el aire de la cavidad conforme el colado avanza.

En la figura 6.28 se muestra el diagrama de un molde de fundición.

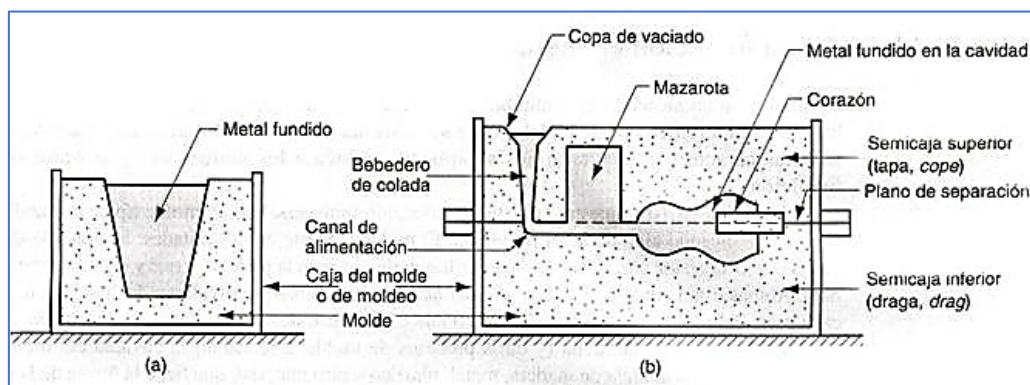


Figura 6.28 Diagrama de un molde de fundición. Tomada de: Kalpakjian & Schmid (2002)

Aluminio 5182 (aluminio para fundición)

En la ingeniería se puede clasificar los materiales metálicos en dos grandes familias o grupos: el grupo de los metales ferrosos (aquellos cuyo elemento principal es el hierro) y los no ferrosos. Uno de los más comunes y cuya maniobrabilidad sobresale de los del grupo de no ferrosos es el aluminio. Comúnmente se puede encontrar este material en la industria en forma de lingotes y es comúnmente utilizado para fabricar recipientes como latas, como se muestra en la figura 6.29, o componentes mecánicos como tapas para motores eléctricos.



Figura 6.29 Latas de aluminio. Tomada de: <https://thefoodtech.com/insumos-para-empaque/aluminio-el-metal-ligero/>

El metal es ligero, con una densidad $\rho=2.7 \text{ g/cm}^3$ y aunque las aleaciones de aluminio tienen propiedades bajas a la tensión en comparación con los aceros, su relación de resistencia-masa es bastante buena. Otra de las características a considerar es que las aleaciones suelen ser unas treinta veces más resistentes que el aluminio puro (Askeland, 1987).

Las aleaciones de aluminio se clasifican en dos subgrupos dependiendo del tipo de tratamiento de conformado que se le da para generar un producto: aleaciones para forja y aleaciones para fundición; siendo que la aplicación de fuerzas para la forja provoca cambios en las estructuras cristalinas del aluminio, las propiedades de ambas aplicaciones poseen atributos distintos. En la tabla 6.8 se muestran las aleaciones utilizadas para fundición, donde se muestra la designación que se le da por norma ANSI a cada aleación.

Tabla 6.8 Sistema de designación de aleaciones de aluminio. Tomado de: Askeland (1987)

ALEACIONES FUNDIDAS DE ALUMINIO		
1XX.X	Aluminio Comercial Puro	No envejecido
2XX.X	Al-Cu	Endurecible
3XX.X	Al-Si-Cu o Al-Mg-Si	Algunas endurecibles
4XX.X	Al-Si	No envejecido

5XX.X	Al-Mg	No envejecido
7XX.X	Al-Mg-Zn	Endurecible
8XX.X	Al-Sn	Endurecible

Ahora, llegamos a la selección de estas subfamilias con un elemento muy común en cada hogar: las latas de aluminio. Ya sean las latas de conservas, de atún o de algunas bebidas; están en cada hogar y dada su composición corresponde a una aleación del grupo 5000, específicamente un aluminio del tipo EN AW-5182-H18 (Padmanabhan, Oliveira, & Menezes, 2011) el cual tiene características mecánicas particulares ligadas a la temperatura, aproximadamente en rangos de temperatura inferiores a 175°C sin entrar en zonas plásticas exageradas, siendo esta su temperatura de fusión. El comportamiento mecánico de esfuerzo-deformación se muestra en la figura 6.30 donde se presentan las gráficas a distintas temperaturas de operación, donde lo dicho relacionado a sus propiedades mecánicas cobra sentido (Camberg, Bohner, & Töller, 2018).

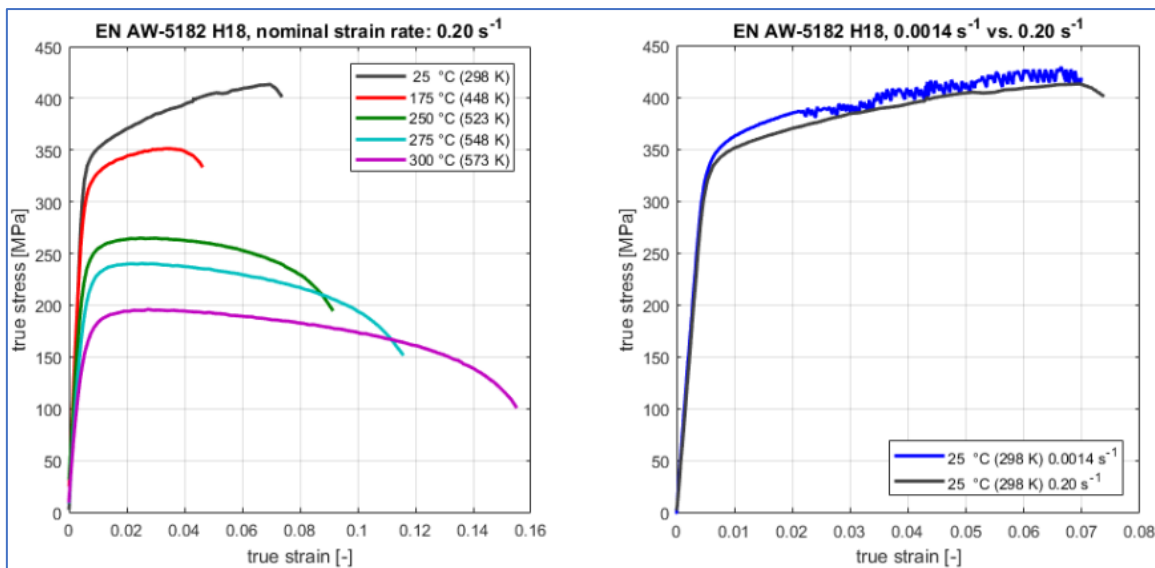


Figura 6.30 Diagramas de esfuerzo-deformación de ingeniería (izquierda) y real (derecha) a condiciones de temperaturas determinadas para Al-5182. Tomada de: Padmanabhan (2011)

Las características particulares de esta aleación de aluminio se dan en el Anexo 1 de materiales.

Impresión 3D por FMD (Modelado por Deposición Fundida)

El segundo método de manufactura que se propone es la impresión 3D. Se le puede definir como un conjunto de conocimientos, técnicas y tecnologías que nos posibilitan crear un modelo a partir de un diseño en 3D creado en un software CAD y materializarlo utilizando un material de fácil conformado; para el caso de las actuales impresoras los materiales más utilizados están compuestos por polímeros o plásticos (Martín Cruz, 2020). El más común de los equipos para

imprimir un modelo CAD son las del tipo de deposición. Creada y patentada por Lisa Crump y su esposo S. Scott Crump en 1989, estas máquinas consisten en realizar una fundición de plásticos que se va depositando por capas para generar un objeto. En la figura 6.31 se muestra un equipo de impresión 3D tipo FMD donde se pueden crear modelos mecánicos o de máquinas a partir de modelos CAD diseñados por los ingenieros.



Figura 6.31 Impresora 3D tipo FMD imprimiendo bloque de cilindros para automóvil. Tomada de: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1296081-REG/makerbot_mp07825_replicator_3d_printer.html

Antes que todo, se debe tener primero un modelo en 3D ya diseñado y es el cual va a ser fabricado. Este 3D en archivo digital es procesado por los programas de impresión 3D el cual convertirá la geometría en un lenguaje de sistema de coordenadas conocido como código G, el cual es utilizado en las máquinas de control numérico CNC. Siendo que las impresoras más comunes son las de FMD, la creación del objeto se hará capa por capa, línea por línea de material una encima de otra generando el sólido. El plástico (previamente reducido a un filamento y enrollado en una bobina) pasará a través de una boquilla caliente por donde saldrá extruido hacia una salida de diámetro pequeño con la intención de que un carro, movido por una serie de elementos mecánicos, se posicione en diferentes puntos del plano cartesiano de acuerdo con lo designado por el programa o código. En la figura 6.32 se puede observar los componentes que tiene una impresora 3D tipo FMD y cómo es que esta realiza el trabajo de deposición desde el carrete de plástico.

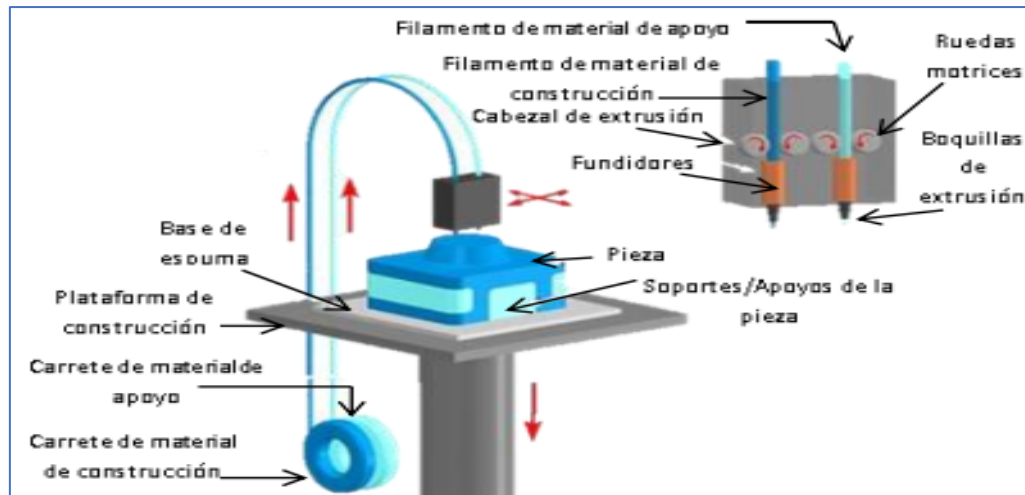


Figura 6.32 Componentes de la impresora 3D tipo FDM. Tomada de: Carausu & Mazurchevici (2018). *The 3D printing modelling of biodegradable material. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.*

Dichas capas poseen alrededor un perímetro protector al que se le denomina cascarón. Las capas pueden contener más de un perímetro ya que pueden contener huecos o cascarones internos, acompañados de un relleno, el cual puede ser una especie de malla o ser macizo. Con esto en mente se pueden describir las capas en tres subgrupos: perimetrales o de cascarón, macizas o sólidas y malladas o de relleno.

El proceso de impresión consiste en que la máquina realiza movimientos en el sistema cartesiano en los que deposita material llamados *pasadas de impresión*. Para imprimir una capa, la máquina realiza unas pasadas previas en el contorno del sólido a manufacturar conformando el cascarón. Si la capa es sólida, la irá rellenando haciendo pasadas de impresión oblicuas, esto para realizar una capa completamente sólida. Cuando imprime mallas, la impresora hace ligeras pasadas en forma de mallado y le da un grosor de relleno. Una vez terminada la capa, la impresora sube y continúa con la siguiente capa, y así de manera sucesiva. La forma que poseen estas capas se muestra en la figura 6.33. Capa a capa la impresora fabrica el objeto en función al tipo de capa que se le haya designado a la máquina a cubrir; cada capa forma grupos a lo largo de toda la impresión y estas son las siguientes:

- ✚ Superficie de Impresión: es la plataforma sobre la que se genera la primera capa de impresión. Para generar esta primera capa es necesario utilizar una sustancia adhesiva.
- ✚ Primera Capa: es la primera al ser impresa con el material plástico y une la superficie de impresión con las capas superiores.

- ✚ Base del Objeto: son las capas en las que toda la figura se sostiene al momento de impresión. Estas capas serán compuestas por una primera capa de impresión y capas sólidas.
- ✚ Capas Intermedias: estas pueden ser sólidas, rellenas o huecas, siendo normativa el uso de las capas malladas ya que resultaría un desperdicio de material generar capas completamente sólidas y las impresiones huecas originan errores de impresión.
- ✚ Capas Finales: son las capas macizas que forman el cierre de la impresión; esto de acuerdo con la geometría de la figura en 3D convertida a código G.
- ✚ Relleno: generado en forma de malla por un porcentaje de densidad de la figura. Este mallado puede ser distinta de distinta densidad y grosor para cada impresión individual que se realice.

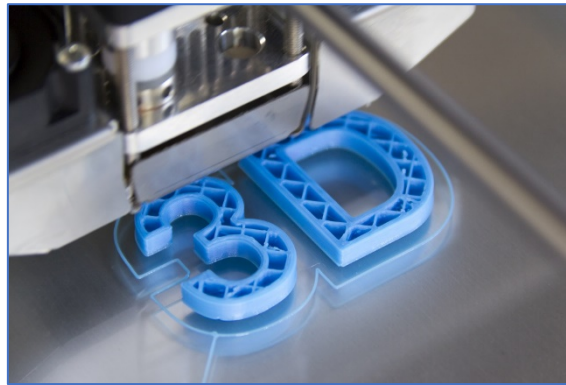


Figura 6.33 Mallado en una impresión 3D. Tomada de: <https://impresiondigital.ituser.es/noticias-y-actualidad/2020/06/utilidades-de-la-impresion-3d-en-la-industria>

Como se ha mencionado, los materiales más utilizados en las impresiones 3D son los polímeros. Estas son moléculas orgánicas gigantes que tiene pesos moleculares del orden de $1\text{Mg/g}\cdot\text{mol}$ (Askeland, 1987). Son resistentes a la corrosión, baja conductividad eléctrica y térmica, aunque relativamente una baja resistencia a la tensión, son los materiales con mayor aplicación en la actualidad. La clasificación más importante en la ingeniería de estos es por el comportamiento que tienen sometidos a temperaturas específicas: termoplásticos y termoestables.

Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS)

El ABS es una familia de termoplásticos al que comúnmente se le denomina el plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo comparado con el de otros tipos de termoplásticos. Debido a su alta resistencia a la temperatura y múltiples propiedades mecánicas es continuamente empleado en prototipos para pruebas y

ensayos en sectores como el eléctrico, el electrodoméstico y el automotriz entre otros (Díaz del Castillo Rodríguez, 2017). Para las impresoras 3D actuales es posible encontrar este material en bobinas enrolladas por filamentos de entre 1.75 y 2.85 mm de diámetro. En la figura 6.34 se muestra la presentación de estos filamentos tal como es posible encontrarlos en el mercado, ya sea en tiendas en internet o especializadas en manufactura aditiva e impresiones 3D.



Figura 6.34 Bobina de filamento ABS de la marca SUNLU®. Tomada de: <https://www.sunlu.com/products/abs-1-75mm-3d-printer-filament-1kg-2-2lbs>

El ABS es proveniente del petróleo y como se ha mencionado es muy utilizado a nivel industrial por su resistencia térmica (-40°C a 90°C), fácil mecanizado, alta resistencia química a la corrosión y una buena resistencia al impacto. Sin embargo, algunas desventajas que presenta su utilización es que requiere de una buena ventilación al ser manufacturadas las piezas, ya que emite gases nocivos al momento de calentarse al punto de plastificación. Otra desventaja es las altas temperaturas que se necesita operar la impresora para poder manufacturar objetos con ABS, ya que el plástico debe ser extruido a temperaturas entre 220°C y 240°C y la superficie de impresión debe calentarse a una temperatura de entre 80°C y 100°C . Es muy sensible a la contracción por descensos de temperatura y, por consiguiente, a un efecto bien conocido en el mundo de la impresión 3D conocido como *warping* (Fundación Carlos Slim, 2019), el cual es el desprendimiento prematuro de las piezas de la superficie de impresión en el momento en que el proceso va ya bastante avanzado, lo cual de suceder podría generar muchos errores.

El comportamiento mecánico de esfuerzo-deformación se muestra en la figura 6.35 y 6.36 donde se presenta la gráfica a una sección transversal de 13 mm de espesor, tanto el diagrama de esfuerzo de ingeniería como el esfuerzo real (Tusharkumar B. & Prashant A., 2015).

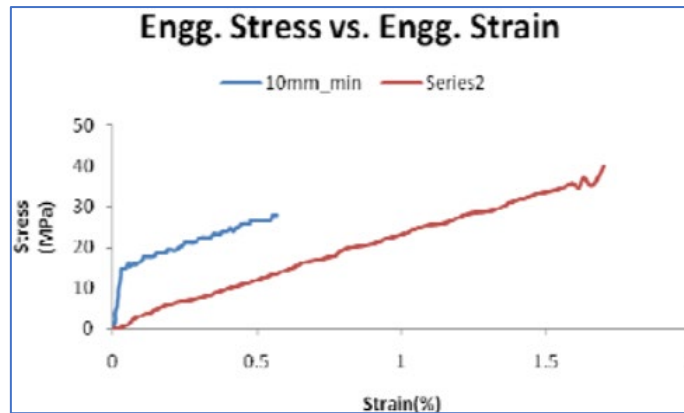


Figura 6.35 Diagrama de esfuerzo-deformación de ingeniería para ABS. Tomada de: Tusharkumar (2015)

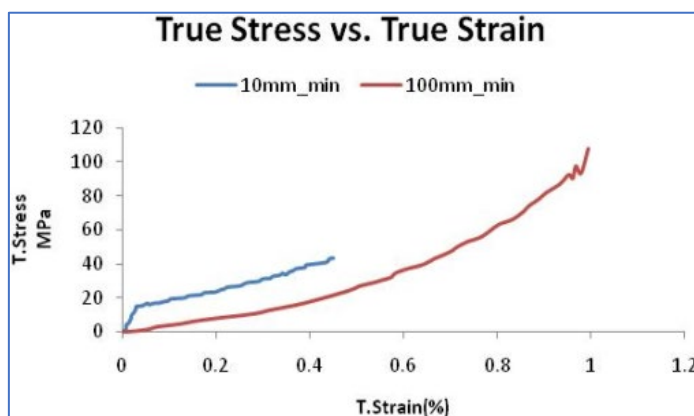


Figura 6.36 Diagrama de esfuerzo-deformación real para ABS. Tomada de: Tusharkumar (2015)

En ambos estudios cabe destacar que la zona elástica (o lineal) es mucho más pequeña que la del aluminio, por lo que se debe tener especial cuidado en el análisis cinetoestático de la prótesis al utilizarse este material. Las propiedades de este material se encuentran en el Anexo 1 de materiales.

Ácido Poliláctico (PLA)

El PLA es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Se considera un material altamente versátil que se fabrica a partir de recursos renovables como son el almidón de maíz, raíces o almidón de tapioca, la caña de azúcar, la remolacha, el trigo, entre otros. Este material tiene varias características equivalentes e incluso mejores que muchos plásticos derivados del petróleo. Para las impresoras 3D actuales es posible encontrar este material en bobinas enrolladas por filamentos de entre 1.75 y 2.85 mm de diámetro. En la figura 6.37 se muestra la presentación de estos filamentos tal como es posible encontrarlos en el mercado, ya sea en tiendas en internet o especializadas en manufactura aditiva e impresiones 3D.



Figura 6.37 Bobina de filamento PLA de la marca 3D Warhorse. Tomada de: <https://www.amazon.com/3D-Printer-Filament-Dimensional-Accuracy/dp/B09W12TLZY>

Una de las características de mucho interés del PLA es su capacidad de biodegradarse, lo que le da una gran ventaja desde el punto de vista ecológico. Sin embargo, durante su fase de degradación lanza dióxido de carbono y metano (sustancias que contribuyen al efecto invernadero), y también es ampliamente discutido el hecho de que, aunque los combustibles fósiles todavía son necesarios durante el proceso de producción; aunque en realidad, su fabricación requiere entre 20% y 50% menos de estos recursos que aquellos plásticos provenientes del petróleo (Díaz del Castillo Rodríguez, 2017).

Una gran ventaja del PLA es que es el material más fácil de imprimir, ya que no es necesario disponer de una preparación para la superficie de impresión o cama caliente y, a diferencia del ABS, las temperaturas para extrusión de este material están entre 180°C-120°C. Ya que es más flexible a la temperatura no presenta el efecto *warping*, es muy difícil que presente errores de impresión por este efecto. No desprende gases nocivos y es posible reforzarlo con fibras metálicas dentro del filamento.

Sin embargo, algunas desventajas que presenta este material en la impresión 3D es la baja resistencia tanto térmica como mecánica que presenta ante esfuerzos dado que su punto de fusión se encuentra cercano a los 60°C por lo que las fricciones que generen este grado de temperatura lograrán deformar cualquier pieza de este material.

El comportamiento mecánico de esfuerzo-deformación se muestra en la figura 6.38 donde se presenta la gráfica a una sección transversal de 12 mm de espesor de una probeta, de esfuerzo-deformación para el material solo y para con algunos aditivos combinados (Caminero & Chacón, 2019).

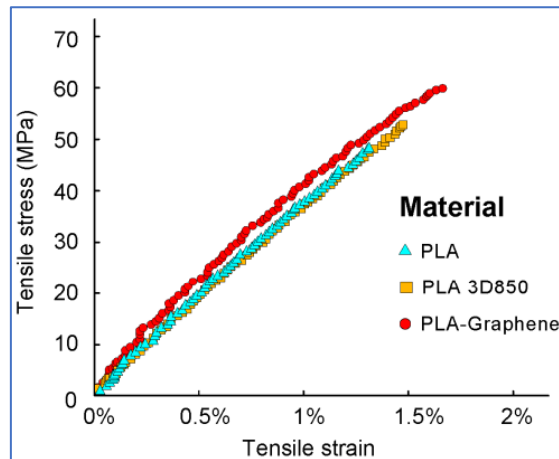


Figura 6.38 Diagrama de esfuerzo-deformación de ingeniería para PLA. Tomada de: Caminero (2019)

Como se puede observar, el material se encuentra en una zona plástica en la mayor parte del comportamiento, por lo que, al igual que en el ABS, habrá que observar los efectos de las fuerzas en el prototipo que se obtendrán del análisis cinetostático. Las propiedades de este material se encuentran en el Anexo 1 de materiales.

Modelo dinámico para el prototipo de prótesis.

Una vez ya se ha realizado la síntesis y el análisis cinemático del mecanismo de prótesis, el mecanismo articulado inferior, para definir toda su topología y geometría, así como el conjunto de movimientos o desplazamientos que estarán involucrados en el mecanismo, es necesario realizar un análisis dinámico con una solución de dinámica inversa o cinetostática. Este análisis implica el uso de las leyes de Newton como punto de partida, así como los momentos de inercia donde se involucran las acciones de las masas y, por tanto, los centros de gravedad. Ya que únicamente se cuenta con datos cinemáticos, es necesaria la aplicación de la dinámica inversa para la obtención de estas fuerzas (Norton, 2009)

Ya que para este análisis es necesario conocer los esfuerzos máximos con los que posiblemente operará el protésico, las aceleraciones máximas obtenidas del análisis cinemático serán un excelente punto de partida. El objetivo es encontrar las fuerzas que actúan en cada punto de interés en el mecanismo (fuerzas en juntas y eslabones) tanto de tensión como compresión y someter el modelo 3D a un software CAE el cual, con el uso del Método de los Elemento Finitos, nos ayudará a determinar el comportamiento del prototipo con las cargas de interés.

Considerando las gráficas cinemáticas para ambos grupos, el tiempo en el que las aceleraciones máximas se presentan nos darán a conocer el ángulo de manivela en el instante en que estas se

presentan. Utilizando el mismo programa que se generó, se obtienen los datos que se muestran en la tabla 6.9 tanto para el primer grupo de servomotores como para el segundo.

Tabla 6.9 Datos cinemáticos de los dos grupos de servomotores para condiciones de aceleración máxima

DATOS CINEMÁTICOS DE SERVOS GRUPO I			
θ2 (°)	ω2 (rad/seg)	α2 (rad/seg^2)	acg2 (mm/seg^2)
12	-9.424	23.562	682.654; 26.853°
θ3 (°)	ω3 (rad/seg)	α3 (rad/seg^2)	acg3 (mm/seg^2)
4.2	1.0573	24.2751	4300.5; 206°
θ4 (°)	ω4 (rad/seg)	α4 (rad/seg^2)	acg4 (mm/seg^2)
33.38	-0.6628	50.3348	1479.377; 147.12°
DATOS CINEMÁTICOS DE SERVOS GRUPO II			
θ2 (°)	ω2 (rad/seg)	α2 (rad/seg^2)	acg2 (mm/seg^2)
12	-23.562	147.262	4267.5; 26.85°
θ3 (°)	ω3 (rad/seg)	α3 (rad/seg^2)	acg3 (mm/seg^2)
4.2	2.6435	151.7477	26,882; 206.02°
θ4 (°)	ω4 (rad/seg)	α4 (rad/seg^2)	acg4 (mm/seg^2)
33.38	-1.6571	314.6439	9247.78; 147.12°

El principio dinámico que se presenta para la solución del sistema articulado se conoce como Principio de D’Alambert, formulado por el matemático francés Jean Le Rond D’Alambert, con el objetivo de formular las condiciones dinámicas de Newton tanto para sistemas traslacionales como rotacionales como si fuesen ecuaciones estáticas, o como condiciones de “cuasi equilibrio”. En las ecuaciones 6.18 se tienen estas condiciones tanto para rotación como traslación, basadas en la segunda ley de Newton.

$$\sum F - ma = 0$$

$$\sum T - I\alpha = 0$$

Ec. 6.18 Ecuaciones de D’Alambert para traslación (arriba) y rotación (abajo)

Armados con esta información podemos entonces generar un sistema cinetostático para cada uno de los eslabones que forman el mecanismo. Esto será meramente nominal, es decir, solo nos ayudará a conocer las variables que estarán involucrados en todo el mecanismo y las fuerzas que necesitamos conocer para introducirlas en el programa CAE el cual nos mostrará el comportamiento del sistema con el uso del Método de Elementos Finitos. Sobre todo, es necesario conocer las posiciones tanto de los enlaces entre eslabones y los centros de gravedad de cada eslabón, así como las variables dinámicas como masa y momento de inercia, variables que se encuentran en las condiciones D’Alambert; para este propósito es necesario el uso de un

diagrama de cuerpo libre con las ubicaciones de fuerzas y posiciones del centro de gravedad y la línea de acción respecto a las conexiones de eslabones. Las figuras 6.39, 6.40 y 6.41 como diagramas de cuerpo libre. Con estos es posible determinar las posiciones vectoriales de cada enlace desde los centros de gravedad del mecanismo.

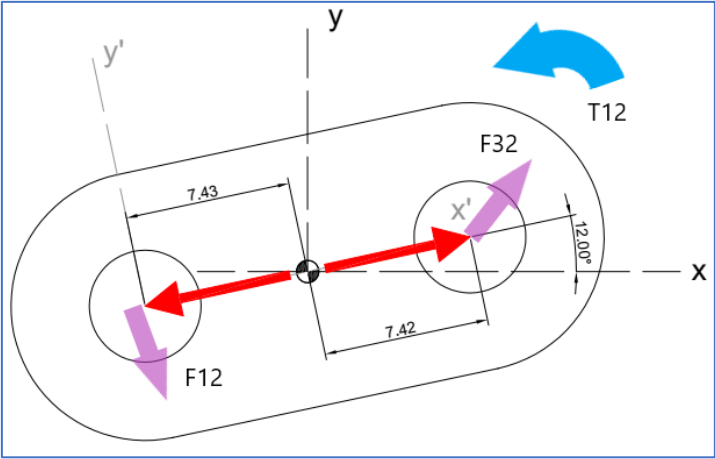


Figura 6.39 Diagrama de cuerpo libre para el eslabón de manivela

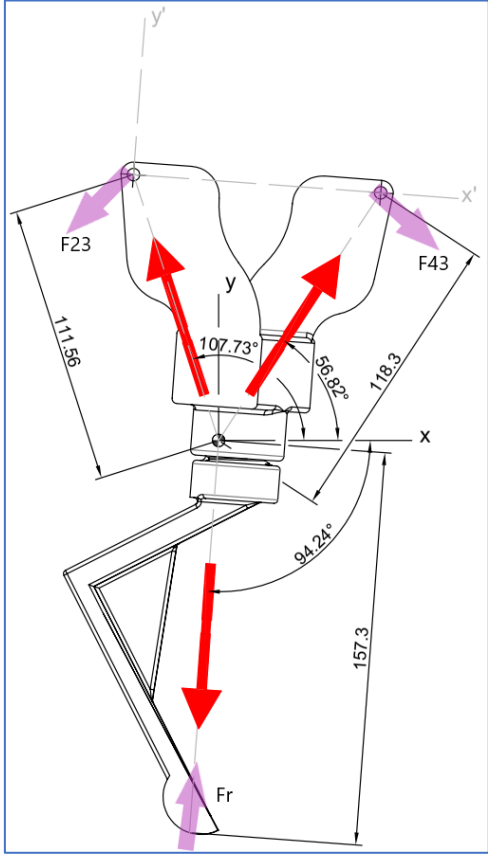


Figura 6.40 Diagrama de cuerpo libre para el eslabón de biela

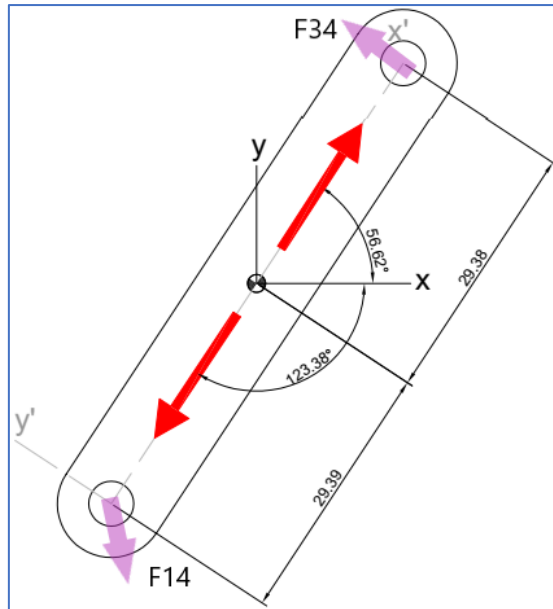


Figura 6.41 Diagrama de cuerpo libre para el eslabón del oscilador

Con los vectores encontrados en los diagramas se obtienen los siguientes vectores de posición desde el centro de gravedad hasta los puntos de conexión de los eslabones. A continuación, se presentan dichos vectores de posición:

$$R_{12} = 7.43 \angle 192^\circ; R_{12X} = -7.267; R_{12Y} = -1.5447 \quad [mm]$$

$$R_{32} = 7.42 \angle 12^\circ; R_{32X} = 7.257; R_{32Y} = 1.542 \quad [mm]$$

$$R_{23} = 111.56 \angle 107.73^\circ; R_{23X} = -33.973; R_{23Y} = 106.261 \quad [mm]$$

$$R_{43} = 118.3 \angle 56.82^\circ; R_{43X} = 64.742; R_{43Y} = 99.011 \quad [mm]$$

$$R_{34} = 29.38 \angle 56.62^\circ; R_{34X} = 16.164; R_{34Y} = 24.533 \quad [mm]$$

$$R_{14} = 29.39 \angle 236.62^\circ; R_{14X} = -16.17; R_{14Y} = -24.542 \quad [mm]$$

$$R_{reac} = 157.3 \angle 265.76^\circ; R_{reX} = -11.629; R_{reY} = -156.87 \quad [mm]$$

Y partiendo del concepto dado de que la distribución de pesos en las extremidades delanteras del perro es del 60% del peso total. Cada pata llevará el 30% del peso. Por lo que, considerando que la masa total del perro Milo es de 30.5 Kg aproximadamente, es decir, un peso aproximado de 299.205 N. Así, se puede decir que la fuerza de reacción es de aproximadamente 89.7615 N, considerando que el ángulo de desplazamiento es de $\theta_3 = 4.2^\circ$ (basado en el desplazamiento de la normal en la figura 6.39), entonces las componentes de las fuerzas de reacción serían de $F_{reacX} = 6.574 \text{ N}$ y $F_{reacY} = 89.5194 \text{ N}$.

Otro elemento importante para el análisis dinámico se encuentra en los momentos de inercia de cada eslabón. Estos datos se pueden conocer por la geometría y el material (por eso se

propusieron los materiales después del análisis cinemático) ingresados en el software de modelado CAD 3D. En la tabla 6.10 se muestran estos momentos por eslabón y material.

Tabla 6.10 Momentos de inercia de los elementos del mecanismo por material

ESLABÓN	MOMENTOS DE INERCIA (gr*mm ²)	
	PLÁSTICO (ABS/PLA)	ALUMINIO
Manivela	289.8	614.38
Biela	3.682x10 ⁶	7.807x10 ⁶
Oscilador	7,460.93	15,817.17

Ahora, con todos estos datos, es posible generar, para cada eslabón, una serie de ecuaciones las cuales servirán para determinar cada una de las fuerzas que están actuando en todo el mecanismo, incluyendo las reacciones que provienen de la bancada donde se sostiene el mecanismo. Las cuales se muestran en las ecuaciones 6.19, 6.20 y 6.21 referente a cada eslabón.

$$F_{12X} + F_{32X} = m_2 a_{G2X}$$

$$F_{12Y} + F_{32Y} = m_2 a_{G2Y}$$

$$T_2 + (R_{12X}F_{12Y} - R_{12Y}F_{12X}) + (R_{32X}F_{32Y} - R_{32Y}F_{32X}) = I_{G2}\alpha_2$$

Ec. 6.19 Ecuaciones de D'Alambert para el eslabón de manivela

$$F_{43X} + F_{32X} = m_3 a_{G3X}$$

$$F_{43Y} + F_{32Y} = m_3 a_{G3Y}$$

$$(R_{43X}F_{43Y} - R_{43Y}F_{43X}) - (R_{23X}F_{32Y} - R_{23Y}F_{32X}) + (R_{rX}F_{rY} - R_{rY}F_{rX}) = I_{G3}\alpha_3$$

Ec. 6.20 Ecuaciones de D'Alambert para el eslabón de biela

$$F_{14X} + F_{43X} = m_4 a_{G4X}$$

$$F_{14Y} + F_{43Y} = m_4 a_{G4Y}$$

$$T_4 + (R_{14X}F_{14Y} - R_{14Y}F_{14X}) + (R_{34X}F_{43Y} - R_{34Y}F_{43X}) = I_{G4}\alpha_4$$

Ec. 6.21 Ecuaciones de D'Alambert para el eslabón de oscilador

Con estas ecuaciones, si se observa con cuidado, podemos deducir que se tiene nueve incógnitas en las nueve ecuaciones, las cuales son F_{12X} , F_{12Y} , F_{32X} , F_{32Y} , F_{43X} , F_{43Y} , F_{14X} , F_{14Y} , así como la torsión T_{14} y los momentos de inercia I_{G2} , I_{G3} e I_{G4} . Esto entonces genera una matriz de nueve elementos para resolver el sistema de nueve ecuaciones. La ecuación 6.22 es la matriz en la que resolverá las ecuaciones de acuerdo con la formulación cinetostática para las condiciones ya prescritas para este análisis.

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -R_{12Y} & R_{12X} & -R_{32Y} & R_{32X} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & R_{23Y} & -R_{23X} & -R_{43Y} & R_{43X} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & R_{34Y} & -R_{34X} & -R_{14Y} & R_{14X} & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_{12X} \\
 F_{12Y} \\
 F_{32X} \\
 F_{32Y} \\
 F_{43X} \\
 F_{43Y} \\
 F_{14X} \\
 F_{14Y} \\
 T_{14}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 m_2 a_{CG2x} \\
 m_2 a_{CG2y} \\
 I_{CG2} \alpha_2 - T_2 \\
 m_3 a_{CG3x} - F_{rx} \\
 m_3 a_{CG3y} - F_{ry} \\
 I_{CG3} \alpha_3 - R_{rx} F_{ry} + R_{ry} F_{rx} \\
 m_4 a_{CG4x} \\
 m_4 a_{CG4y} \\
 I_{CG4} \alpha_4
 \end{bmatrix}$$

Ecuación 6.22 Matriz cinetostática del mecanismo de cuatro barras

Como se puede observar, en el lado derecho de la matriz cinetostática se encuentra la torsión de la flecha que movilizará la manivela, esta es la que actúa en el circuito superior, el par engranado. Retomando la figura 6.22 es posible formular la torsión en el engrane conducido por el conductor considerando el torque producido por cada uno de los servomotores propuestos que se encuentra en sus respectivos *datasheet*. Estos torques se muestran en la tabla 6.11 de estos datos para cada motor.

Tabla 6.11 Torques de servomotores

MODELO DE MOTOR	TORQUE (Kgf * mm)
SG5010 TowerPro®	65
MG995 TowerPro®	100
MG996r TowerPro®	110
S3003 Futaba®	41

Dado que los engranes con los que trabajamos son cónicos, presentan dos fuerzas componentes en el plano cartesiano tridimensional. La fuerza tangencial, la cual está involucrada con el torque y el radio medio del engrane, y la fuerza separadora, la cual está involucrada con el ángulo de presión de los dientes de los engranes. Esta fuerza separadora puede descomponerse asimismo en dos componentes: la fuerza que actúa a lo largo del eje del piñón se denomina fuerza de empuje del mismo F_p , los ángulos de los engranes $\phi=60.5^\circ$ y $\gamma=26.5$, y la fuerza componente que actúa a lo largo del eje del engrane, conocido como fuerza de empuje de conducido F_G (Hall, Holowenko, & Laughlin, 1988). Las ecuaciones de estas componentes, para conocer el comportamiento de los esfuerzos en los engranes rectos (se presentan a continuación en las ecuaciones 6.23 y los resultados en la tabla 6.12).

$$F_t = T/r_m$$

$$F_p = F_t * \tan\phi * \sin\gamma$$

$$F_G = F_t * \tan\phi * \cos\gamma$$

Ec. 6.23 Fuerza tangencial (arriba), fuerza de empuje del piñón (centro) y fuerza de empuje del engrane (abajo)

Tabla 5.12 Esfuerzos en el acoplamiento del par engranado

MODELO DE MOTOR	TORQU. ENT (N * mm)	F. TANG (N)	F. AXIAL (N)	F. RADIAL (N)	TORQU. SAL (N * mm)
SG5010 <i>TowerPro®</i>	637.255	21.444	3.7898	6.823	402.64
S3003 <i>Futaba®</i>	401.96	13.526	2.39	4.303	254.018
MG995 <i>TowerPro®</i>	980.392	33	5.822	10.5	619.74
MG996r <i>TowerPro®</i>	1078.431	36.291	6.413	11.547	681.545

Análisis por Elementos Finitos del sistema de potencia mecánico

El comportamiento del engrane conducido se realizará con el software CAE, el punto de aplicación de las fuerzas será a la mitad del perfil de diente, de acuerdo con el plano de los perfiles de engrane, 7.5 mm a partir del fondo del perfil. CAE es un software especializado en Análisis por Elementos Finitos (FEA siglas en inglés) el cual es un método numérico basado en dividir geometrías complejas en pequeñas subestructuras (o elementos) elásticas bien definidas (finitas); estas superficies o volúmenes están en contacto entre sí por nodos, conformando el cuerpo en donde se realizará el análisis. En la figura 6.42 se muestra un ejemplo de un soporte en cantiléver que está dividido en secciones definidas en las que cada una tiene un comportamiento mecánico propio y, al estar interconectado con su vecindad por nodos, los efectos elásticos de un elemento repercutirán en los alrededores.

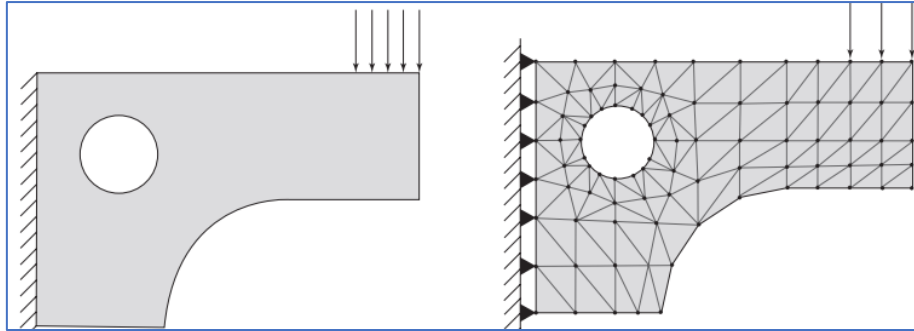


Figura 6.42 Fuerzas aplicadas a modelo ideal (izquierda), y a modelo de elementos finitos (derecha). Tomada de: Budynas & Nisbett (2019)

Las aplicaciones del FEA son muy amplias, 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 (Budynas & Nisbett, 2019). Este trabajo se apoya con la teoría de Elementos Finitos, sin embargo, no se hará un desarrollo de este ya que no es parte de los objetivos hondar en este campo de estudio.

Utilizando la extensión del software CAD donde se realizaron los diseños para los engranes se muestran los siguientes resultados sobre desplazamientos y tensiones al serle aplicados los esfuerzos en un diente en contacto. Esto aplicado por el material que presenta menores desplazamientos y menores esfuerzos en la base del engrane.

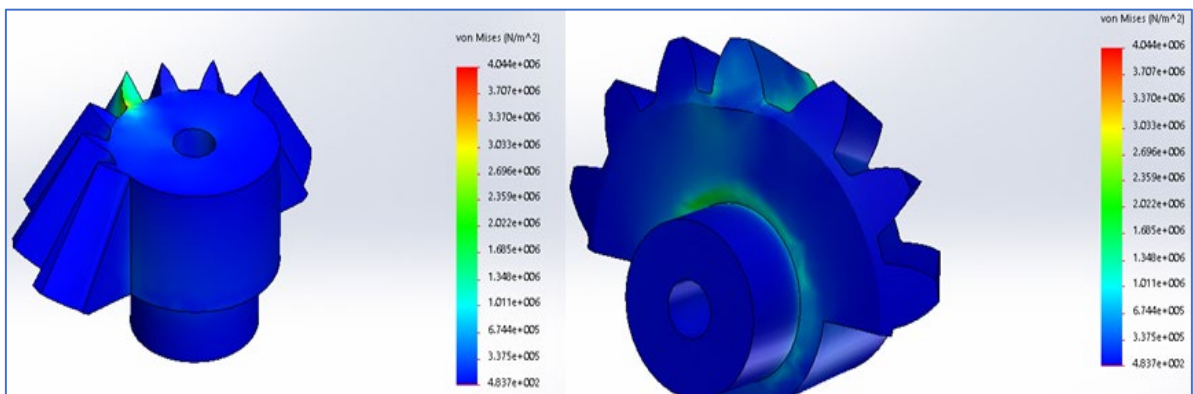


Figura 6.43 Desplazamientos usando servomotor SG5010 y ABS (malla triangular a 200 elementos)

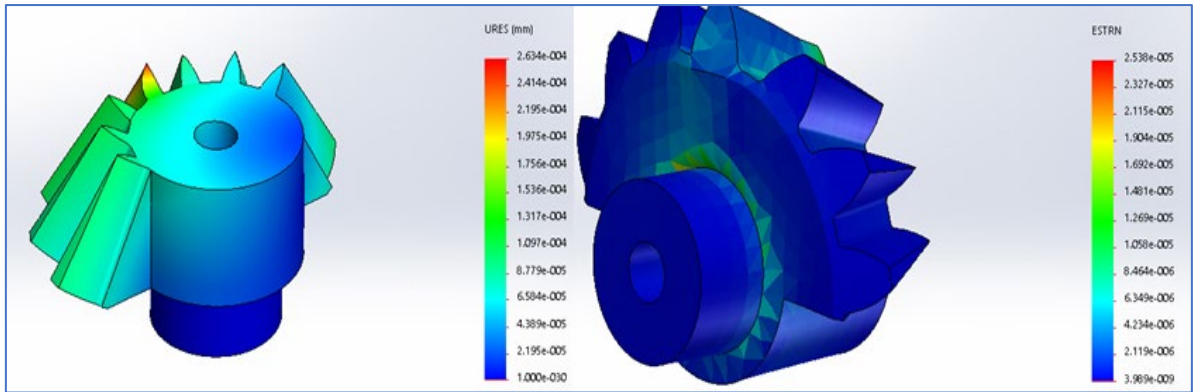


Figura 6.44 Desplazamientos usando servomotor S3003 y Aluminio (malla triangular a 200 elementos)

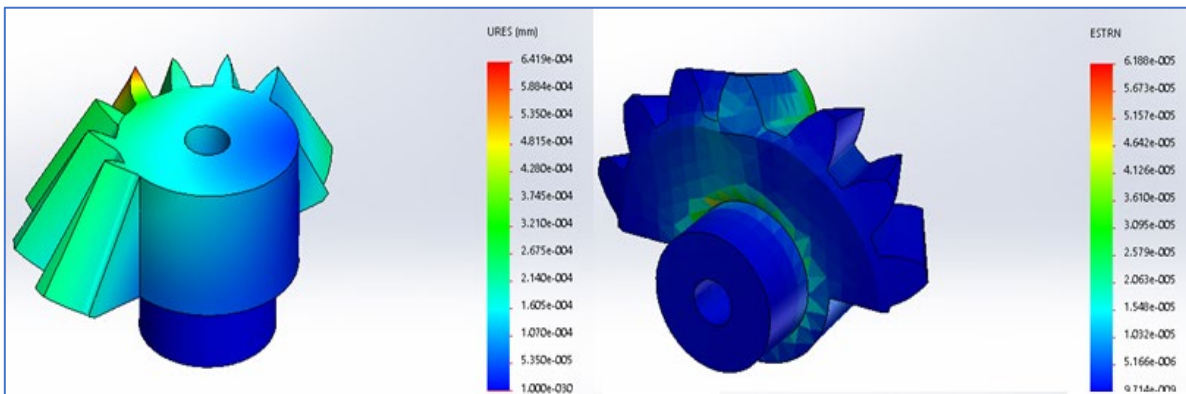


Figura 6.45 Desplazamiento usando servomotor MG995 y Aluminio (malla triangular a 200 elementos)

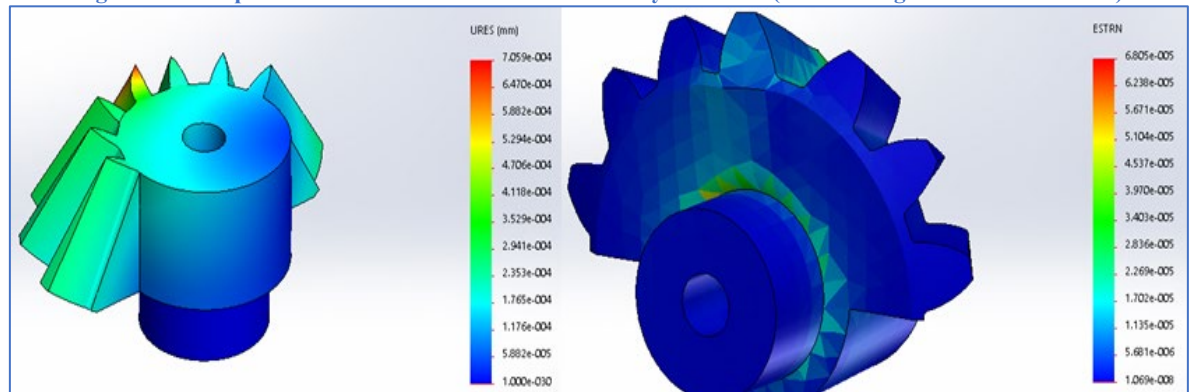


Figura 6.46 Desplazamiento usando servomotor MG996r y Aluminio (malla triangular a 200 elementos)

En las 6.43 a 6.46 se muestran los comportamientos de desplazamiento del engrane por servomotor que presentan el menor desplazamiento en un estudio estático.

Como se observa en las figuras, el material mejor evaluado es el aluminio, ya que sus características físicas son de una mayor dureza por lo que los desplazamientos se encuentran en el orden de un desplazamiento máximo de $7.059e^{-4}$ mm, lo que conlleva a una menor deformación al serle aplicadas las fuerzas de contacto con el engrane conductor. En el sistema de potencia se sugiere el uso de aluminio para mantener la eficiencia, sin embargo, el uso de

PLA, cuyos desplazamientos del orden de centésimas de milímetro, es adecuado para la producción de un prototipo experimental.

Análisis dinámico del prototipo de prótesis

Con los datos presentados en el apartado del modelo dinámico es posible ingresar estos en la matriz cinetostática para el punto máximo de aceleración en los centros de gravedad. Las variables que se buscan son las fuerzas de cada nodo de los eslabones están por componentes, lo cual facilita la operación de análisis por elementos finitos en ANSYS®. Se opera esta matriz en un software matemático de apoyo, de tal manera de obtener los resultados con el orden en el que se propuso la matriz. Las masas simuladas de cada eslabón por material se muestran en la tabla 6.12, dato que es importante para la obtención de las incógnitas en el sistema de nueve ecuaciones en la matriz.

Tabla 6.12 Masas de los eslabones por material

ESLAB/MATERIAL	ABS (gr)	PLA (gr)	ALUMINIO (gr)
Manivela	1.54	1.89	4.01
Biela	109.38	222.13	470.91
Oscilador	4.77	5.84	12.39

Los resultados de las fuerzas para cada servomotor y cada material se muestran en las tablas 6.13 y 6.14 a continuación. Esta información está dividida por los dos grupos de servomotores bajo condiciones cinemáticas.

Tabla 6.13 Fuerzas en los eslabones para el grupo I de servomotores

SG5010				S3003			
Fuerza	ABS	PLA	Aluminio	Fuerza	ABS	PLA	Aluminio
F12x	28.02629	27.3647	27.3575	F12x	28.0234	27.3647	27.3575
F12y	-87.92729	-87.8301	-86.8377	F12y	-87.9181	-87.8301	-86.8377
F32x	-28.02585	-27.3636	-27.3551	F32x	-28.0229	-27.3636	-27.3551
F32y	87.92777	87.8307	86.8389	F32y	87.9185	87.8307	86.8389
F43x	-38.78585	-38.9876	-39.9353	F43x	-38.7919	-38.9876	-39.9353
F43y	-58.88323	-59.1930	-60.6531	F43y	-58.8925	-59.1930	-60.6531
F14x	-38.79163	-38.9947	-39.9503	F14x	-38.7977	-38.9947	-39.9503
F14y	-58.87911	-59.1880	-60.6426	F14y	-58.8884	-59.1880	-60.6426
T14	-1995.17487	-1997.2881	-1982.8473	T14	-1765.3037	-1761.9930	-1747.55

Tabla 6.14 Fuerzas en los eslabones para el grupo II de servomotores

MG995				MG996r			
Fuerza	ABS	PLA	Aluminio	Fuerza	ABS	PLA	Aluminio
F12x	26.6559	23.4026	23.3276	F12x	26.6559	23.4026	23.3276
F12y	-86.9935	-89.1025	-82.8983	F12y	-86.9935	-89.1025	-82.8983

F32x	-26.6501	-23.3954	-23.3123	F32x	-26.6501	-23.3954	-23.3123
F32y	86.9965	89.1062	82.9061	F32y	86.9965	89.1062	82.9061
F43x	-40.0581	-39.5283	-45.4553	F43x	-40.0581	-39.5283	-45.4553
F43y	-60.8975	-60.1158	-69.2479	F43y	-60.8975	-60.1158	-69.2479
F14x	-40.0951	-39.5736	-45.5515	F14x	-40.0951	-39.5736	-45.5515
F14y	-60.8736	-60.0865	-69.1857	F14y	-60.8736	-60.0865	-69.1857
T14	-2326.07	-2346.66	-2256.2919	T14	-2424.10	-2444.7021	-2354.33

Eje de transmisión de potencia y pernos de rotación

Para comenzar con el diseño mecánico, se debe diseñar el ancho del eje de potencia que transmitirá el movimiento oscilatorio al resto del mecanismo cerrado inferior. El torque determinado por la ficha técnica de los servomotores será un dato importante en el diseño del eje, al cual se le realizará también un estudio de esfuerzos por análisis de elementos finitos, al igual que a los eslabones. El concepto de par de torsión es un elemento que debe considerarse al momento de diseñar ejes de potencia. Anteriormente se ha mencionado el torque, el cual es la fuerza aplicada a un radio y que debe considerarse, ya que el empleo de materiales que son fácilmente deformables o altamente rígidos puede provocar fallas estructurales y rupturas.

Se puede definir el par de torsión como el momento que tiende a torcer a un elemento sobre su eje longitudinal, por lo que es necesario determinar el esfuerzo y la deformación que ocurren en el eje cuando se le somete a un torque (Hibbeler, 2017). Este torque se da entre los engranajes, y tal como se mencionó al realizar el diseño del par engranado, los torques se mantienen en la relación de transmisión ya que la potencia es constante. Así, conociendo el torque T_{12} , el cual es el que está conectado al conducido, se puede conocer la sección transversal, las dimensiones mínimas del eje, a través de la ecuación 6.24, la cual comprende el momento polar de inercia para un eje de perfil circular sólido.

$$r = \sqrt[3]{\frac{2T}{\pi\tau_{max}}}$$

Ecuación 6.24 Sección transversal a partir del torque y el momento polar de inercia

Donde:

r.- Radio del exterior de la sección circular.

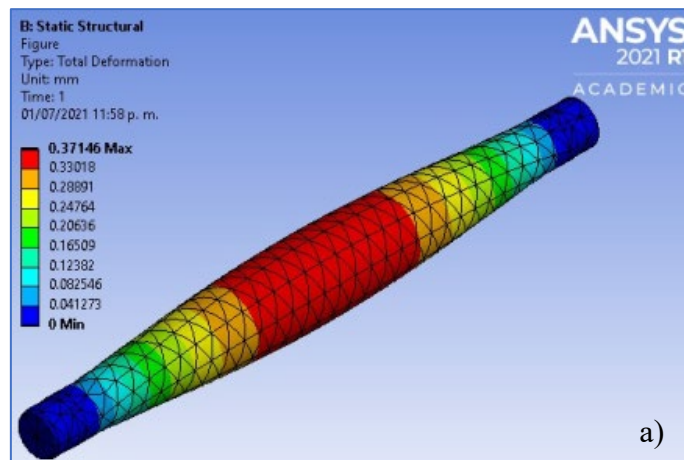
T.- Torque suministrado por el par engranado.

τ_{max} .- Esfuerzo cortante máximo del material.

Siendo que el material para este cálculo, debe ser el que menor esfuerzo cortante permisible tenga se determinará el radio máximo que puede soportar el torque más alto en la lista de los servomotores a utilizar. A lo largo del documento se ha presumido el uso de propiedades máximas de tal manera que se asegure el dispositivo de soportar las cargas vivas a condiciones máximas. Siendo esta presunción entonces para $T=681.54 \text{ N}\cdot\text{mm}$ y, dadas las características del material PLA, el esfuerzo máximo se contabiliza a 37MPa. Entonces, sustituyendo en la ecuación se tiene que el radio mínimo es de 2.272 mm, un diámetro de flecha mínimo de 4.544 mm.

Ya que las piezas serán ensambladas, se sugiere para los ensambles el uso de tolerancias específicas o exactas. Se tiene en consideración para ensamblar tanto dos engranes conducidos, a los cuales se les debe determinar el ensamble en flecha, así como el cojinete que permitirá la rotación más suave al eje de potencia, lo que disminuirá sus posibilidades de fatiga y por lo tanto de la aparición de grietas y ruptura.

Por cuestiones de una más fácil manufactura, se ha elegido un diámetro de flecha de 5 mm, un diámetro cerrado para serle aplicado un ajuste exacto para el eje bajo la norma DIN ISO 286. Considerando que los esfuerzos no son excesivos a más de 100 N tanto para el peso ni torques altos, es posible utilizar un rodamiento de bolas tipo 638/5-2Z, de blindaje en una sola cara. Tomando en consideración lo anterior, es posible diseñar la conexión entre el mecanismo y el cuerpo del perro. En la figura 6.47 a) se muestra el estudio por elementos finitos realizado a la flecha diseñada. Se presenta así en la figura 6.47 b) el estudio de factor de seguridad que será aplicado para todo el mecanismo. En el Anexo 3 se presenta el diseño acotado.



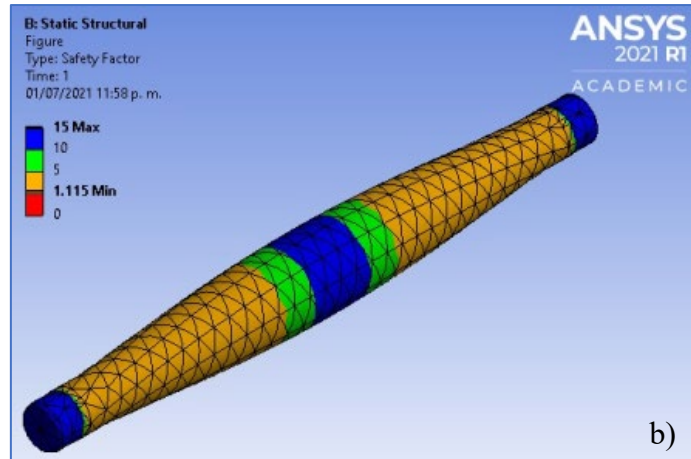


Figura 6.47 a) Deformación total de flecha PLA al ser aplicado el torque, b) Factor de seguridad a considerar (FS=6.5)

El dato obtenido para todo el mecanismo del factor de seguridad (se ha optado por el factor promedio del estudio de la flecha para FS=6.5, es posible determinar las secciones transversales tanto de los pernos de rotación como de los elementos componentes del mecanismo, los cuales serán utilizados para el diseño de los eslabones de cara a una manufactura más óptima, como se verá más adelante.

Las fuerzas que se han obtenido por el estudio cinetostático se pueden considerar tanto como esfuerzos de corte como esfuerzos normales, los primeros son útiles para calcular el mínimo de la sección transversal de los pernos de rotación para soportar dichas fuerzas y las segundas que permitan encontrar el mínimo de dimensiones de la sección para cada eslabón, en especial para la manivela y el oscilador. Siendo que para el ángulo de entrada del mecanismo bajo el que se realizó el estudio dinámico, las fuerzas máximas en todo el evento, es decir una revolución, se considera la resultante en cada nodo como la fuerza cortante sobre el perno. Bajo los criterios de diseño de esfuerzo permisible se puede considerar la fuerza de falla como el punto máximo que se espera esté cercano a lo calculado anteriormente. Para el cálculo de esfuerzo permisible para los pernos está en relación tanto de los esfuerzos de falla y el permisible, el cual es el que se requiere para calcular la sección transversal, expresadas en las ecuaciones 6.25 a) y b). Estas fórmulas aplican de la misma manera para conocer los anchos de los eslabones.

$$FS = \frac{\tau_{falla}}{\tau_{perm}} = \frac{\sigma_{falla}}{\sigma_{perm}}$$

$$A = \frac{V}{\tau_{perm}} = \frac{F}{\sigma_{perm}}$$

Ecuación 6.25 a) Factor de seguridad por esfuerzo permisible; b) Área de sección transversal por efectos de corte y esfuerzo normal




A continuación, se presenta una tabla donde se encuentran los diámetros mínimos de cada perno utilizando la máxima fuerza obtenida en los nodos, la que corresponde con el primer bloque mostrado en la tabla 5.10. En las características de los materiales que se presentan en el Anexo 1 de materiales y componentes, se encuentra que los esfuerzos de falla para los materiales plásticos y aluminio con el cual se puede sustituir en las ecuaciones anteriores para los pernos, los cuales tendrán una sección transversal circular y los eslabones con sección transversal cuadrada. Los primeros se muestran en la tabla 6.15.

Tabla 6.15 Diámetros en milímetros de cada material por esfuerzo permisible

		Materiales	
Nodo	Fuerzas (N)	ABS/PLA	Aluminio
N12	92.2858	5.41991	0.98325
N23	92.2862	5.41992	0.98325
N34	70.5093	4.73748	0.85945
N14	70.5091	4.73748	0.85945

Para los eslabones tanto de oscilador como de manivela se considera el esfuerzo en el eje y para las fuerzas normales. Realizando el cálculo de acuerdo con las ecuaciones anteriores el orden de los espesores esperado se encuentra en 0.5 mm, mínimo.

Análisis de esfuerzos y optimización topológica de elementos del mecanismo de prototipo
Siendo que la máxima fuerza para todos los materiales se encuentra en el material PLA, se utilizará este esfuerzo máximo para realizar el análisis de esfuerzos para cada material. En el análisis mecánico se colocarán los esfuerzos en cada conexión del eslabón para conocer el comportamiento de la deformación del eslabón. Los estudios que se realizarán aplicando las fuerzas que aparecen en los diagramas de cuerpo libre son estudios estáticos.

-  Esfuerzo equivalente.
-  Deformación total.
-  Esfuerzo normal.

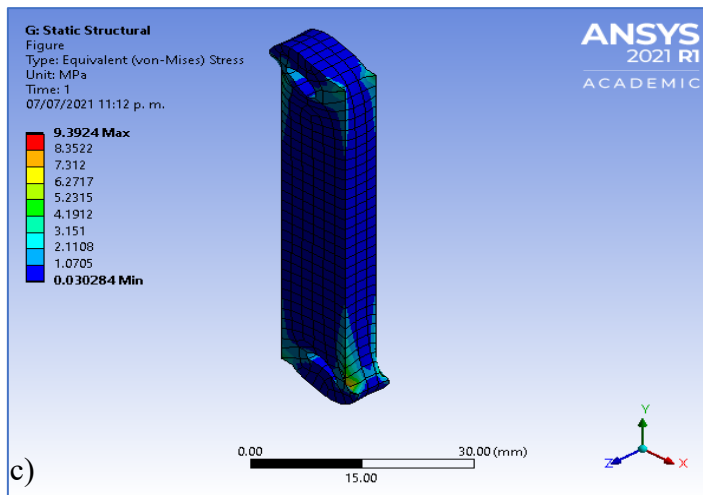
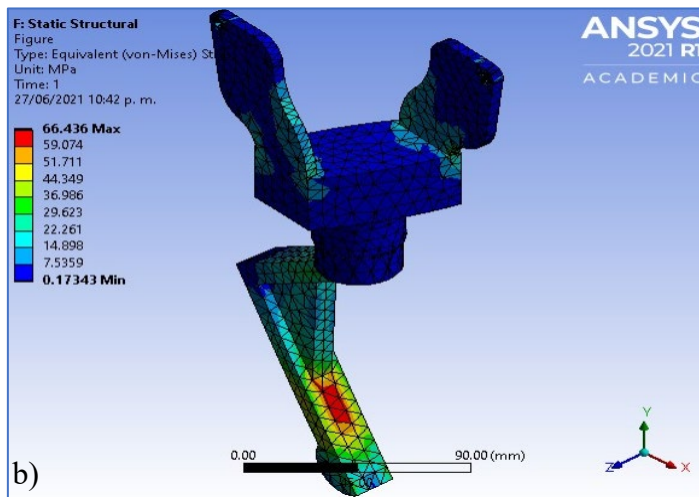
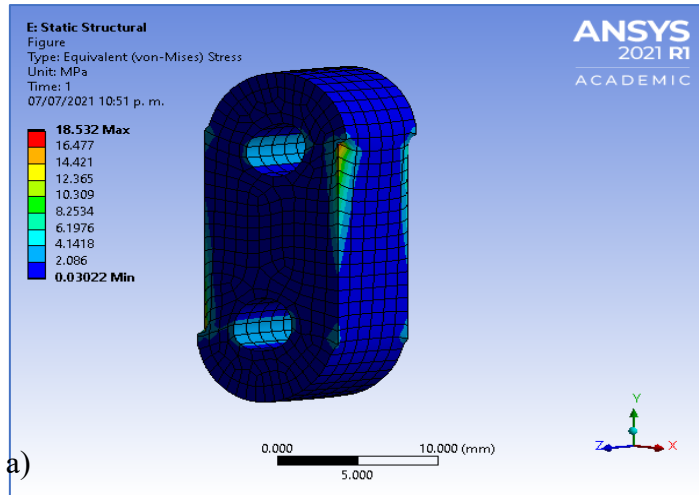


Figura 6.48 Esfuerzos de Von Mises en a) Manivela; b) Biela, c) Oscilador para plásticos

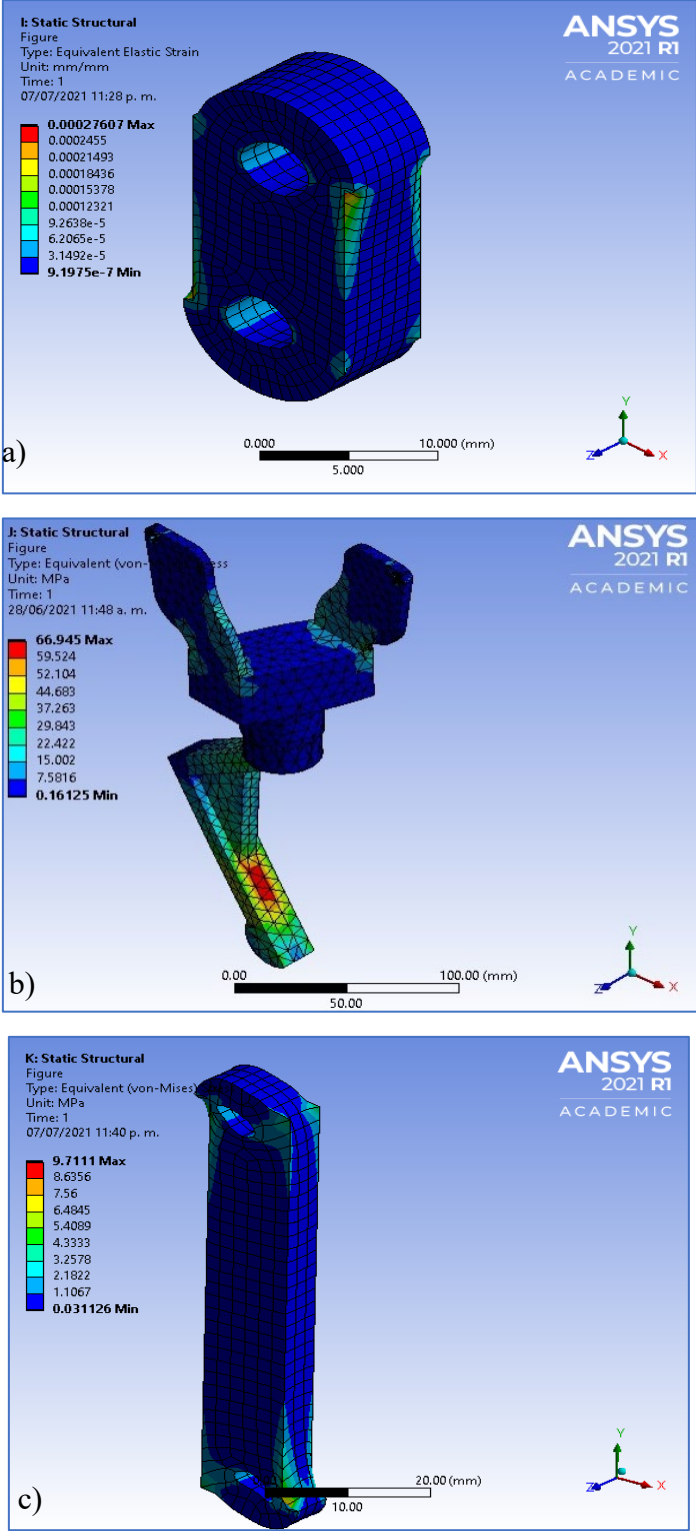


Figura 6.49 Esfuerzos de Von Mises en a) Manivela; b) Biela, c) Oscilador para aluminio

Las anteriores figuras 6.48 a) a c) y 6.49 a) a c) muestran (correspondientes a plástico ABS y PLA cuyos resultados son muy cercanos por los que se puede considerar un mismo grupo, y

aluminio) el mallado de las piezas, así como el resultado obtenido por el programa CAE en la aplicación de esfuerzos equivalentes, puntos en donde existe un posible mayor punto de fractura. El estudio completo de cada eslabón se muestra en el anexo 4 de resultados.

Con las figuras anteriores se puede observar la cantidad de esfuerzo máximo por área efectiva, es decir, el comportamiento que tendrá cada geometría de acuerdo con los esfuerzos máximos presentados en la tabla 6.13 y 6.14 de acuerdo con el material propuesto.

Sin embargo, como es de observar en las figuras 6.48 a) y 6.49 b) para ambos, se encuentra un punto de peligro en la zona inferior del nervio de la biela. En el software CAE el uso de colores para designar zonas de menor a mayor efecto es una herramienta rápida que permite al diseñador encontrar puntos de interés en donde se debe poner la mayor atención. En este caso se realizó un prototipo en el material PLA y se ha aplicado un esfuerzo considerable en forma axial, esto para verificar los resultados obtenidos en la simulación por elementos finitos. El resultado obtenido fue una fractura y ruptura del elemento rígido y, presumiblemente para un prototipo realizado en aluminio, este esfuerzo representaría un pandeo de peligro para el perro. En la figura 6.50 se muestra el prototipo realizado y cómo se generó esta fractura; el nervio ayuda en la “repartición” de fuerzas a lo largo del componente, sin embargo, la ubicación de este en el modelo en CAD y analizado en el software CAE demuestra que existirá una ruptura o pandeo crítico en la zona inferior del nervio. Por lo que es de considerar extender el nervio cruzando esta zona para evitar la fractura o pandeo ya sea en los materiales plásticos como para el aluminio.



Figura 6.50 Componente mecánico en material plástico fracturado en la zona marcada por el software CAE

Con esto en mente es posible reestructurar este elemento desplazando la posición del nervio para abarcar una mayor área de tal manera que el mismo nervio “disperse” el esfuerzo y

proporcione mayor seguridad al elemento. En los sólidos CAD, a los cuales previamente se han suprimido los redondeos para facilitar el trabajo del software ANSYS®, esto también para el elemento de soporte de carga viva, y se ha vuelto a analizar con las mismas fuerzas, siendo con este nuevo diseño que existe una menor probabilidad de causa de falla en la zona donde el prototipo en material PLA se fracturó. Los resultados obtenidos con el nuevo diseño se muestran en la figura 6.51, en donde esta zona de falla se ha reducido.

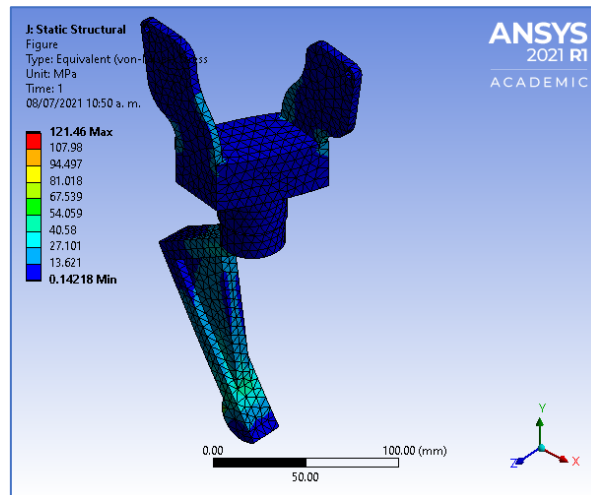


Figura 6.51 Nuevo estudio de FEA para la biela del mecanismo

Ahora, siendo que estos datos son importantes para poner atención a las zonas de mayor respuesta a la carga para futuras modificaciones y elaboraciones de versiones más perfeccionadas, se propone para la manufactura de los elementos una metodología de diseño conocida como Optimización Topológica.

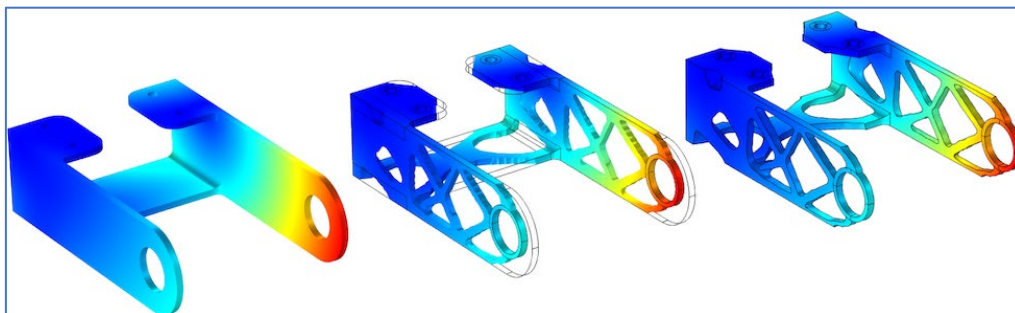


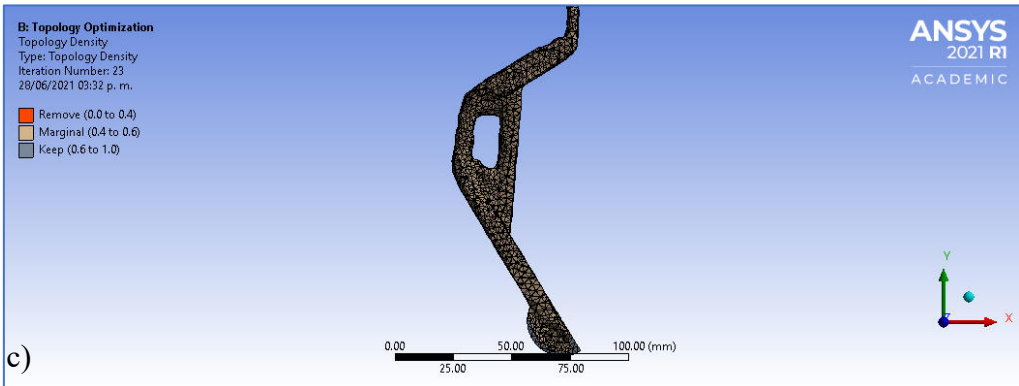
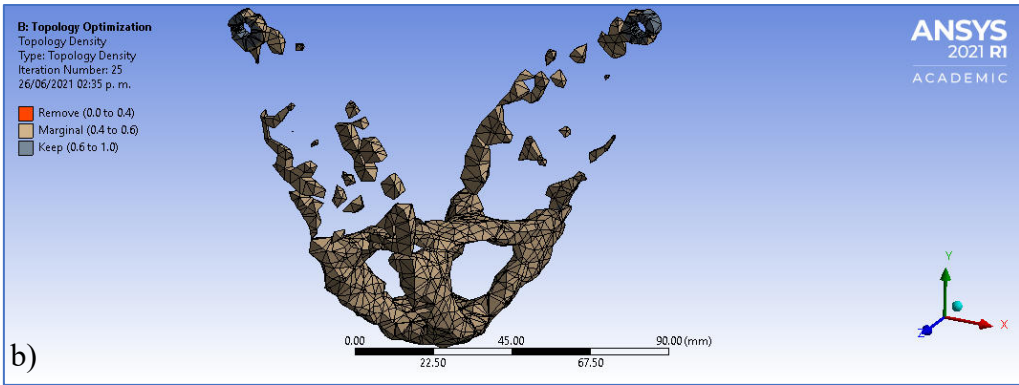
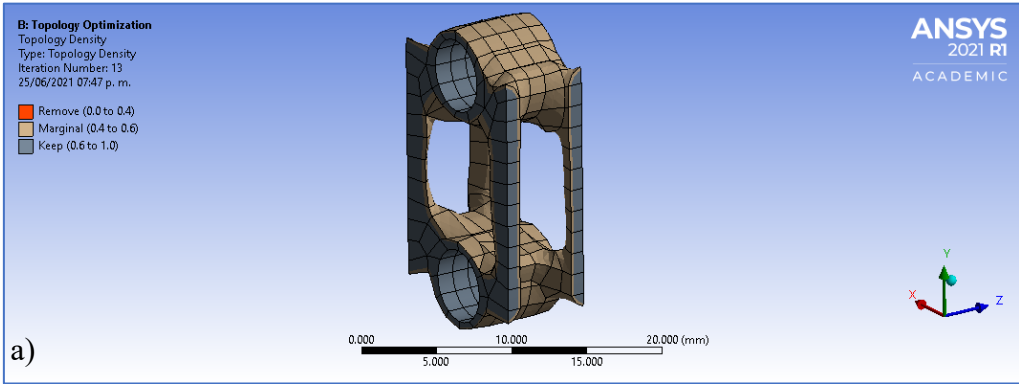
Figura 6.52 Optimización topológica aplicada a una pieza mecánica

La optimización topológica (OT) es una herramienta matemática que le permite al diseñador sintetizar topologías óptimas, en la figura 6.52 se muestra un ejemplo de este estudio.

En ingeniería mecánica se entiende como topología óptima a una pieza o parte de una máquina o mecanismo diseñada especialmente para maximizar o minimizar alguna característica deseada

(Meza & Tamayo, 2015). El uso de esta herramienta por medio de ANSYS® nos ayudará a mejorar las formas de fabricación de cada una de las piezas, minimizando las masas sin sacrificar el comportamiento mecánico, es por ello que el software CAE requiere primero la implementación de los estudios de esfuerzos y deformaciones para aplicarse la solución numérica.

Como se mencionó, es necesario que se realice este estudio ante el mayor de los esfuerzos y desplazamientos de los elementos ante la máxima fuerza aplicada, esto hará que la solución numérica de optimización funcione para un máximo esfuerzo aplicable.



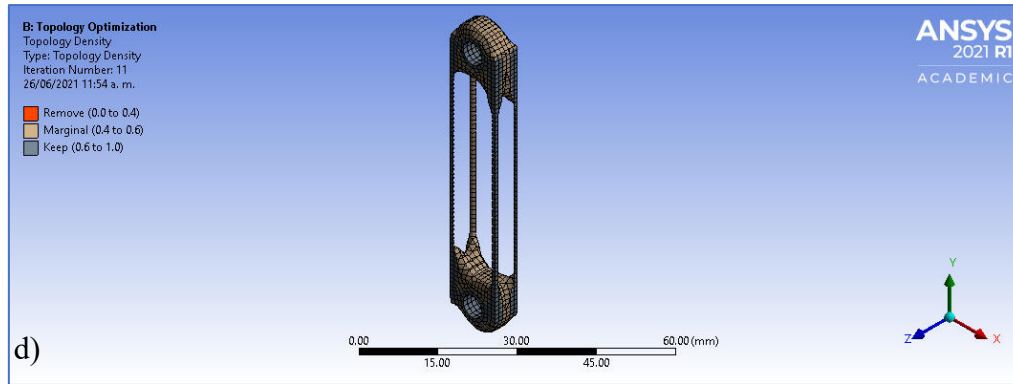


Figura 6.53 a) Optimización de manivela, b) optimización de primera sección de biela, c) optimización de segunda sección de biela, d) optimización de oscilador

Las figuras 6.53 a) a d) muestran la optimización generada para un porcentaje de 20% a 50% de masa residual en cada eslabón.

El software CAE ANSYS Workbench® posee una extensión donde se puede realizar sólidos nuevos a partir de perfiles optimizados. Con esto es posible generar figuras optimizadas basadas en los resultados de este estudio. La figura 6.53 b) muestra la parte superior de la biela, la cual muestra un espacio en blanco que no debería existir, por lo que para la generación de un sólido nuevo vía CAD solamente se tomará en consideración el espacio vacío en la base de la conexión, siendo que la biela se genera de dos piezas unidas por una rosca métrica M20 con un paso de rosca de 2.5mm. Los planos de manufactura para cada elemento del mecanismo de cuatro barras inferior se muestran en el Anexo 3 de planos y diagramas.

Materiales para prototipo, comparación de costos

Con lo obtenido en los análisis tanto dinámicos como estáticos por medio del análisis de elementos finitos, el material cuyo comportamiento maneja de menor manera los esfuerzos y torques es el aluminio, pudiendo usarse para este cualquier servomotor. Si bien los materiales plásticos también muestran una eficacia aceptable, ya que sus deformaciones y esfuerzos equivalentes no son excesivas, para la fabricación de un prototipo experimental se utilizará el proceso de manufactura aditiva por impresión 3D con el uso de filamento PLA, las condiciones bajo las que manufacturarán las piezas se indicarán en la sección correspondiente más adelante. Siendo así, la lista de materiales y componentes mecánicos a utilizar se muestra en la tabla 6.16 junto con sus costes de adquisición. Este será el costo total de materia prima para torques máximos, es decir, se usará el servomotor que ofrezca el mayor torque por cada uno de los dos grupos y se comparará por costos, dando así los materiales que conformarán el diseño ganador,

así como los costos de manufactura por material para validar el uso de impresión 3D para un prototipo experimental, mas no para un producto comercializable.

Tabla 6.16 Relación de costos para cada material y elemento motor

PLÁSTICOS	COSTO (MXN)	ALUMINIO	COSTO (MXN)
Grupo Motor I	\$95	Grupo Motor I	\$95
Grupo Motor II	\$104	Grupo Motor II	\$104
Manivela	\$0.27	Manivela	\$0.29
Biela	\$36	Biela	\$41.57
Oscilador	\$0.84	Oscilador	\$0.92
Engrane conducido (2 piezas)	\$3.4	Engrane conducido (2 piezas)	\$3.8
Engrane conductor	\$5.81	Engrane conductor	\$10.81
Flecha	\$0.34	Flecha	\$2.34
Pernos (3 piezas)	\$0.2	Pernos (3 piezas)	\$1
Rodamiento 629/5- 2Z	\$30	Rodamiento 629/5- 2Z	\$30
Impresora 3D (único equipo)	\$7000	Equipo de Fundición	\$13,147

La información presentada nos dará la pauta para seleccionar el diseño ganador en todos los elementos, tanto los elementos físicos como económicos, por lo que, para los efectos de generación de un prototipo experimental, es posible la construcción de un prototipo con base a un elemento plástico con impresión 3D, ya que para obtener los elementos en fundición en aluminio es necesario también la manufactura de moldes en plástico. El plástico que será utilizado es PLA para un prototipo experimental y el equipo de manufactura una impresora 3D de la marca SUNLU®, modelo S8 y el servomotor, el Futaba® S3003.

Diseño de un sistema embebido de control electrónico

En la actualidad, los dispositivos que usamos día con día están fabricados con una serie de sistemas que realizan una tarea específica. Desde el teléfono celular, las televisiones, e incluso los automóviles; cada uno de los dispositivos y máquinas mencionadas poseen un grado de

control que es administrado por un conjunto de elementos, el cual se denomina en el campo de la ingeniería como un sistema embebido.

Una definición simple de un sistema embebido o empotrado (derivado del inglés *embedded system*) es la de un sistema de control (generalmente electrónico e informático) diseñado para ejecutar una pequeña cantidad de tareas, siendo este parte de una entidad mucho más grande. Todos los componentes del sistema están ubicados todos en una tarjeta o placa base o madre (*motherboard*), por lo que se les llamaba empotrados (Úbeda Miñarro, 2009). Al igual que una computadora personal, un sistema embebido está compuesto de dos elementos principales: software y hardware.

En lo que involucra al software, en el sistema se pueden programar las instrucciones que el desarrollador desea que el sistema realice a lo largo de todo su ciclo de trabajo. Este programa se almacena en una memoria física, la cual estará disponible en todo momento cuando se alimente el sistema, así como las directivas de los periféricos con los que el programa interactuará con el exterior, es decir, con el hardware.

Tal como en las computadoras personales, el software (el sistema operativo y los programas) interactúan con el usuario o sistema externo por medio del hardware, elementos electromecánicos que envían señales para el software, de tal manera que este los interprete y a su vez, de acuerdo con el programa que tiene cargado, envíe salidas para interactuar con el operador o con otro sistema adyacente (Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control, 2011).

El almacenaje y administración de periféricos corre a cargo de un microcontrolador. El microcontrolador es un circuito integrado programable, el cual, en su arquitectura interna, posee los elementos principales para tales tareas, ya que para que un microprocesador, como el que se usa en las computadoras, pueda realizar tareas de control es necesario el uso de elementos externos tales como memorias y periféricos de entradas y salidas de datos, los cuales los primeros sí poseen. En la figura 6.54 se muestra la estructura básica que compone a los microcontroladores de forma general, estos se describirán de forma breve a continuación.

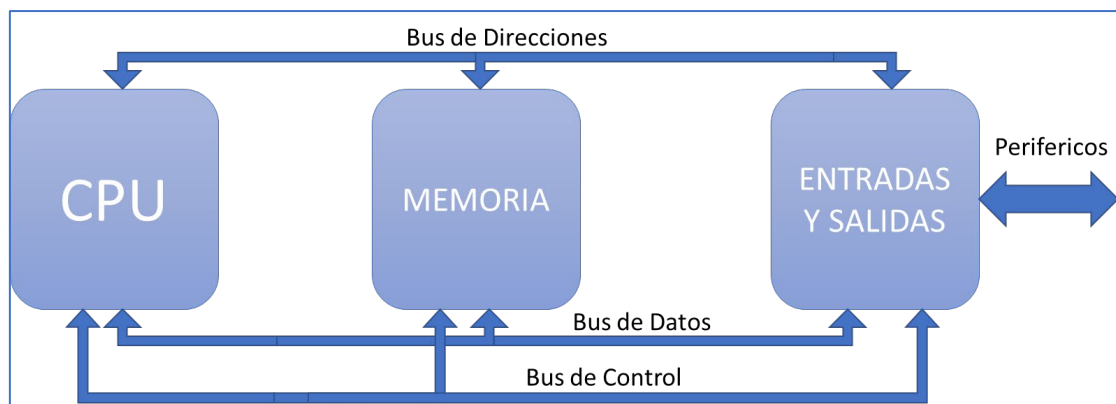


Figura 6.54 Esquema general del microcontrolador. Tomada de: Valdés (2007)

CPU: Es el cerebro del microcontrolador. Esta unidad maneja las instrucciones del programa que se guardaron en la memoria y los interpreta y ejecuta de tal manera que todo lo que el microcontrolador percibe o tiene la necesidad de controlar, opere de acuerdo con lo deseado por el programador.

Memoria: Es la sección donde se guarda el programa donde el desarrollador indica las instrucciones relativas a lo que se desea del controlador. Ya que el microcontrolador es un sistema digital, las instrucciones deben ser traducidas a lenguaje máquina (sistema binario) para que pueda actuar. Ya que el operador no puede construir un programa en lenguaje máquina puro, es posible utilizar software especializado de desarrollo en el que se usa lenguajes de programación (los más comunes son el lenguaje Ensamblador, C, C++ e incluso Python) para crear un algoritmo que será traducido en sistema hexadecimal por medio de un entorno de desarrollo o IDE, que es mucho más fácil de convertir a binario y para que el microcontrolador pueda interpretar las instrucciones en su CPU.

Entradas/Salidas: Se trata de la comunicación entre el controlador y el exterior, es la parte de su arquitectura encargada de la interacción entre lo que se le inserta al sistema y lo que el sistema arroja. Están relacionadas tanto con la memoria como con la CPU, ya que la interacción de éstas con la memoria se encuentran direccionadas a unos bloques conocidos como registros. Aunque el tamaño de los bloques varía entre modelos y fabricantes, en todos los controladores la relación siempre es la misma. El controlador puede comunicarse con el exterior por medio de periféricos. En la figura 6.55 se muestra un sistema embebido controlado por microcontrolador en los que se ve el circuito integrado y los periféricos de entradas y salidas que se requieren para el fin deseado del desarrollador.

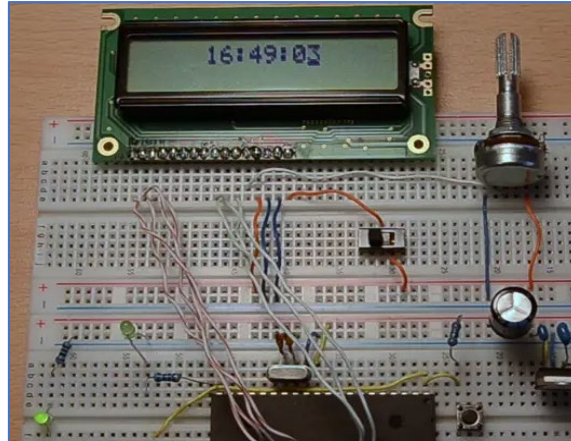


Figura 6.55 Sistema embebido basado en microcontrolador. Tomado de: Úbeda Miñarro (2009)

Las características que hacen atractivos a los microcontroladores para un sistema de control se pueden enumerar con las siguientes (Valdés Pérez & Pallás Areny, 2007):

- ✚ Facilidad de recursos de entrada y salida, generando un fácil acceso a las interfaces de información para ejecutar el algoritmo en el microcontrolador.
- ✚ Se trata de tener el menor espacio posible en componentes. Dado el número de terminales en el circuito integrado se limita a un pequeño encapsulado.
- ✚ Existe una gran gama de microcontroladores con diferentes características en memoria y periféricos.
- ✚ Los microcontroladores son de bajo consumo, requieren poca corriente para trabajar y pueden ser alimentados con baterías.

Para el presente proyecto se proponen dos sistemas embebidos independientes que, si bien interactuarán entre sí, tienen su independencia. Dado que se prioriza el tamaño del sistema como un punto importante para la selección del microcontrolador, se eligen por su precio y tamaño dos de la familia PIC16F8X de la empresa Microchip®. Los PIC (Peripheral Interface Controller) son un circuito integrado con arquitectura Harvard (diseño de computador basado en la interacción mutua entre el CPU, la Memoria y las Entradas/Salidas por buses diferenciados e interconectados) en el que la memoria está repartida en memoria de programa y de datos.

La memoria de programa es donde se almacena el algoritmo programado por el desarrollador, y se guarda a través de un dispositivo físico conocido como “grabador” o “quemador” a través de una comunicación con una computadora. En la figura 6.56 se muestra el programador utilizado para grabar los algoritmos desarrollados para cada sistema embebido, el cual utiliza un puerto USB para comunicarse con la computadora y zapatillas para colocar el controlador para

serle grabado el programa. La memoria es no volátil (no se borra la información ante la desconexión de la alimentación) y se le denomina como ROM (*Read Only Memory*) Flash; siendo para los micros de gama media un mínimo de 1024 posiciones, organizadas en “palabras” de 14 bits. La palabra (*Word* en inglés) es una unidad lógica de información almacenada en una celda de memoria, un arreglo unidimensional de 1, 8, 12, 14 o 16 bits de longitud (Valdés Pérez & Pallás Areny, 2007). Para los datos que son recibidos por las entradas/salidas se almacenan en la memoria de datos, también denominada RAM (*Random Access Memory*); esta es volátil, ya que al quitarse la alimentación los datos se borran.

Las entradas y salidas son puertos a través de los cuales el microcontrolador interactúa con el mundo exterior. Están divididos por líneas digitales que trabajan en niveles lógicos de 5V y niveles lógicos bajos de 0V. Estos se pueden configurar en el algoritmo para recibir datos o como salidas para manejar dispositivos externos. Las líneas son capaces de entregar niveles del tipo TTL (Lógica Transistor-Transistor) para el voltaje de alimentación de 5V, por lo que se puede decir que es de bajo consumo (Palacios, Remiro, & López, 2009).

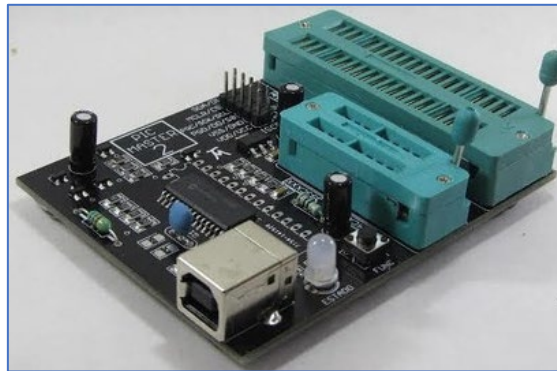


Figura 6.56 Programador Master Prog® para programación de microcontroladores PIC

Sensores, controles, actuadores y comunicación

Para que un sistema embebido se pueda considerar un elemento constitutivo y de control en un sistema mecatrónico, los elementos de entrada de datos deben ser sensores y las salidas deseadas, efectuadas por actuadores. Una definición apropiada para el término “sensor” es la de un dispositivo que presenta una reacción ante estímulos físicos (eléctricos, mecánicos, térmicos, etc.); produciendo una respuesta en forma de señal eléctrica, la cual puede ser medida. Por lo general, estas señales son de una magnitud muy pequeña, por lo que deben ser tratadas previamente por una serie de métodos que son bien descritos en la bibliografía referente a la

automatización o la mecatrónica (García Moreno, 2001). Lo primero que se debe tomar en cuenta para saber qué sensor aplicar se puede definir como:

- ✚ ¿Qué tipo de medición se va a realizar? Su valor nominal, el intervalo de valores, la velocidad de medición y confiabilidad, así como las variables ambientales que podrían causar algún error.
- ✚ ¿Qué tipo de salida se requiere del sensor? Esto para determinar el tipo de acondicionamiento de señal que se hará para el control programable.
- ✚ ¿Para qué se va a utilizar el sensor? Las capacidades propias del sensor para realizar su trabajo en determinados ambientes.

Considerando que el sistema mecánico que previamente se ha diseñado posee como variables desplazamientos angulares para ejecutar su accionamiento, es necesario el uso de un sensor que sea capaz de interpretar los cambios angulares con precisión (Bolton, 2013). Dado que la hipótesis del presente trabajo refiere a la capacidad del sistema que se desea diseñar a reproducir un movimiento de tipo “espejo” de la extremidad delantera derecha frente a su opuesta, es necesario determinar las posiciones o los estados de posición de un punto determinado (en este caso la variación de cualquier punto del hombro en la línea normal, por lo que el sistema embebido debe estar unido a la pata sana del perro para poder detectar estas variaciones de posición y, por tanto, su tamaño debe ser pequeño, lo más ligero y cómodo posible, que pueda ser adaptado a la pata del animal sin lastimarlo y sin que el sistema electrónico se maltrate o se caiga constantemente. Con estas condiciones ambientales se puede determinar una característica discriminatoria para el sensor a utilizar: el tamaño. Ahora, con estos dos datos podemos encontrar un sensor de tamaño reducido y que la variable a medir es el ángulo: un acelerómetro.

Sensor acelerómetro MMA7361

Este sensor es del tipo MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*), los cuales poseen elementos mecánicos (palancas, engranes) y eléctricos (capacitancias, inductancias) en tamaños del orden de micras, los cuales actúan de acuerdo a estímulos físicos para los que fueron diseñados. En la figura 6.57 se muestra un tipo de MEMS compuesto por una serie de palancas responsivas al movimiento y la gravedad. Estos elementos miniaturizados están fabricados con materiales semiconductores como el silicio, por lo que su presentación se puede colocar en encapsulados tipo circuito integrado (MEMS and Nanotechnology Community, 1999), lo que facilita su uso e implementación en los sistemas embebidos.

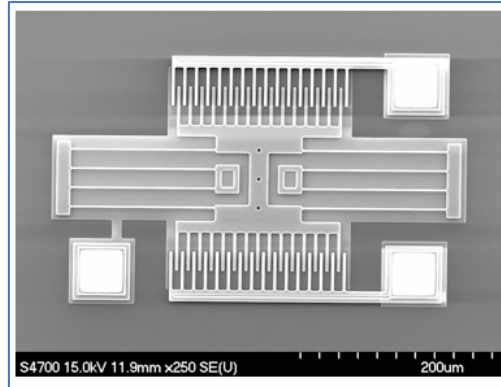


Figura 6.57 Vista de un MEMS al microscopio. Tomada de: MEMS and Nanotechnology (1999)

El acelerómetro es un dispositivo que es sensible a la rotación en torno a los ejes del sistema coordinado en sus tres dimensiones, donde el centro es coincidente con el centro de gravedad del dispositivo. Este tipo de MEMS se construye a base de sustratos conductores a manera de capas, depositadas una sobre otra formando una pequeña superficie, con el fin de generar estructuras con propiedades transductoras (Corona Ramírez & Abarca Jiménez, 2019). Siendo que está involucrado el centro de gravedad, este es sensible a los cambios de aceleración en su sistema respecto a su CG, por lo cual recibe este nombre. Es muy utilizado en dispositivos móviles (tablets y smartphones) y también en los drones; el principio de trabajo se basa en los parámetros cinemáticos de la robótica, donde la rotación de cada eje tiene una denominación particular: para la rotación en el eje “x” el movimiento se denomina *roll*; para el eje “y” *pitch* y para el eje “z” denominado *yaw*. Estos se muestran en la figura 6.58 respecto a una mano humana y una junta mecánica. Con estos datos podemos encontrar el eje sobre el que se puede medir respecto a los planos anatómicos del perro.

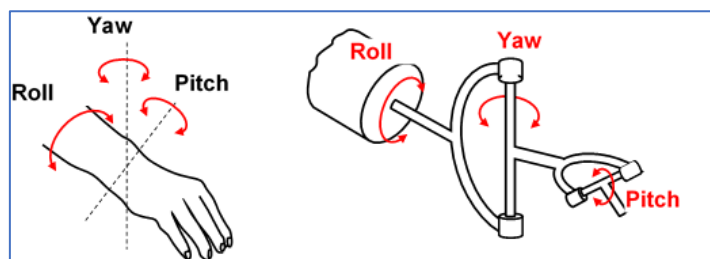


Figura 6.58 Sentidos de rotación de los parámetros *roll*, *pitch* y *yaw*. Tomada de: <https://roboticajh.wordpress.com/2013/08/26/estructura-de-los-robots/>

Se pueden considerar dos variables independientes para determinar sobre qué eje se medirá el movimiento de la extremidad delantera sana del perro, determinar el cambio de posición sobre el plano medio, es decir, una especie de balancín o movimiento de balanceo sobre el plano

medial del perro; y también, se puede considerar el plano dorsal completo, para este movimiento de balanceo. A pesar de que parece que son sistemas diferentes, el movimiento siempre es el mismo, el movimiento de *roll*, por lo que tanto el sensor como el actuador, el mecanismo del prótesis, son de un solo grado de libertad por lo que el uso de cualquier sensor acelerómetro es útil para esta aplicación específica.

El sensor que se pretende utilizar para el primer sistema embebido es el acelerómetro GY-32 MMA7361L de tres grados de libertad, el cual posee un pequeño tamaño y una distinción en sus pines sobre los ejes que está trabajando, marcado en una serigrafía en la cara superior. Las características del sensor se listan en su hoja de datos, la cual se encuentra en el Anexo 1 de materiales y equipos utilizados.

A continuación, en la figura 6.59, se muestra la distribución de pines del acelerómetro utilizado. Este sensor posee 10 terminales de las cuales no se usará la mayoría hacia los periféricos del microcontrolador. Las señales que el sensor arroja son de tipo analógico, por lo que es importante definir los pines que serán utilizados al momento de generar un circuito embebido de tal manera que ocupe el menor espacio posible y consuma la menor cantidad de energía desde una fuente como lo puede ser pilas de 1.5V o una batería de 9V.

La línea izquierda de pines en la vista superior (donde se encuentran los circuitos integrados) se encuentran los pines de entradas y salidas, estos son:

- ✚ GND o pin de tierra.
- ✚ X o pin de *roll*.
- ✚ Y o pin de *pitch*.
- ✚ Z o pin de *yaw*.
- ✚ 5V o pin de alimentación.

La línea derecha de pines en la vista superior (donde se encuentra los circuitos integrados) se encuentran los pines de estado de lectura y de modo de ahorro de energía, estos son:

- ✚ GND como una segunda toma de común o tierra
- ✚ GS como indicador de sensibilidad en la medición. Para el caso de una baja sensibilidad, el pin debe ir conectado al común. Para el caso de una alta sensibilidad debe conectarse a una fuente regulada a 3.3V
- ✚ ST (pin sin soldar) como pin de testeo en fábrica. Al ser solo como testeo no se suelda a una terminal.

- ✚ SL como modo de ahorro de energía o *sleep*. Se coloca en GND para colocar el acelerómetro en modo de ahorro de energía.
- ✚ 0G como modo de caída libre. Este es más útil en su aplicación para VANTs (Vehículos Aéreos No Tripulados). Este se coloca al común.

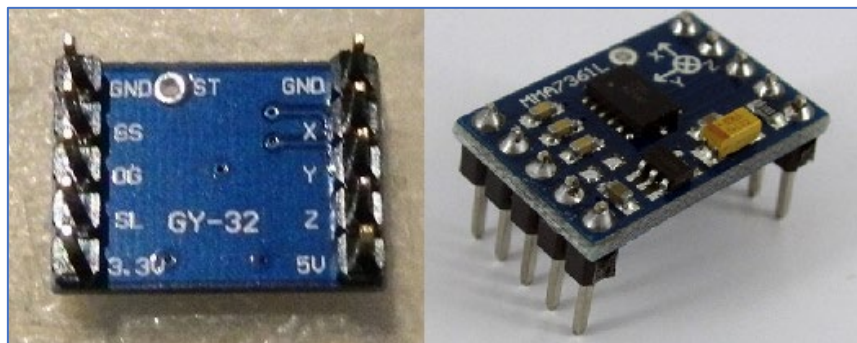


Figura 6.59 Sensor acelerómetro GY-32 MMA7361L. Tomada de: <https://www.didacticaselctronicas.com/index.php/sensores/acelerometros-gyros/acelerometro-gy-32-tarjetas-sensores-aceler%C3%B3metros-3-ejes-3-grados-3dof-3-dof-imu-mma7361l-detail>

Siendo el acelerómetro un sensor, y específicamente el MMA7361L un sensor del tipo piezorresistivo, es de esperar que los datos que emita al ser sometido a su variable física sensible, sean eléctricos y que requieran ser interpretados. Para esto se realizó un experimento a modo de conocer cómo el sensor arroja los datos al moverlo en sentido de un eje de rotación; para esto se utilizó una plataforma de desarrollo bien conocida de arquitectura y software abierto llamada Arduino® en su plataforma Arduino UNO® para verificar el comportamiento. En la figura 6.60 se muestra el acelerómetro conectado a la placa de desarrollo la cual, a través de un algoritmo de mapeo que se muestra en el anexo 2. En la figura 6.61 se muestran los datos obtenidos y la gráfica generada, mostrando la naturaleza analógica del sensor. Tanto los datos numéricos arrojados, los cuales fueron leídos a través de la aplicación Hyperterminal®, la cual funciona como una interfaz de comunicación entre dispositivos (en este caso la placa de desarrollo y el acelerómetro) y la gráfica directamente del IDE de programación.

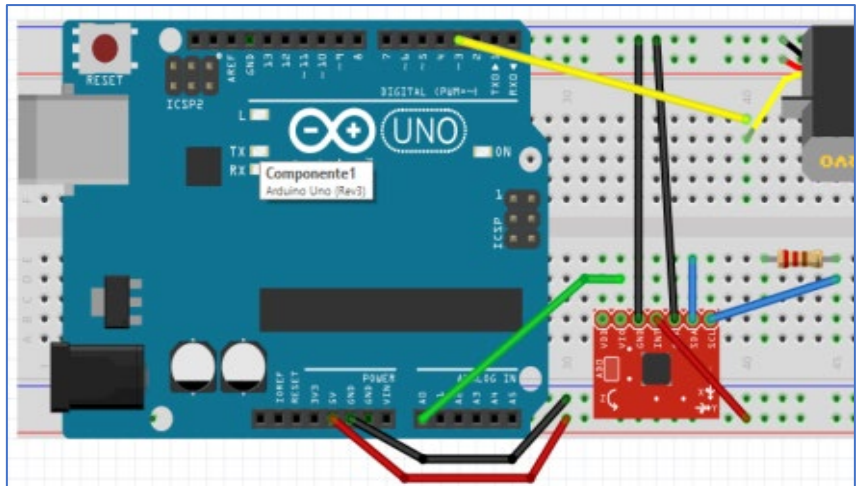


Figura 6.60 Esquema de circuito de acelerómetro con Arduino UNO®

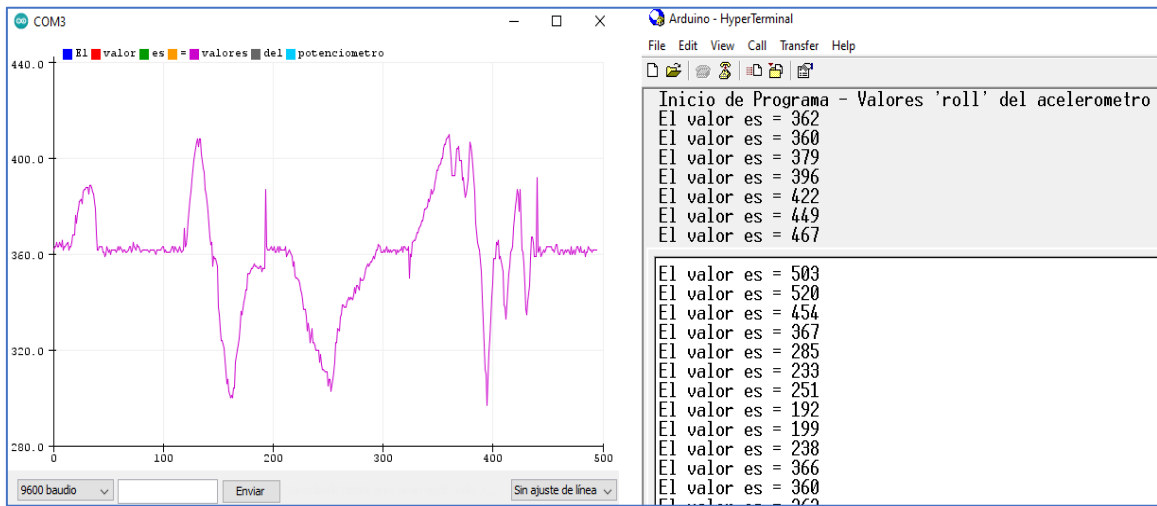


Figura 6.61 Datos arrojados por el MMA7361L. Derecha: Gráfica con IDE Arduino®. Izquierda: Datos numéricos con HyperTerminal®

Como se puede observar, los datos arrojados son datos numéricos sin unidades. Es decir, si bien sabemos que al ser un sensor (un transductor que arroja señales eléctricas al ser sometido a una variable física a la que es sensible), la respuesta no son datos en milivolts. Estos datos también aparecen para cualquier sensor incluyendo el LM35 o un simple potenciómetro, para todo tipo de microcontrolador. Es por esta razón que el sensor debe caracterizarse. Con caracterizar nos referimos a la operación de obtención de una respuesta matemática de un sensor, es decir, su ecuación característica o el modelo matemático, por lo general no lineal, bajo el que se comporta. Sabiendo que la naturaleza de los datos a los que es sensible el acelerómetro es el cambio angular respecto a un eje de rotación fijo, se ha elegido el eje de *roll* para caracterizar el sensor con la ayuda de una aplicación de nivel para teléfonos móviles el cual indica los grados

en los que está operando el sensor. El rango del sensor va desde -90° hasta 90° por lo que es necesario que cada grado sea revisado. Este proceso resultó muy arduo y de difícil ejecución, ya que se revisó grado por grado la variación de datos que el acelerómetro arrojó en el software HyperTerminal®, colocando un retraso de segundo y medio o 1500 milisegundos en el programa en Arduino para darle tiempo al operador que caracteriza el sensor para ajustar el ángulo a lo que se busca medir.

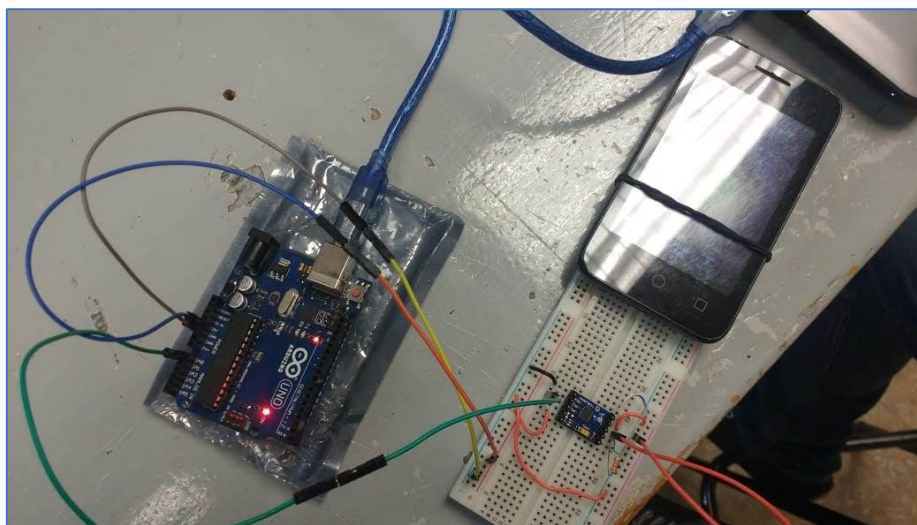


Figura 6.62 a) Montaje del circuito de caracterización del MMA7361L

En la figura 6.62 a) se muestra cómo se montó el dispositivo de medida para la caracterización del sensor y en la figura 6.62 b) el procedimiento de cómo se realizan las mediciones.

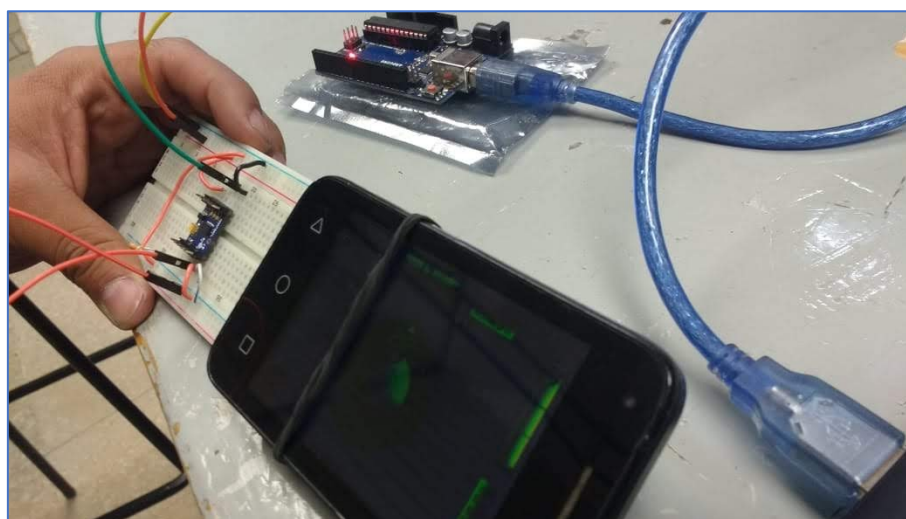


Figura 6.62 b) Ejecución de caracterización con la aplicación de nivel

Cada uno de los datos arrojados por el sensor se relacionó con el ángulo que marcaba la aplicación por lo que fue posible generar una tabla de datos para obtener el comportamiento.

Se registró esta tabla en una hoja de cálculo que posteriormente se pasó a un formato de hoja de texto para ser leído por un programa que graficara los resultados en Matlab® y, de la misma manera que en la síntesis generadora de función para el sistema de potencia engranado, obtener la ecuación característica del acelerómetro que, al serle evaluados los

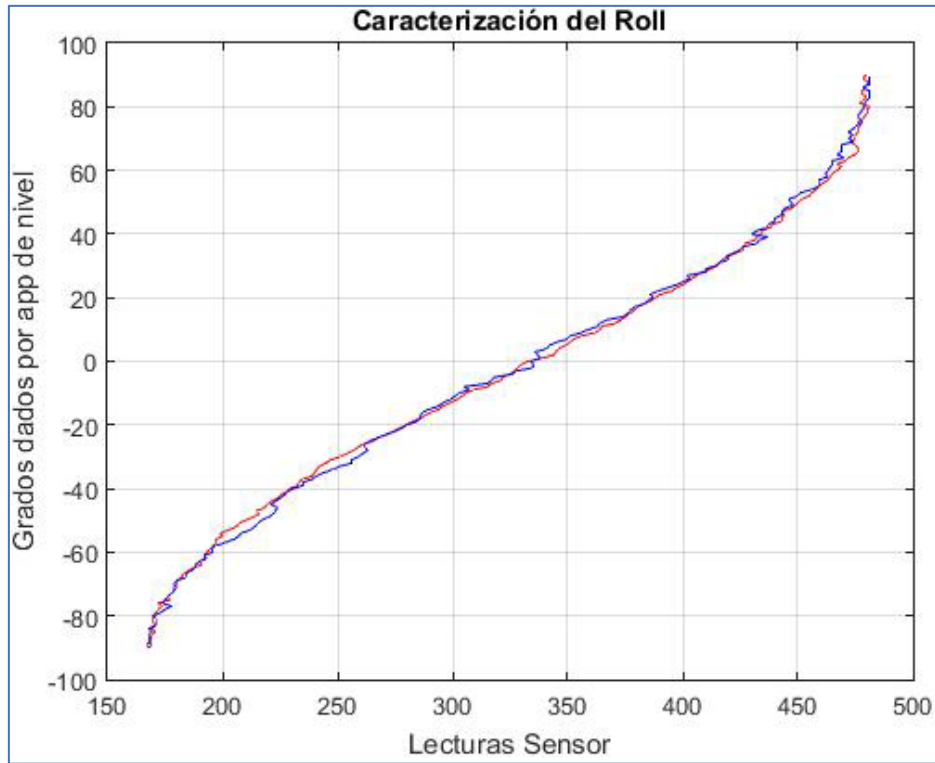


Figura 6.63 Curva característica del acelerómetro MMA7261L

datos sin acondicionar, devuelva el dato cercano en grados. El algoritmo en se muestra en el anexo 2 de programas. Para la validación de los datos y aumentar la precisión de la ejecución se realizaron dos muestreos independientes los cuales se han graficado, la figura 6.63 muestra la gráfica resultante de este muestreo. Con estos datos se ha ajustado la curva a una ecuación característica de séptimo orden, lo cual puede resultar bastante complicado para el microcontrolador o incluso ocupar bastante memoria. En la figura 6.64 se muestra la ecuación característica obtenida, la cual es: $3.66e^{-14}x^7 - 8.305e^{-11}x^6 + 7.965e^{-8}x^5 - 4.18e^{-5}x^4 + 0.01296x^3 - 2.372x^2 + 238e^2x - 1.019e^4$

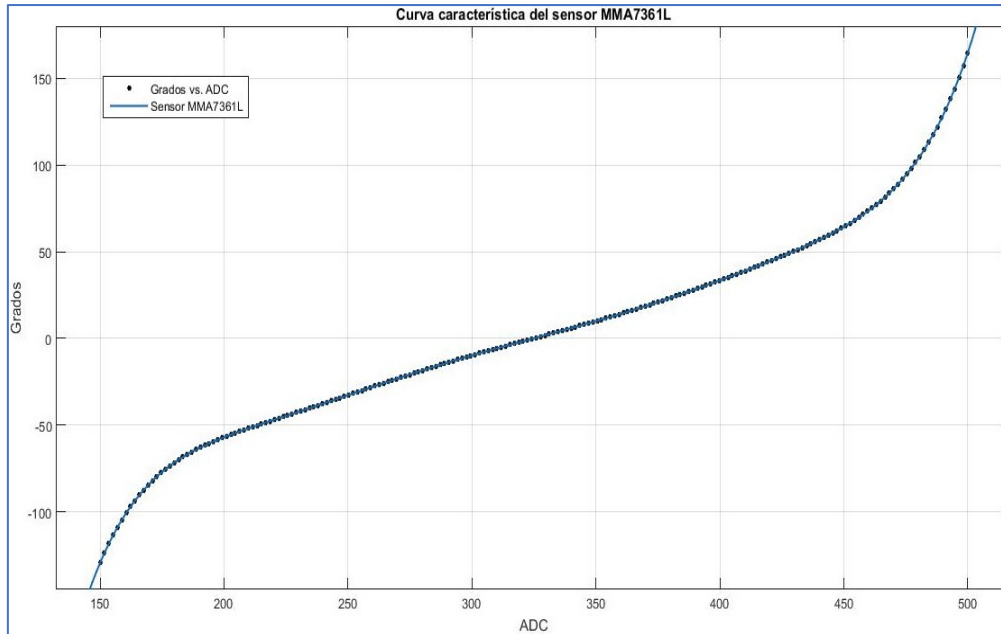


Figura 6.64 Curva característica con su ecuación correspondiente

Se ha mencionado pues, que introducir la ecuación característica en un algoritmo para el microcontrolador podría consumir una buena cantidad de memoria, por lo que se propone linealizar esta ecuación a través de un artilugio matemático bien conocido en la ingeniería: el Método de Mínimos Cuadrados. Este ajuste de curvas se basa en un método numérico en el que se relaciona una variable dependiente con variables independientes producto de la caracterización de los sensores (IBM Corp., 2014), por ejemplo; en el que la respuesta matemática se restringe a un comportamiento lineal de la forma $y = Ax + B$. Las ecuaciones 6.26 a) y b) indican la obtención de las literales de la forma canónica de la ecuación lineal del ajuste.

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \text{a)}$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad \text{b)}$$

Ecuación 6.26 a) Ecuación de literal A y b) Ecuación de la literal B del modelo lineal

Aplicando este método, la figura 6.65 muestra la regresión lineal obtenida con la formulación presentada arriba, siendo comprobación con los datos obtenidos en la caracterización, los cuales

se muestran en los resultados, apartado más adelante. En la misma figura se encuentra la ecuación linealizada, la cual es: $y = 0.5642x - 180.1$

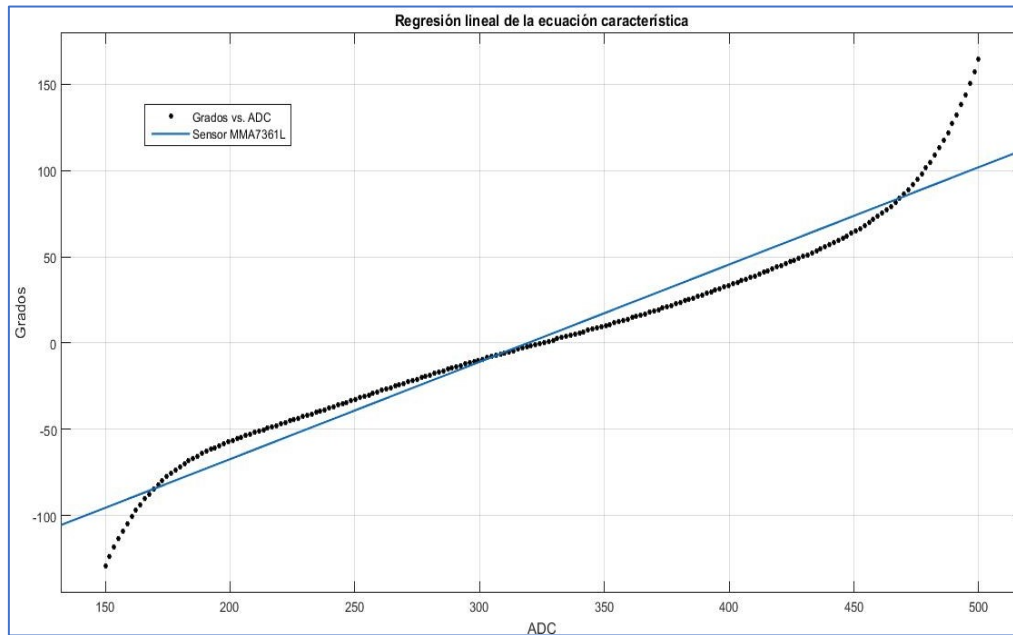


Figura 6.65 Curva ajustada a lineal por Método de Mínimos Cuadrados

Sistema embebido de obtención de datos

Siendo que, como se ha mencionado en la página 124 de este documento, lo que necesitamos de la extremidad sana, y sólo lo que necesitamos, es la posición de esta con respecto a la normal, es decir, cuando la pata está en la posición de reposo. Consideraremos esta, la posición de aplomo, como el punto de partida. Siendo que los datos que necesitamos de este sistema son únicamente datos numéricos, transducidos por el sensor a señales eléctricas, el control que se requiere debe tener un único parámetro de entrada y de salida. Sólo debe emitir un tipo de dato como respuesta.

Siendo que el aspecto ergonómico es necesario, y aunque su estudio no se considera para este trabajo por la falta de información con la que el desarrollador cuenta para un desarrollo más óptimo, se ha optado para este apartado la conexión entre los dos sistemas propuestos por medio de una conexión inalámbrica por Bluetooth. El tema de la comunicación será tratado más adelante, por ahora nos enfocaremos en el tratamiento de los datos que arroja el sensor y cómo puede el microcontrolador interpretarlos, manipularlos y devolver datos eléctricos en datos numéricos.

Dada la simplicidad, el tamaño y el bajo coste, se ha elegido como controlador uno del tipo PIC16F88 de gama media, el cual cuenta con entradas analógicas. Las características principales de este circuito integrado se encuentran en su hoja de datos, en el Anexo 1 de materiales. Sin embargo, aquí se colocarán características importantes a considerar para el desarrollo del *firmware* del primer sistema:

- ✚ Memoria Flash de programa (4K x 14).
- ✚ Memoria EEPROM de datos (256 x 8).
- ✚ Memoria RAM (368 registros x 8).
- ✚ Oscilador interno de 8MHz.
- ✚ Modulación por ancho de pulso (PWM) de 10Bits,
- ✚ Comunicación asíncrona mediante su módulo AUSART
- ✚ Comunicación síncrona SPI 3 Hilos o I2C en 2 hilos, con el módulo SSP
- ✚ Conversor de Analógico/Digital de 7 canales a 10 bits.
- ✚ Un temporizador/contador (*timer* de 8 bits).
- ✚ Un divisor de frecuencia.
- ✚ Varios puertos de entrada-salida (16 pines en dos puertos, 8 pines el puerto A y 8 pines el puerto B).

Se ha elegido este microcontrolador dado su reducido tamaño físico, el tamaño de su memoria y los puertos ADC de los cuales carecen algunos modelos como el famoso PIC16F84A.

Aun así, conociendo todo esto, es necesario tener los conocimientos necesarios para la conversión analógica-digital, dado que por si solos los puertos analógicos no registran los datos, por lo que es menester entender el funcionamiento interno en el microcontrolador de su módulo convertidor.

Según la hoja de datos y las referencias del fabricante, los MCU PIC poseen un convertidor del tipo aproximaciones sucesivas, uno de los más usados junto con los del tipo rampa digital o Flash. A manera de resumen se explicará cómo se realiza esta conversión en el interior del microcontrolador. Los convertidores analógicos-digital se dividen en dos etapas: esta de adquisición de datos o de tratamiento de la señal y en la conversión propiamente dicha. La señal que emiten los sensores suele ser muy pequeña por lo que deben ser tratadas con elementos externos tales como amplificadores operacionales o puentes. Una vez se ha acondicionado la señal y aún en el proceso de adquisición de datos, es necesario digitalizar la señal analógica por

medio de un muestreo de valores, este método de digitalización varía entre convertidores, pero el resultado siempre es el mismo, llegar a un nivel binario que tenga la equivalencia de la señal analógica, en la figura 6.66 se muestra el proceso de *sampling* o muestreo que lleva a cabo cualquier convertidor.

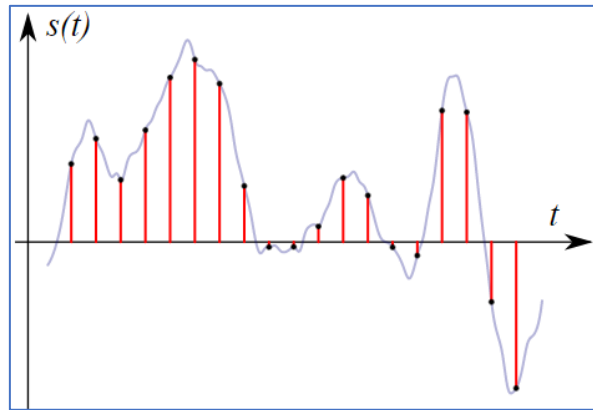


Figura 6.66 Ejemplo de muestreo en la digitalización de una señal analógica. Tomado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Analog_digital_series.svg

Una vez terminada la digitalización, el proceso de conversión en los SAC (*Successive Approximation Converter* por sus siglas en inglés) se basa en comparaciones tanto ascendentes como descendentes en combinaciones binarias hasta encontrar un valor que calce con el de la señal analógica, la que corresponde al muestreo. El valor de partida en el convertidor siempre es un bajo o cero, por lo que el registro del convertidor coloca un alto o uno como Bit Mayor Significativo (MSB en inglés) dejando el resto en ceros. De este paso el valor se reconvierte en señal analógica a través de un DAC o convertidor digital-analógico, como parte de retroalimentación para realizar una comparativa, como un proceso iterativo parecido a los métodos numéricos usados en matemáticas para ingeniería. Si el valor siguiente es mayor que el anterior el convertidor cambia el 1 por el 0, cambiando los valores de mayor peso por un Bit Menos Significativo (LSB en inglés) y haciendo lo opuesto si el valor siguiente es menor que el anterior (The Closure Library Authors, 2008). La explicación detallada de estos procesos está más allá del alcance de este trabajo y se remite al lector a consultar la bibliografía correspondiente. En la figura 6.67 se muestra el diagrama de bloques del convertidor ADC de aproximaciones sucesivas, el cual se encuentra dentro del microcontrolador, así como está distribuidas las entradas a través de un multiplexor interno.

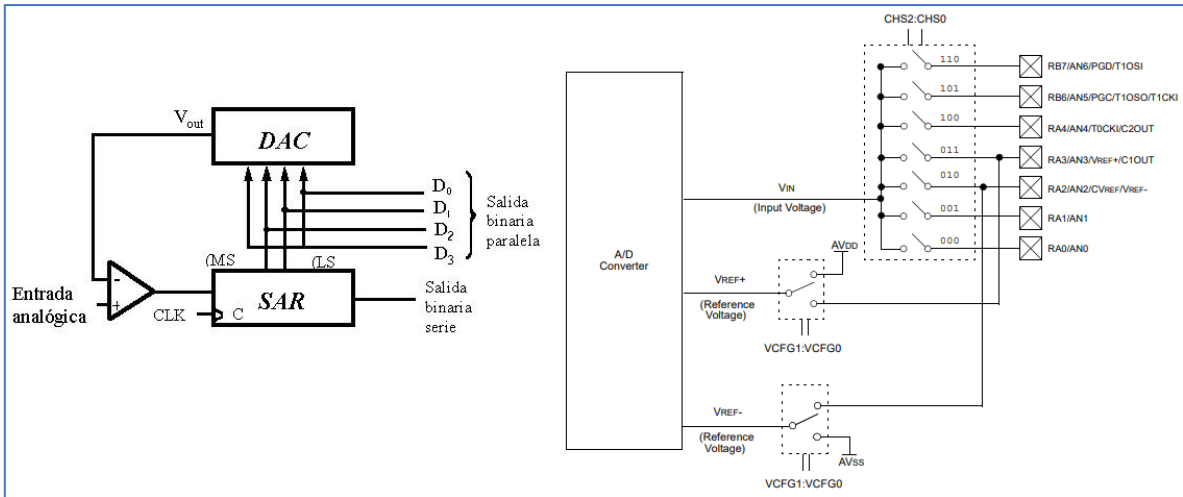


Figura 6.67 Convertidor ADC de aproximaciones sucesivas y diagrama del ADC en el PIC16F88

Con esto en mente, es necesario conocer la estructura del microcontrolador y cómo se distribuyen todos sus puertos. En la figura 6.68 se muestra el diagrama de conexión del microcontrolador, así como la designación de sus puertos. Con esto sabemos que solamente se requiere una entrada analógica, por lo que para realizar la detección de datos en el PIC16F88, el cual va a trabajar de forma distinta al Arduino ya que, en principio, ambas plataformas son diferentes ya que el controlador de la placa de desarrollo está basada en un circuito integrado ATmel® ATmega328P, los datos analógicos que ambos trabajan pueden ser diferentes, aunque en principio, se espera que el comportamiento del sensor sea el mismo tanto para la plataforma PIC como para la AVR.

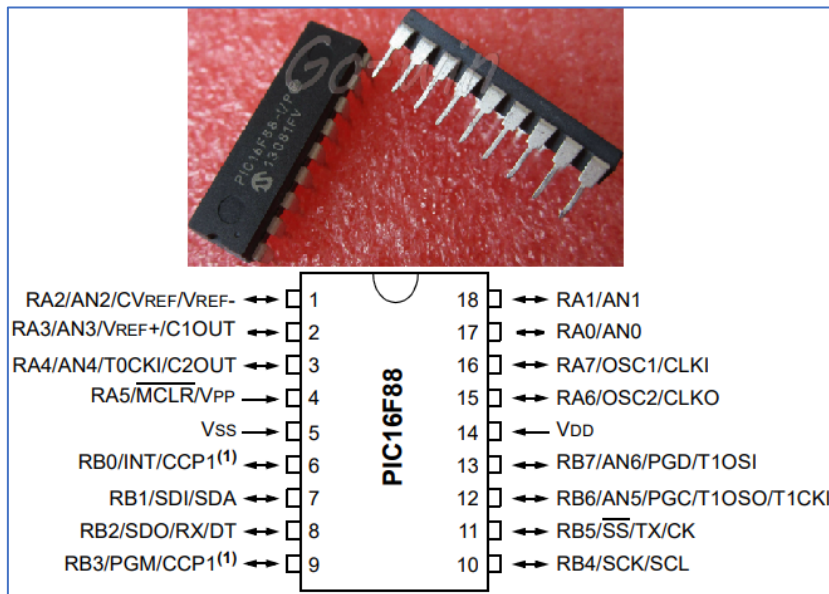


Figura 6.68 PIC16F88, designación de pines del circuito integrado

Se presenta aquí el proceso de conversión de los datos que se espera tendrá el microcontrolador con el acelerómetro (García Breijo, 2008):

- ✚ Se configura el módulo ADC interno del MCU. En esta operación se debe elegir el pin de entrada, el tiempo de adquisición de datos o de trabajo del ADC y habilitar los puertos analógicos o solamente el que se trabajará. En este caso el AN0.
- ✚ Se espera el tiempo de adquisición. En el algoritmo en anexo 2 se consideró de aproximadamente 1 milésima de segundo.
- ✚ Inicia la conversión. Internamente se enciende una directiva de nombre GO/DONE. El tema de las directivas y registros, como se ha mencionado, está fuera del alcance de este trabajo y se remite a la bibliografía de referencia en este trabajo.
- ✚ La conversión arroja un dato de registro e inicia de nueva cuenta desde el segundo apartado del listado.

En la figura 6.69 a) se muestra el diagrama de conexión del primer sistema embebido (sin el elemento de comunicación) y en la figura 6.69 b) el circuito armado en tablilla protoboard donde se colocó el algoritmo (el que se encuentra en anexos es el algoritmo final junto con la comunicación vía Bluetooth) la conexión con una pantalla LCD 16x2 con un módulo I2C para verificar los datos y la conversión. Se han colocado en ambos algoritmos las ecuaciones características, tanto la de grado superior como la linealizada, y se ha comparado con la misma aplicación de nivel con la que se caracterizó al MMA7361L.

Siendo que el desarrollador de este proyecto no cuenta con un módulo de comunicación para el sistema embebido con la computadora, como lo podría ser el tipo de comunicación RS232 o USB, para realizar la prueba de detección del sensor por parte del microcontrolador propuesto, la pantalla mostrará los datos que se están trabajando en el interior del microcontrolador. Como puede observarse en la figura 5.69 b) la pantalla muestra dos datos que han sido llamados ADC y Ángulo respectivamente, dejando espacios entre las señalizaciones para evitar confusiones.

En la parte derecha corresponde a los datos en bits analógicos, los cuales son muy parecidos a los que aparecieron en el monitor serie del aplicativo HyperTerminal®, mientras que utilizando la ecuación de séptimo grado obtenida por la *Toolbox* de Matlab® *Curve Fitting* se consigue el valor en grados de la inclinación del sensor contra la horizontal.

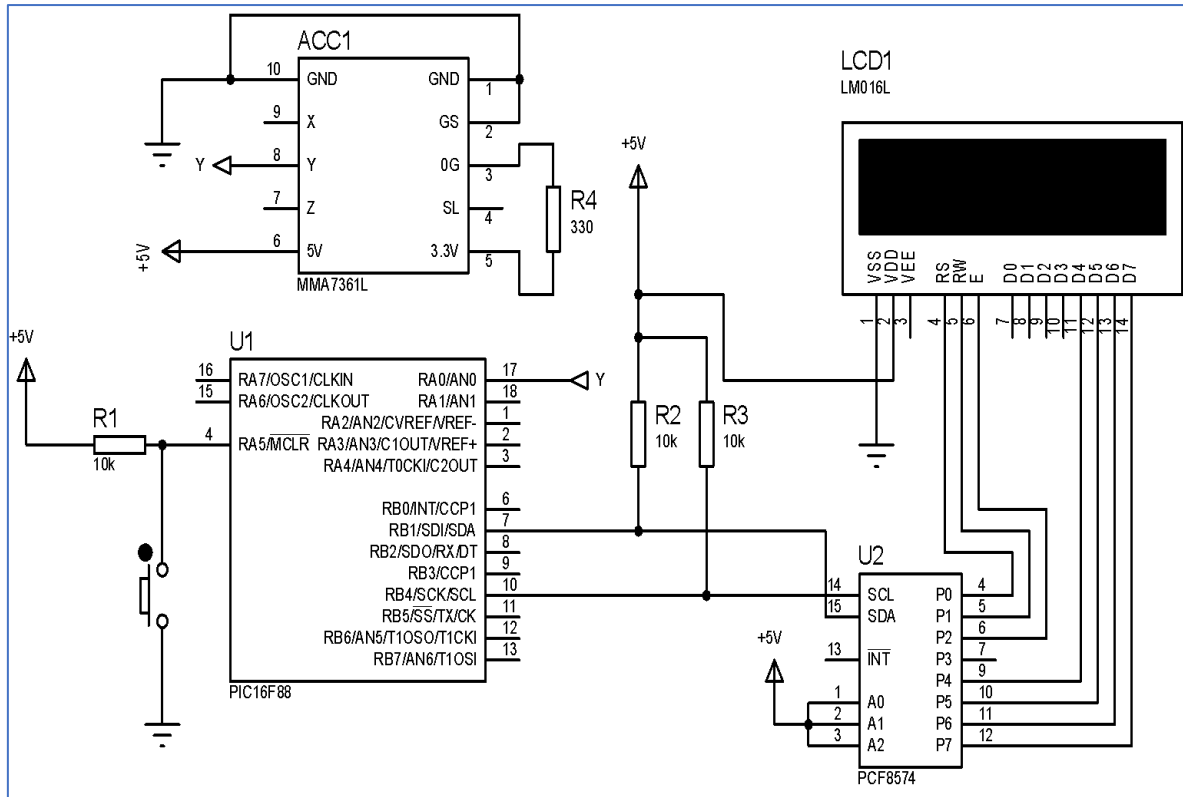


Figura 6.69 a) Esquemático de prueba del acelerómetro MMA7361L

En la programación del circuito se muestra el uso de un circuito integrado de la marca NXP PCF8574, el cual es un director de I2C, el cual es un tipo de comunicación serie del tipo asíncrono que maneja paquetes de datos (palabras) y los envía a través de dos líneas de comunicación. El alcance de este trabajo no contempla en detalle la teoría del I2C, sin embargo, cabe destacar que el uso de esta técnica para la visualización de datos por medio de la pantalla de LCD reduce significativamente el uso de memoria en el microcontrolador, por lo que para el desarrollador fue muy útil, además de la característica más importante sobre el uso mínimo de cableado que podría haber introducido ruido en la medición. Estos datos serán los que se enviarán al segundo sistema embebido para ejecutar el sistema de potencia mecánico.

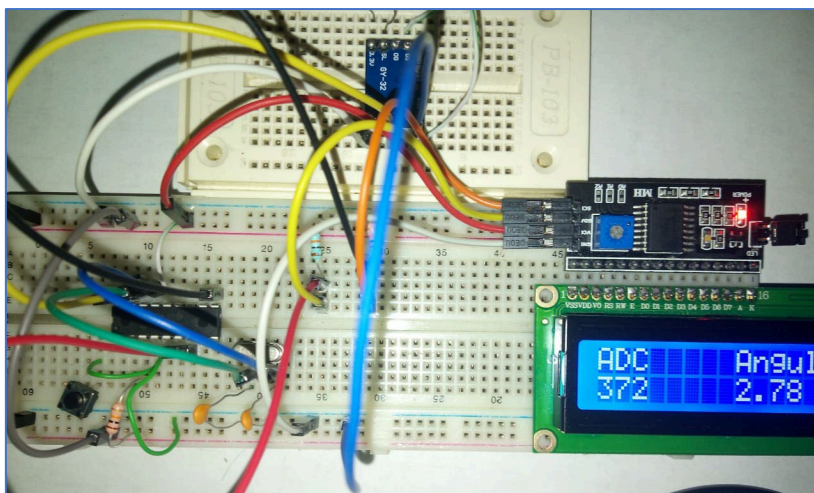


Figura 5.69 b) Circuito armado del primer sistema (instrumentación)

Control difuso para sistema de potencia

Para el apartado del control de movimiento del mecanismo, el que correspondería al segundo sistema embebido a programar, debemos retornar al apartado de la cinemática del movimiento del perro. Hay que recordar que la hipótesis del presente trabajo se basa en la hipótesis de movimiento planteada por el fisiólogo Milton Hildebrand: los movimientos simétricos son aquellos que poseen una relación espejo con su par colindante, es decir, en movimientos como la caminata o el trote lento, el animal cuadrúpedo respecto a sus extremidades delanteras envía una de estas hacia adelante mientras la opuesta se envía hacia atrás para mantener el equilibrio. Es decir, mientras existe un posicionamiento para iniciar la fase de impulso, como se ha descrito en la página 25 del presente documento, y mantener el equilibrio durante desplazamientos simétricos, el animal debe enviar una pata hacia adelante y mantener la otra hacia atrás. Considerando lo anterior se puede asumir que, si tomamos el plano dorsal o el medial como referencia, existe un desplazamiento angular sobre los ejes x o z dependiendo de la orientación que se quiera tomar para el acelerómetro. En este caso se tomará el plano dorsal o ventral como referencia ya que el MMA7361L presenta problemas al censar el eje z (si se colocara el sistema embebido en paralelo con el plano medial), por lo que se colocará en horizontal, iniciando el punto de referencia del movimiento en la posición de aplomo, con las dos extremidades delanteras y considerando el ángulo escapular, ya que aquí se realizará la medición. En la figura 6.70 se muestra un esquema de cómo podría quedar el primer sistema respecto a la anatomía del perro.

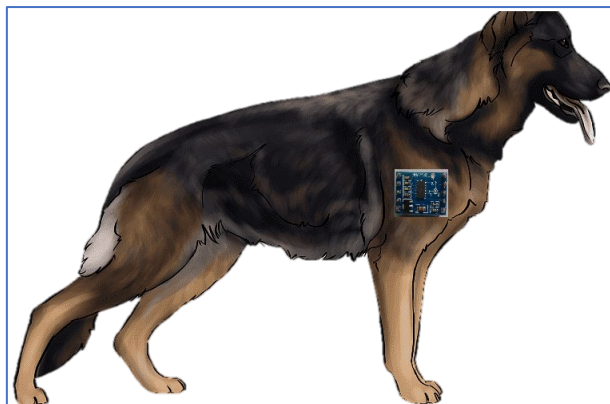


Figura 6.70 Localización del sensor acelerómetro en el cuerpo del perro

Con esto en mente se propone la generación de un soporte para el sistema embebido del sensor, de tal manera que el aplomo sea el punto “cero” o de grado cero, teniendo el circuito embebido en completo horizontal y, de acuerdo con el avance o retroceso del miembro sano, se producirán ángulos relativos a la aceleración registrada por el sensor. Esto se verá más adelante en los resultados.

Ahora, ya que se ha utilizado la ecuación de primer orden en el primer control ya que la memoria de este no soporta la ecuación de séptimo grado, se presenta un pequeño error. Para poder lidiar con este error sin generar problemas en la detección se ha elegido un método de toma de decisión por software para el segundo sistema embebido, siendo este el empleo de un controlador por lógica difusa. En el marco teórico de este documento, a partir de la página 40, se da la teoría referente a esta aplicación de la inteligencia artificial, por lo que aquí no se hondará en el aspecto teórico. Sin embargo, se retomará el diagrama presentado en la figura 2.34 en la página 44, el cual refiere al proceso de datos a un nivel difuso y evaluación de determinadas reglas para devolver los resultados a la naturaleza inicial. Para el diseño del control difuso se ha utilizado el aplicativo *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab®.

Lo primero en considerar son los valores que va a recibir el segundo sistema. Estos valores son los ángulos que se obtuvieron del sensor como bits de salida del convertidor analógico-digital interno del microcontrolador y evaluados por la ecuación característica. Este dato será enviado a través de la comunicación inalámbrica para ser los datos de entrada.

Ahora, los datos son grados, son datos numéricos y su naturaleza es de índole numérica. Para que pueda ser parte del control difuso debe ser convertido a un valor difuso, a un valor que entre dentro de una serie de conjuntos y que su este mismo valor forme parte de uno o más de estos

conjuntos. Este proceso es el *fusicado* genera funciones de membresía o pertenencia para todos los valores posibles que recibirá el controlador formando variables lingüísticas.

Los ángulos tienen, en la geometría clásica, una clasificación de concepto que puede utilizarse estas variables en las que puede entrar cada ángulo con un grado de pertenencia, incrementado dos variables lingüísticas más para ajustar los datos, datos medios entre el dato central: agudo, medio agudo, recto, medio obtuso y obtuso. Estos conjuntos difusos como se han descrito pueden contener, con un cierto grado de pertenencia, los parámetros de entrada que serán recibidas del primer sistema. Los valores de pertenencia para cada ángulo son los valores convertidos a difusos. En la figura 6.71 se muestran los datos *fusicados* con sus funciones de membresía en los conjuntos difusos.

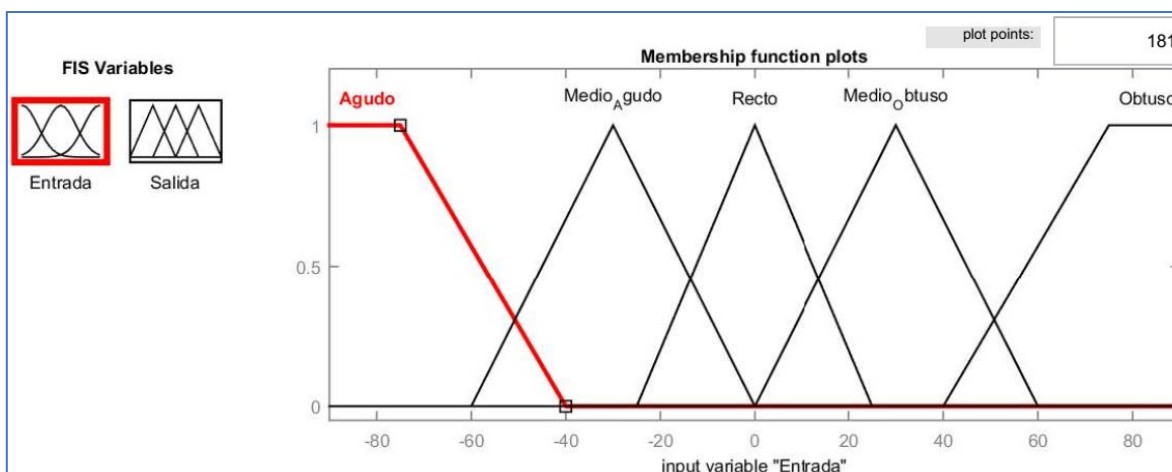


Figura 6.71 Variables lingüísticas de entrada de los datos *fusicados*

Ahora, con las variables lingüísticas presentes como conjuntos difusos, es importante replantear la teoría de Hildebrand: se requiere que el movimiento entre las extremidades sea simétrico y consecutivo, como si fuesen las cuchillas de unas tijeras. Es así que se requiere que, si la extremidad sana avanza, generando por ejemplo un ángulo “agudo”, el mecanismo de potencia genere un giro que permita al prótesis realizar el retroceso para completar el movimiento. Se ha seleccionado la secuencia de movimiento de la caminata como la secuencia de estudio para las reglas mandantes en el control difuso en la que la relación de los ángulos será contraria para cada evento, es decir, si el primer sistema embebido lee una lectura de un ángulo obtuso, la salida debe corresponder a un agudo; invirtiendo entonces también los conjuntos difusos a la salida, sin embargo, este apartado será tratado más adelante. Recordando el diagrama de bloques

de la figura 2.31 de la página 44, el paso siguiente es la generación de las reglas. En la figura 6.72 se muestra el listado de reglas que se propuso para el control difuso.

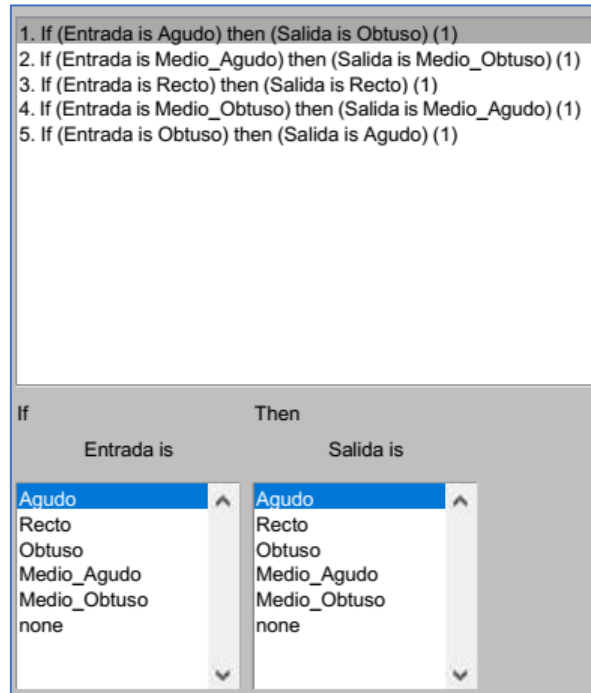


Figura 6.72 Reglas del control difuso propuesto para la alternancia de ángulos

Con estos datos se puede considerar la salida como un reflejo de los ángulos que se consideran agudos, rectos y obtusos dentro de las variables lingüísticas. En la figura 6.73 se muestra la distribución de los valores de salida de acuerdo con sus funciones de membresía.

Siendo que ambos universos de conjuntos, tanto salidas como entradas, ya se encuentran en estado de variables difusas, es posible visualizar el comportamiento de las reglas a cualquier dato de entrada que el segundo sistema embebido reciba del primero. El programa de reconocimiento evaluará el valor enviado por el primer sistema y lo comparará dentro del valor asignado para la entrada (de acuerdo con su función de membresía) y sobre las mismas reglas, obteniendo por medio del método del centroide de Mamdani el valor correspondiente a la salida del controlador. La figura 6.74 muestra un ejemplo de cómo el controlador difuso evalúa el dato y arroja un dato de salida *defusificado* el cual ya no es una variable lingüística sino un dato numérico de la misma naturaleza que la entrada.

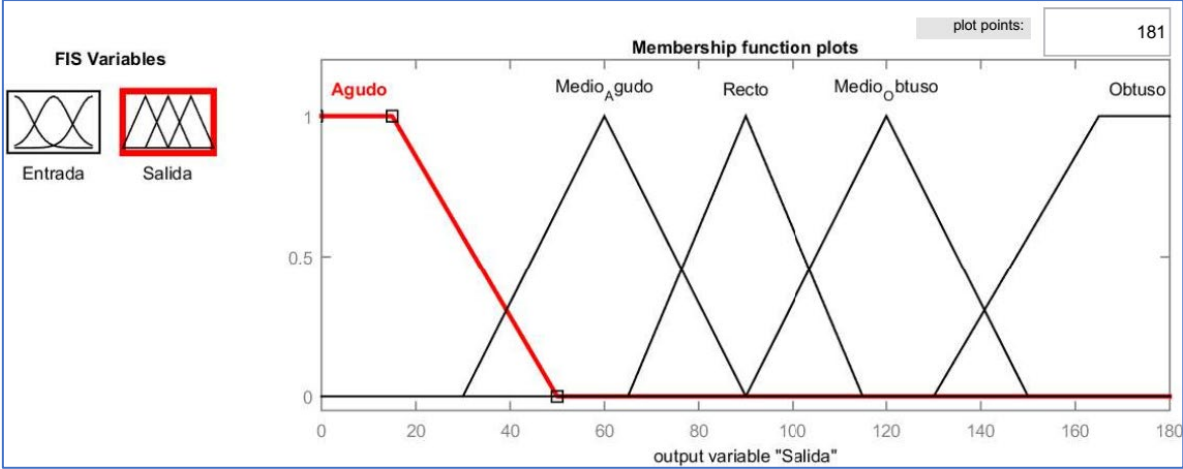


Figura 6.73 Variables lingüísticas de la salida en conjuntos difusos

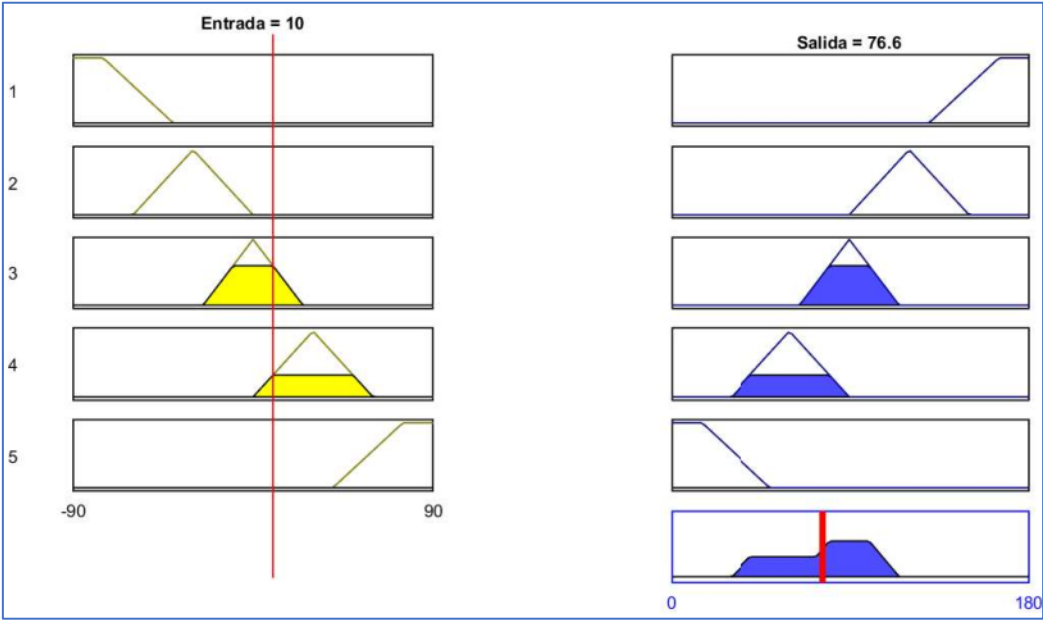


Figura 6.74 Método de Mamdani para evaluación de datos de entrada por reglas, defuzicado

Con esto se puede visualizar que el controlador difuso es bidimensional, es decir, ya que solamente maneja una sola entrada se espera que la relación sea de tipo uno a uno, solamente habrá una entrada y la salida será proporcional a dicha salida. Se ha propuesto el uso de un método de inteligencia artificial para mapear todos los datos posibles que registre el sensor. Ya que la sensibilidad del sensor tiende a inestabilidades y el diseño de un control más robusto está fuera de los alcances de este trabajo, el empleo de la lógica difusa ayudará a “amortiguar” posibles errores al ser capaz de detectar cualquier valor que envíe el acelerómetro y dictar su valor “espejo”. En la figura 6.75 se muestra la relación de entradas y salidas mediante una gráfica.

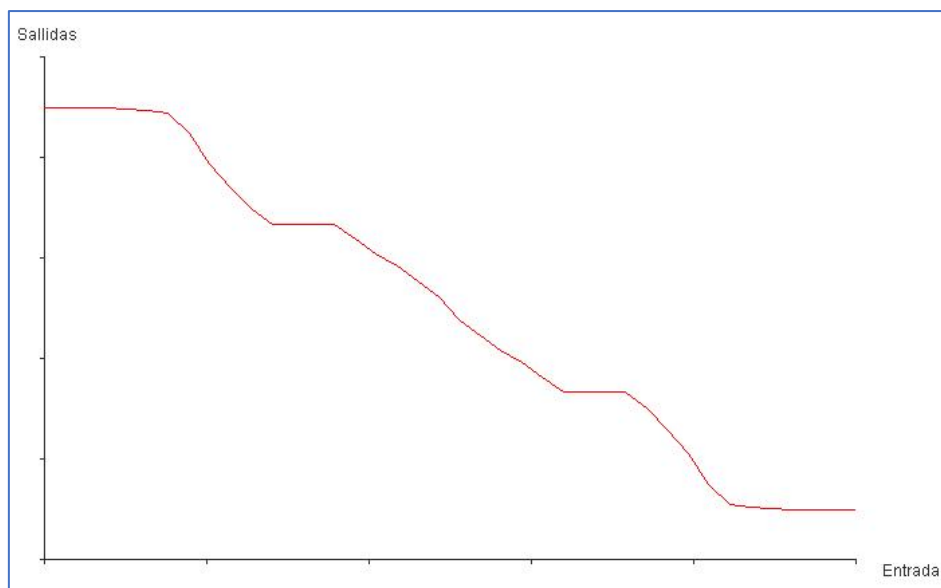


Figura 6.75 Superficie de relación de entradas y salidas

Todos los resultados mostrados se han realizado en Matlab y su herramienta para construir controles difusos. Sin embargo, la construcción de estos controles debe ser en lenguaje C para que pueda ser entendible por un compilador que transforme el código en hexadecimal, lo cual es bastante complicado de realizar en el software. Por lo que es necesario realizar en un software externo que sea capaz de traducir las variables lingüísticas y las reglas en un código programable en C. Para esto se recurrió al software libre XFuzzy® 3.5 y al compilador de código para microcontroladores MikroC®.

Servomotor como sistema de potencia mecánica

Como se ha mencionado en la página 76 de este documento, se ha indicado que el impulso del sistema mecánico de potencia será dado por un servomotor. Cabe recordar que estos dispositivos son motores de CD, los cuales poseen un reductor de velocidad y un multiplicador de torque junto con un circuito de control. Este motor solamente puede dar revoluciones específicas en un rango de 0 a 180°. Para poder controlar estos giros específicos es necesario aplicar un tren de pulsos de duración y frecuencia específicos. Dependiendo del ancho de las pulsaciones del tren, el sistema de control interno del servo llevará su eje a la posición correspondiente. La manipulación o modulación de estos anchos de pulso o PWM (*Pulse Width Modulation* en inglés) consiste en generar una onda cuadrada en la que se varía el tiempo que el pulso está en nivel alto, manteniendo el mismo periodo, de tal manera de modificar la posición del eje de acuerdo con este ancho (Corona Ramírez & Abarca Jiménez, 2019). Para el servomotor Futaba

S3003, el cual fue el elegido para la prótesis, el ancho de pulso tendrá una frecuencia de 50Hz y para obtener los grados 0° , 90° y 180° se requerirá que el ancho de pulso en alto sea de 0.9 ms, 1.5 ms y 2.1 ms respectivamente. En la figura 6.76 se muestra la estructura del servomotor y en la 6.77 el tren de pulsos con los anchos de pulso indicados para los grados ya mencionados en el servomotor a utilizar.

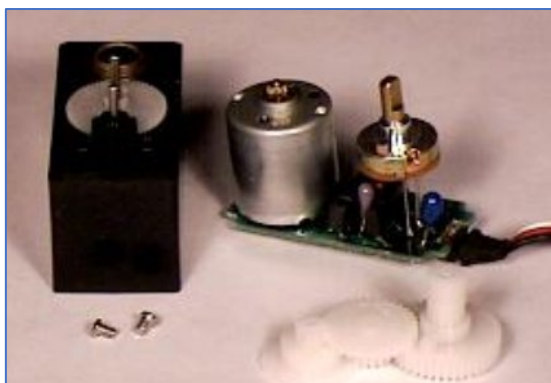


Figura 6.76 Componentes del servomotor. Tomada de: https://www.taringa.net/+hazlo_tu_mismo/como-hacer-un-servo-motor-con-un-vhs_12ru5e

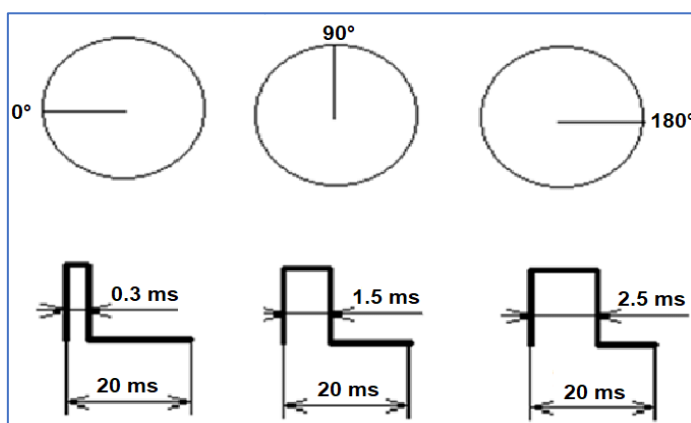


Figura 6.77 Anchos de pulso para los extremos de grados en el servomotor. Tomada de: Raj & Thangaraja (2017). *Static gesture recognition based precise positioning of 5-DOF robotic arm using FPGA.*

Ahora, es menester conocer el rango de ángulos y periodos del ancho de pulso en nivel alto del tren para identificar los posibles ángulos que saldrán del control difuso cuando se evalué; es decir, el controlador difuso enviará el dato de salida al servomotor, pero como un valor de ángulo, no uno de periodo de ancho de pulso, es por ello que se requiere conocer el valor del pulso que corresponderá al ángulo que envía el control difuso para que el microcontrolador lo envíe al motor. En la tabla 6.17 se muestra una relación de ángulos a los cuales se les puede verificar la relación matemática para encontrar la ecuación que rige el comportamiento de los anchos de pulsos, tal como se hizo anteriormente mostrada en la figura 6.78.

Tabla 6.17 Relación de ángulos del servomotor y el ancho de pulso del PWM

Tabla 6.17 Relación de ángulos del servomotor y el ancho de pulso del PWM

Posición (°)	T. Alta (μs)
0	300
15	514
30	722
45	925
60	1122
75	1314
90	1500
105	1681
120	1856
135	2025
150	2189
165	2348
180	2501

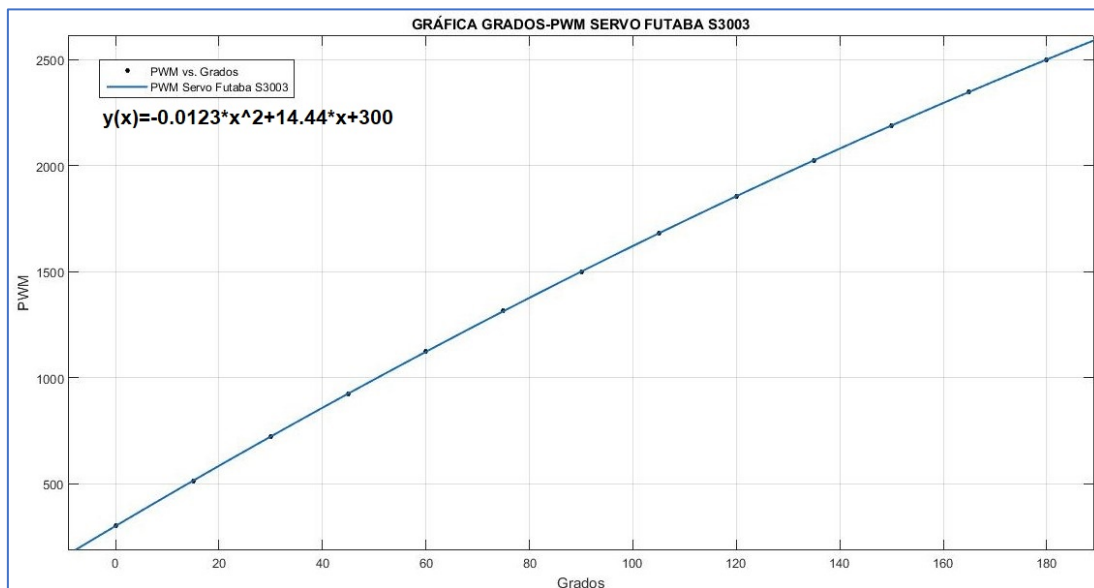


Figura 6.78 Comportamiento matemático de la relación ángulo-PWM

Con esto en mente se puede considerar un pequeño circuito para corroborar la tabla de ángulos anterior, evaluando sus contrarios a manera también de corroborar la funcionalidad del controlador difuso. Debido al tamaño en memoria del controlador difuso se requerirá de un microcontrolador de mayor capacidad de almacenaje, por lo que para este control se ha propuesto el uso de un microcontrolador PIC18F2550 que, aunque de mayor tamaño, posee más capacidad de almacenamiento que el 16F88. En la figura 6.79 a) se muestra un esquemático que,

al igual que el primer sistema, no cuenta con la comunicación. En la figura 6.79 b) el circuito montado en protoboard.

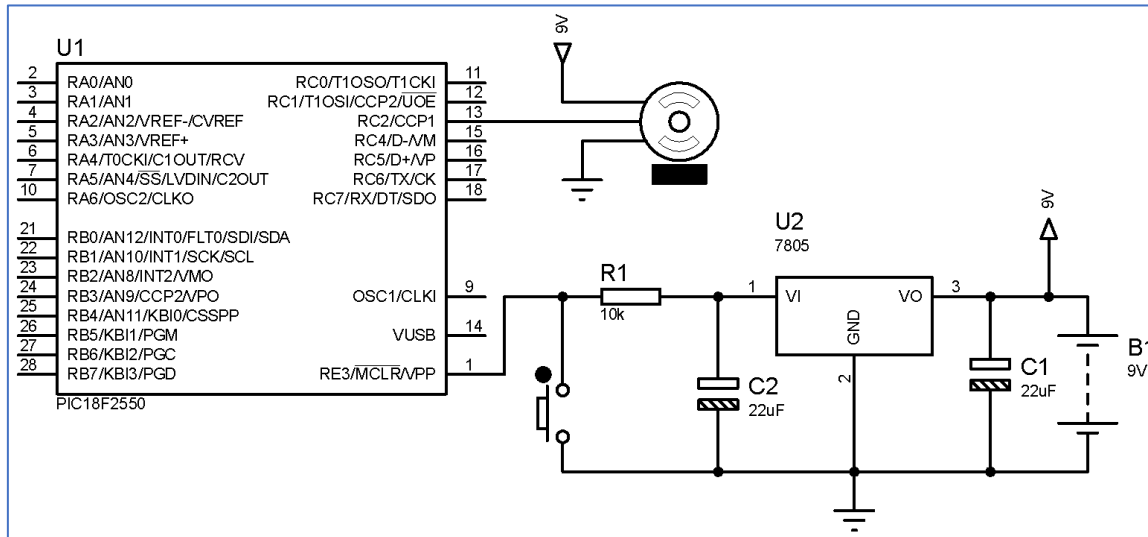


Figura 5.79 a) Circuito de prueba para servomotor con PIC18F2550

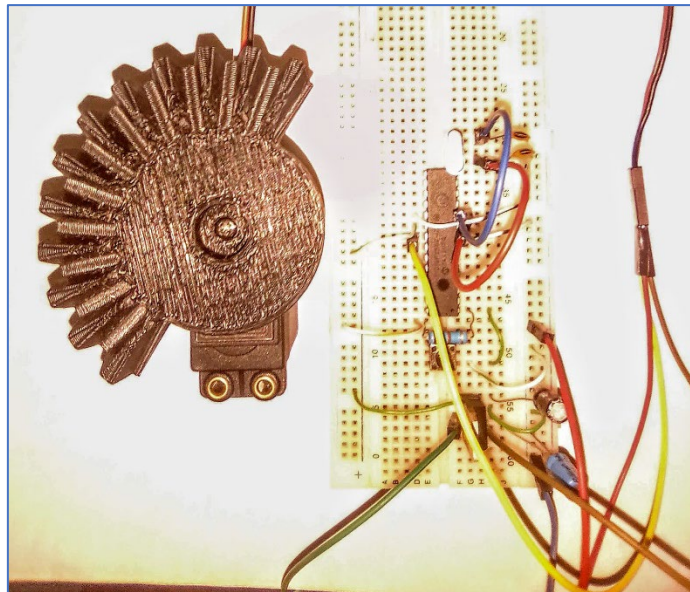


Figura 5.79 b) Circuito montado con regulador a 5V L7805C, alimentación 9V

Tal como se hizo con el PIC16F88, en este caso se presentan también las características del PIC18F2550; ambos son microcontroladores de gama media de 8 bits, siendo este de mayor capacidad que el anterior.

- ✚ Entradas/Salidas digitales: 24.
- ✚ Memoria de programa flash palabras de 8 bits.
- ✚ Posiciones RAM de datos: 2048.

- ✚ Puertos E/S: A, B, C.
- ✚ Número de pines: 28.
- ✚ Comunicaciones Serie: SPI, USART.
- ✚ Comunicación USB habilitada.
- ✚ Líneas de entrada de ADC de 10 bits.

Estas son las principales funciones, aunque si se revisa la hoja de datos del fabricante, en el anexo 1, se podrán observar muchas más. En la figura 6.80 se muestra la distribución de pines del PIC18F2550, así como su apariencia física.

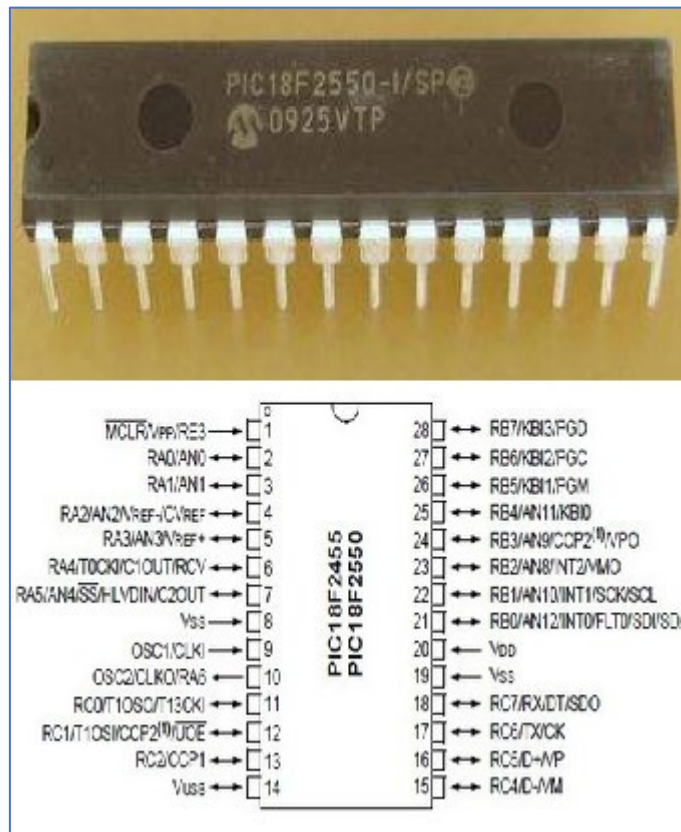


Figura 6.80 PIC18F2550, designación de pines del circuito integrado

Sistema de comunicación vía bluetooth: protocolo USART

Teniendo entonces la base de acción de ambos sistemas (un emisor de datos o sistema sensor, y un receptor de datos o sistema actuador), el último paso del desarrollo es la comunicación. Ya que se requiere que ambos sistemas trabajen en paralelo enviando y recibiendo información no bidireccionalmente sino unilateralmente, y que por ergonomía y comodidad del animal no se deben utilizar cables que, al final, sufrirán desgaste y quizá el perro los llegue a morder o arrancar, no es posible utilizar una comunicación serie como la ya vista I²C. No hay cabida para

cables. Es necesario una comunicación inalámbrica y el medio más económico que puede encontrarse, sin recurrir a un módulo de radiofrecuencia es un módulo bluetooth. Antes de esto, es necesario explicar qué es el bluetooth de forma muy breve.

El Bluetooth es un estándar de tecnología inalámbrica capaz de transferir datos desde un punto emisor hasta un punto receptor utilizando ondas de radio de baja frecuencia de entre 2400 y 2480 MHz (Tojeiro Calaza, 2012). Como es sabido, las ondas electromagnéticas dependen de tres parámetros para ser clasificadas: la amplitud de la onda, lo cual representaría la ganancia en un sistema dinámico; la frecuencia, la cantidad de veces que un ciclo se produce y la longitud de onda, esta es importante ya que determina la naturaleza y aplicabilidad de la onda. En la figura 6.81 se muestra un diagrama de las longitudes de onda y sus diferentes aplicaciones.

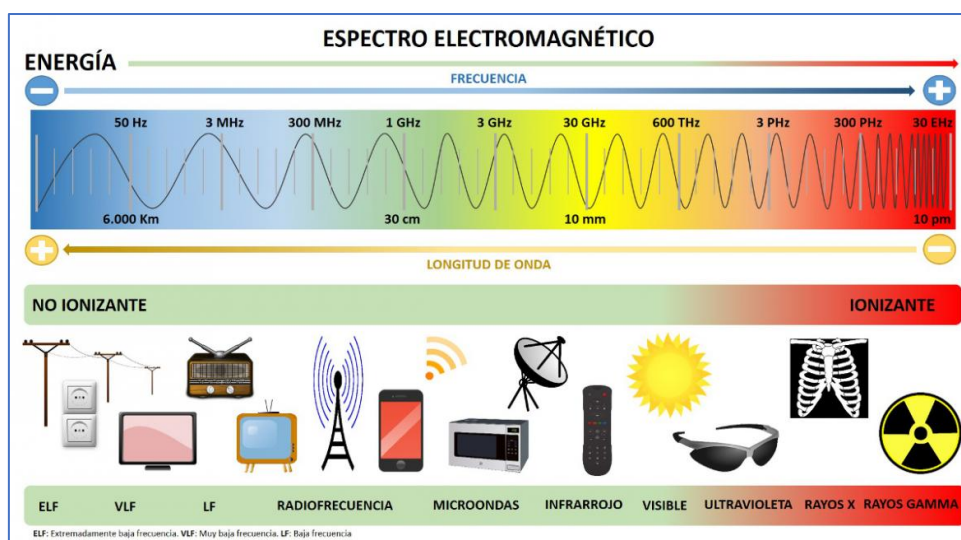


Figura 6.81 Espectro electromagnético y algunas aplicaciones. Tomada de: <https://www.comunidad.madrid/servicios/salud/campos-electromagneticos>

Según lo observado en la figura 6.81, el bluetooth podría encontrarse en el espectro de la radiofrecuencia, por lo que se puede afirmar que pertenece a la comunicación por radio frecuencia, aunque en un modo aparte. Se tiene como una especificación de IEEE para redes inalámbricas de área personal (WPAN por sus siglas en inglés) que permite la transmisión de datos entre dispositivos a través de un punto o nodo central, conocido como maestro y los diferentes dispositivos conocidos como esclavos; una nomenclatura muy recurrente cuando se trata de protocolos de comunicación como el ya mencionado I²C. Si bien a diferencia del antes mencionado en el que pueden existir varios maestros llevando la batuta para intercambiar el sentido de la comunicación y varios esclavos, en los bluetooth solamente puede existir un

maestro para varios esclavos y, por obviedad, un esclavo para un solo maestro. El maestro puede conectarse hasta con siete esclavos al mismo tiempo.

Cada dispositivo cuenta con una dirección, un identificador y un nombre, como los módulos con los que cuentan los teléfonos móviles y, siendo que esta tecnología fue desarrollada en un principio para la comunicación entre teléfonos, existe un proceso interno entre estos dispositivos denominado paridad o emparejamiento, donde un maestro identifica un esclavo por el nombre, la dirección interna y la clave de acceso o PIN. Si este emparejamiento tuvo éxito ambos, maestro y esclavo, se reconocerán mutuamente en el futuro sin necesidad de volver a realizar una configuración manual (arduino123, 2016). En la figura 6.82 se muestra un diagrama de las interfaces entre el maestro y los esclavos.

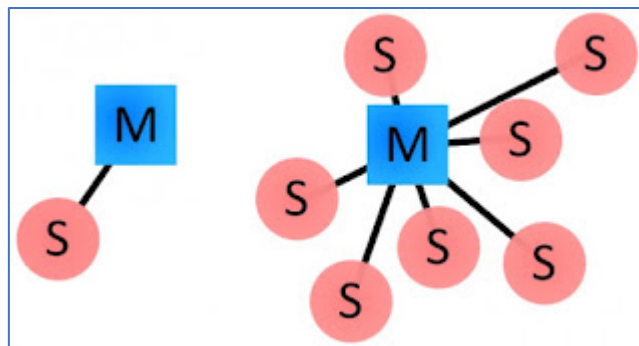


Figura 6.82 Esquema de comunicación bluetooth entre maestro y esclavos. Tomada de: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/hc-05/>

Los módulos que se van a trabajar para la comunicación entre ambos sistemas son los conocidos HC05. Este es un módulo comercial que es capaz de trabajar tanto como maestro como esclavo. De fábrica se tiene especificado internamente como esclavo, pero es posible reconfigurarlo a través de la programación de una serie de comandos denominados como comandos AT. La transmisión se realiza totalmente en forma transparente al programador, por lo que se conecta en forma directa a los pines seriales de nuestro microcontrolador preferido. A continuación, se presentan las características principales de los módulos HC05 y en la figura 6.83 se muestra el módulo y sus respectivas conexiones.

- ✚ Voltaje de operación: 3.6V - 6V DC
- ✚ Consumo corriente: 50mA
- ✚ Frecuencia: Banda ISM 2.4GHz
- ✚ Alcance: 10 metros
- ✚ Interface comunicación: Serial TTL

- ✚ Velocidad de transmisión: 1200bps hasta 1.3Mbps
- ✚ *Baudrate* por defecto: 38400,8,1, n.
- ✚ Seguridad: Autenticación y encriptación
- ✚ Temperatura de trabajo: -20C a +75C
- ✚ Dimensiones: 37*16 mm
- ✚ Peso: 3.6 gramos

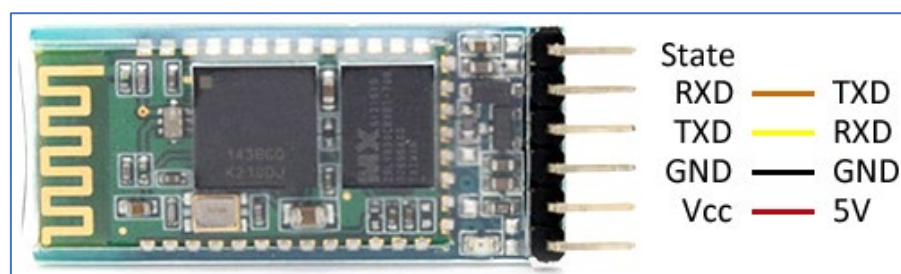


Figura 6.83 Módulo bluetooth HC05. Tomada de: <https://components101.com/wireless/hc-05-bluetooth-module>

Los pines corresponden a las siguientes funciones:

- STATE: Pin para modo de configuración. En los módulos más recientes se ha añadido un pequeño botón para ingresar a la configuración de comandos AT, sin embargo, este pin se sigue dejando, aunque no tenga ya utilidad.
- RXD: Pin de recepción de datos. Debe ir conectado al pin transmisor de datos del microcontrolador.
- TXD: Pin de transmisión de datos. Debe ir conectado al pin receptor de datos del microcontrolador.
- GND: Pin de tierra.
- Vcc: Pin de alimentación a 5V.
- 3.3V: Pin de alimentación a 3.3V. Por lo general no es utilizado ya que la placa del módulo posee un regulador de voltaje a 3.3V conectado a la terminal de 5V.

La comunicación con la que trabaja este módulo es la de tipo serie, parecida al I²C. Todos los módulos HC05 funcionan con el protocolo USART, el cual utiliza paquetes de información en forma de bits o palabras a una determinada velocidad referenciada a la señal de reloj del microcontrolador y la distancia a la que va a transmitir. Si la distancia es corta puede transmitir paquetes de bits con la comunicación síncrona, enviando la señal de reloj desde el maestro y la cual adoptará el esclavo; sin embargo, si la transmisión será a una gran distancia los paquetes de información no se envían con una señal de reloj por lo que ambos, maestro y esclavo, deben

estar sincronizados a la misma frecuencia y se enviará paquetes de palabras a través de las terminales TX y RX de ambos de manera cruzada, tal como se indica en la figura 5.81 en las líneas de conexión etiquetadas. La teoría del comportamiento interno de los registros en RAM de transmisor y receptor está fuera del alcance de este trabajo, sin embargo, la interacción entre las terminales de transmisión y recepción, así como el modo de comunicación se tomaron en cuenta para el diseño del algoritmo que será incluido en el algoritmo original de cada sistema. Ambos sistemas ya cuentan con las órdenes o *firmware* principal de trabajo, es decir, su función para la que fueron diseñadas. Con esto en mente es preciso generar las condiciones dentro de los módulos para que exista la comunicación, antes de generar las condiciones en los microcontroladores, ya que si se revisa las hojas de datos de los HC05 se encuentra que el tipo de comunicación que utilizan es la UART, es decir, la configuración asíncrona de la comunicación serie, lo que nos indica que para ambos microcontroladores, aunque sean de distintos tipos, es necesario trabajar con dos osciladores iguales, por lo que se elige un oscilador de 4MHz tanto para el P16F88 como para el P16F877A. A continuación, se debe generar la paridad entre ambos módulos a través de las configuraciones de los modos AT. También conocidos como Comandos de Hayes, los comandos AT fueron desarrollados en la década de los ochenta del siglo pasado por Dennis Hayes para establecer parámetros de configuración y conexión entre dispositivos tanto cableados como inalámbricos que transmitían información a través de protocolos de comunicación. El nombre de AT deriva de la palabra inglesa *Attention* (330ohms, 2019). Esto se hará solo una vez por lo que no es necesario que cada vez que se intente conectar ambos sistemas se tenga que realizar esta configuración. Se deben entrelazar las direcciones de ambos módulos y los pines de acceso para que entre estos se reconozcan. Esta operación de configuración interna se hará con la ayuda de placas Arduino® ya que la programación para la configuración de los HC05 es más sencilla por este medio ya que la configuración de los comandos deber ser una especie de chat en el cual se interactúa con el módulo y que es más amigable por esta comunicación, la cual se realizó con el monitor serial del mismo Arduino. La programación de esta operación no se incluye en este trabajo ya que carece de importancia en el objetivo del proyecto, sin embargo, en la figura 6.84 se muestra la operación de configuración tanto del maestro (transmisor) como del esclavo (receptor). Cabe destacar que uno de los comandos refiere a la naturaleza de fábrica del módulo, siendo este el comando AT+ROLE, el cual describe el rol del módulo ya sea 0 como esclavo (el que viene por

defecto) o 1, referente al maestro. Otro comando importante es sobre la dirección del módulo, esto es importante ya que con esto se logrará la paridad entre maestro y esclavo y se tendrá muy seguro que el esclavo está exclusivamente conectado a nuestro maestro, esto con el comando AT+ADDR.

COM3	COM4
<pre> HC05 Config +NAME:HCMAS T OK +ROLE:1 OK +UART:9600,0,0 OK +ADDR:98D3:41:F62BBA OK OK </pre>	<pre> HC05 Config +NAME:HCE SL OK +ROLE:0 OK +UART:9600,0,0 OK +ADDR:98D3:41:F62D13 OK OK </pre>

Figura 6.84 Características de los HC-05 por comandos AT, maestro (izquierda) y esclavo (derecha)

Para lograr el modo de configuración es necesario que el botón que el módulo tiene sea presionado por al menos cinco segundos mientras se le alimenta ya sea desde una fuente externa o desde la misma placa de Arduino® para poder ingresar a esta función del mismo módulo, haciendo que el LED integrado tenga un parpadeo lento a comparación del modo de usuario, el cual realiza un parpadeo muy rápido, el circuito de configuración de los módulos HC05 se muestra en la figura 6.85. Aquí es importante destacar el dato +ADDR, ya que es la directiva con la que se va a comunicar los módulos entre sí. Recurriendo igualmente a los comandos AT en Arduino® debemos conectar el maestro con el esclavo con la dirección obtenida de los datos anteriores a través de las directivas +CMODE y +BIND. Para la primera se debe colocar el maestro en 0 para realizar la paridad y en la segunda el +ADDR que se obtuvo del esclavo.

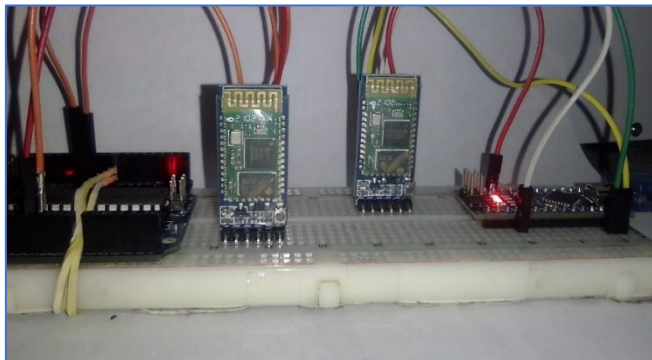


Figura 6.85 Conexión de maestro (izquierda) y esclavo (derecha) con apoyo de placas Arduino®

Una vez se tiene esta paridad, los módulos HC05 siempre estarán conectados y fungirán como dos cables que salen del Tx del maestro al Rx del esclavo, sin necesidad de esta conexión, por lo que la estructura de la programación de ambos sistemas se regirá únicamente por el protocolo RS232. Este es un protocolo desarrollado a finales de los años sesenta por la *Electronic Industries Association* de Estados Unidos para poder conectar equipos de datos a distancias cortas (en aquel entonces distancias no mayores a 50 pies) en entornos de mucha interferencia. El protocolo RS232, representa el valor de un 0 lógico con una tensión de +12 voltios, y el valor de un 1 lógico con -12 voltios (Valdés Pérez & Pallás Areny, 2007). La velocidad de transferencia de los paquetes de datos por lo general con este protocolo se encuentra en 9600 baudios, la cual es una medida de bits por segundo que puede transferir el modo de comunicación; al configurar los HC05 con los comandos AT se encontró que ambos trabajaban a 9600, por lo que este dato es importante al momento de configurar la comunicación en el *firmware* de los dos microcontroladores.

Dado que la forma de comunicación es bajo el protocolo UART (modo asíncrono del USART), la señal de reloj no se envía por el transmisor y los paquetes de datos deben señalar un inicio y una parada en grupos de 9 bits, donde el noveno marca el final de la transmisión de datos y vacía uno de los registros internos del microcontrolador encargado de las comunicaciones serie. El tema de los registros, como se ha mencionado, no se tratará en este trabajo, sin embargo, cabe destacar que el tratamiento de los datos se lleva a cabo dentro de los registros de memoria de datos TXSTA para transmisor y RCSTA (mikroe.com, 2021). Un esquema del paquete de datos enviado se muestra en la figura 6.86. Dado que la comunicación asíncrona no lleva consigo una fuente de reloj, es necesario entonces que ambos sistemas cuenten con un mismo oscilador. Se ha elegido para ambos en este trabajo un oscilador externo de cristal de 4MHz, siendo que es bastante estable. En la figura 6.87 se muestra una tabla donde se exponen los distintos osciladores y las velocidades de transmisión en baudios para la comunicación en RS232.

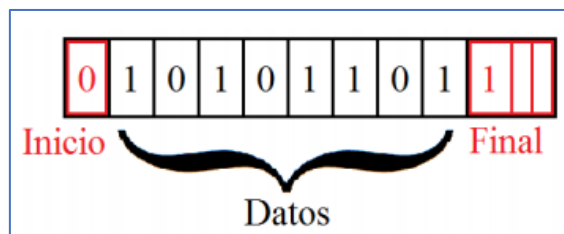


Figura 5.86 Esquema de paquetes de información transferidos en la comunicación por UART. Tomada de: mikroe.com (2021)

Velocidad de transmisión en baudios	SYNC = 0, BRGH = 1, BRG16 = 1 or SYNC = 1, BRGH16 = 1											
	Fosc = 4 MHz			Fosc = 3.6864 MHz			Fosc = 2 MHz			Fosc = 1 MHz		
	Velocidad de transmisión actual	Error %	SPBRG valor (decimal)	Velocidad de transmisión actual	Error %	SPBRG valor (decimal)	Velocidad de transmisión actual	Error %	SPBRG valor (decimal)	Velocidad de transmisión actual	Error %	SPBRG valor (decimal)
300	300	0.01	3332	300	0.00	3071	299.9	-0.02	1666	300.1	0.04	832
1200	1200	0.04	832	1200	0.00	767	1199	-0.08	416	1202	0.16	207
2400	2398	0.08	416	2400	0.00	383	2404	0.16	207	2404	0.16	103
9600	9615	0.16	103	9600	0.00	96	9615	0.16	51	9615	0.16	25
10417	10417	0.00	95	10473	0.53	87	10417	0.00	47	10417	0.00	23
19.2k	19.23k	0.16	51	19.2k	0.00	47	19.23k	0.16	25	19.23k	0.16	12
57.6k	58.82k	2.12	16	57.6k	0.00	15	55.56k	-3.55	8	-	-	-
115.2k	111.1k	-3.55	8	115.2k	0.00	7	-	-	-	-	-	-

Figura 5.87 Tabla de osciladores para la comunicación UART. Tomada de: mikroe.com (2021)

Armados con todo este conocimiento, es posible generar el par de sistemas embebidos que el proyecto requiere. Con la paridad ya obtenida al configurar ambos HC05 por comandos AT y el conocimiento sobre la forma de conexión de transmisor y receptor en modo asíncrono nos posibilita para generar un diagrama esquemático del sistema completo, el cual nos facilitará la creación del circuito impreso donde las dimensiones de los dispositivos electrónicos a utilizar nos permitirán generar un diseño de circuito, así como el empleo de baterías para su alimentación. Los diagramas esquemáticos para los dos sistemas embebidos de transmisión y recepción de datos se encuentran en el anexo 3 de diagramas y planos, y en la figura 6.88 se muestra el montaje en tablilla *protoboard* de ambos sistemas ya comunicados. Los códigos de *firmware* para ambos sistemas se encuentran en el anexo 2 de programas.

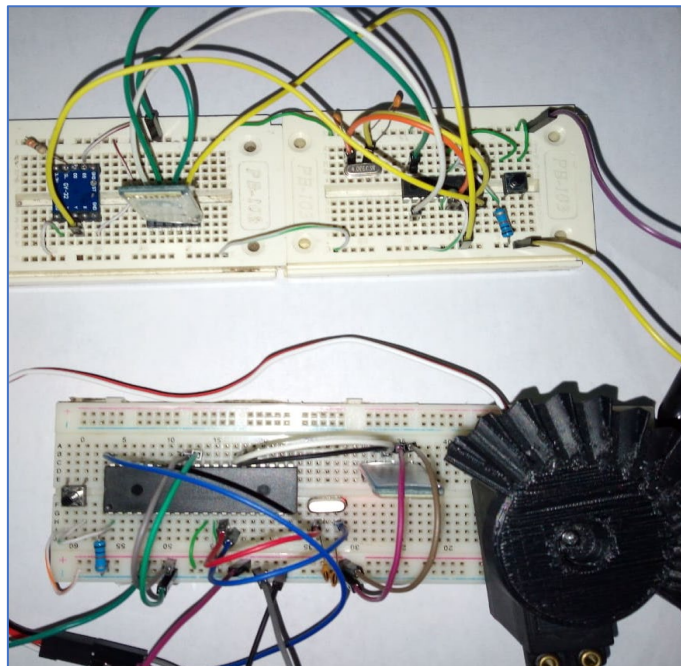


Figura 6.88 Montaje prototipado de ambos circuitos conectados por HC05

Ambos sistemas serán alimentados con baterías de 9V ya que estas son las que mejor se adaptan a los requerimientos de voltaje de cada elemento, sobre todo para la alimentación del servomotor el cual, al realizar las pruebas descritas en página 143 del presente documento; en conjunto para ambos se requiere el uso de reguladores de voltaje electrónicos del tipo L7805. Sin embargo, esto genera una problemática sobre el uso de estas baterías en tanto a eficiencia y generación de residuos tóxicos. Estos temas serán tratados en futuros desarrollos contemplando el uso de baterías recargables.

VII. FABRICACIÓN Y RESULTADOS FINALES

Creación del circuito impreso

Con los esquemáticos ya creados en el capítulo anterior, la lista de materiales que se encuentra en el anexo 1 y el sistema de alimentación propuesto, es posible generar un circuito impreso en placa fenólica para el montaje del prototipo de prótesis o PCB (*printed circuit board*). Es importante generar en primer lugar los sistemas embebidos para diseñar los contenedores mecánicos tanto para el dispositivo de transmisión de datos como el que irá ligado al mecanismo ya diseñado. Para esto se ha utilizado un software CAD para diseño de circuitos electrónicos, el mismo que se ha usado para generar los esquemáticos. Una vez conectados todos los dispositivos en la sección de esquemáticos es posible generar rutas con las cuales cada dispositivo conecta. Sin embargo, es importante destacar que las pistas que serán impresas en una placa fenólica deben tener un ancho de acuerdo con las siguientes condiciones de diseño:

- ✚ Máxima frecuencia utilizada para el sistema
- ✚ Especificaciones eléctricas de la alimentación
- ✚ Señales de reloj y frecuencias internas del circuito
- ✚ Voltajes distintos dentro del PCB
- ✚ Cantidad de capas que tendrá el circuito impreso

Con esto en mente se pueden responder estas características para generar el diseño. Se utiliza un regulador ya que la alimentación se hará con una batería de 9V; la señal de reloj es única y aplicará únicamente a un microcontrolador (4Mhz), no habrá un voltaje diferente en la PCB más allá de la alimentación directa y por cuestiones económicas se realizará con una sola capa, es decir, la placa fenólica únicamente tendrá una cara con pistas. El diseño partirá de un solo bus de alimentación VDD, salida del regulador electrónico 7805 y se utilizará una sola isla de tierra o VSS. Ahora el problema radica en los anchos de pista para las conexiones.

Existe un par de fórmulas que arrojan el ancho de pista necesario de acuerdo con la corriente máxima aplicada a los circuitos. Las fórmulas 7.1 y 7.2 determinan el área de sección de la pista y el ancho de esta respectivamente.

$$\text{Área} = \left(\frac{I_{max}}{k_1 * \Delta T^{k_2}} \right)^{\frac{1}{k_3}}$$

Ec. 7.1 Ecuación de cálculo de área de la pista

$$\text{Ancho} = \frac{\text{Área}}{\text{Grosor} * 1.378}$$

Ec. 7.2 Ecuación del ancho de pista (en milésimas de pulgada)

Donde:

- ✚ $I_{\text{máx}}$: Corriente máxima.
- ✚ K1 de una capa: 0.0647
- ✚ K2 de una capa: 0.4281
- ✚ K3 de una capa: 0.6732
- ✚ ΔT : Variación de la temperatura
- ✚ Grosor: grosor de pista por cantidad de masa.

Los fabricantes de PCB indican grosores de acuerdo con la cantidad de componentes que estarán dentro del circuito (1-3 oz/ft²). Para este circuito se ha utilizado el grosor de 1oz/ft². Revisando todos los componentes que ambos sistemas tienen y el elemento de mayor cuidado o el más sensible es siempre el microcontrolador. Revisando las hojas de datos en el anexo 1 de materiales y componentes esta corriente es de 1A para ambos y una temperatura máxima de 85°C, esto ya que no tendrá disipadores ni sistemas integrados de ventilación.

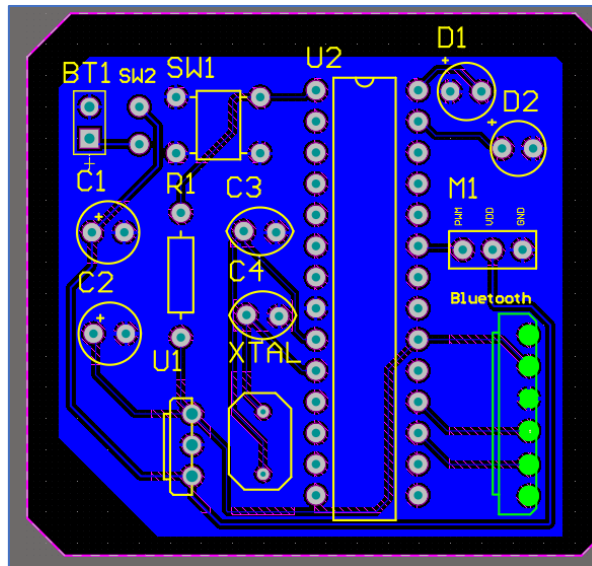
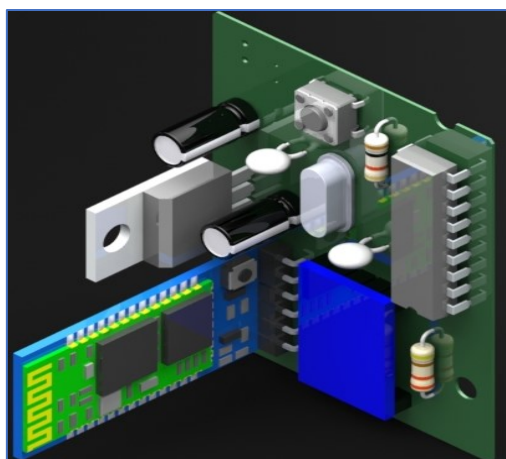


Figura 7.1 Distribución de circuito del sistema motor

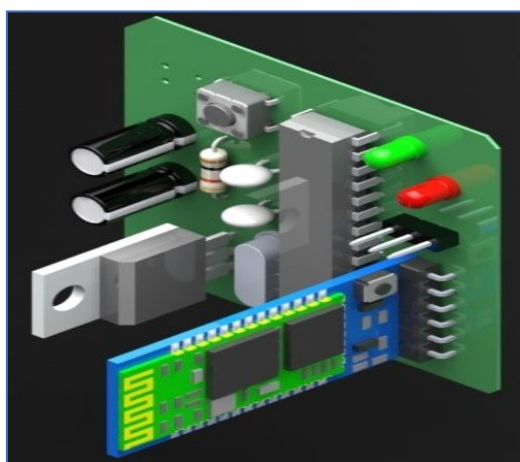
Así es como se obtiene el área de pista y el ancho que se colocará en el software CAD en milésimas de pulgadas de un mínimo de 3.13th. Para este proyecto se usa una media de 5th.

En la figura 7.1 se muestra como el software CAD distribuye los componentes e indica las conexiones entre estos y el sistema de alimentación. Para ambos sistemas, los *footprints* del PCB se muestran en el anexo 3 de documentos.

La metodología que se usó para la construcción de los circuitos impresos es un método casero utilizando papel termotransferible, una solución de cloruro férrico con agua y una plancha doméstica. Así como un pequeño taladro de mano y una broca de 3/16" para realizar las perforaciones. En las figuras 7.2 a) y b) se muestran los circuitos generados por el programa CAD de diseño de circuitos electrónicos y en las figuras 7.3 de la a) a la d) el proceso que se llevó a cabo para realizar estos circuitos, así como el resultado final, el cual proporciona una comparativa de lo obtenido en el diseño CAD y la realidad.



a)



b)

Figura 7.2 a) Diseño CAD del circuito emisor; b) diseño CAD del circuito receptor

En el proceso que se utilizó para la manufactura de los circuitos impresos se utilizó papel termo transferible con el que se imprimió con tinta tóner las pistas obtenidas del software de diseño de PCB y se utilizó una plancha casera para estampar el tóner en la placa fenólica. Con una solución

de cloruro de hierro se logró conseguir corroer el cobre que no fue cubierto; sin embargo, dado que el tamaño de las pistas fue demasiado pequeño, este método resultó inviable para la aplicación de una soldadura correcta ya que muchas de las pistas se habían borrado al tratar de despegar el papel. Se sugirió el uso de papel de acetato, sin embargo, el problema persistió. En la figura 7.3 se muestra el resultado.

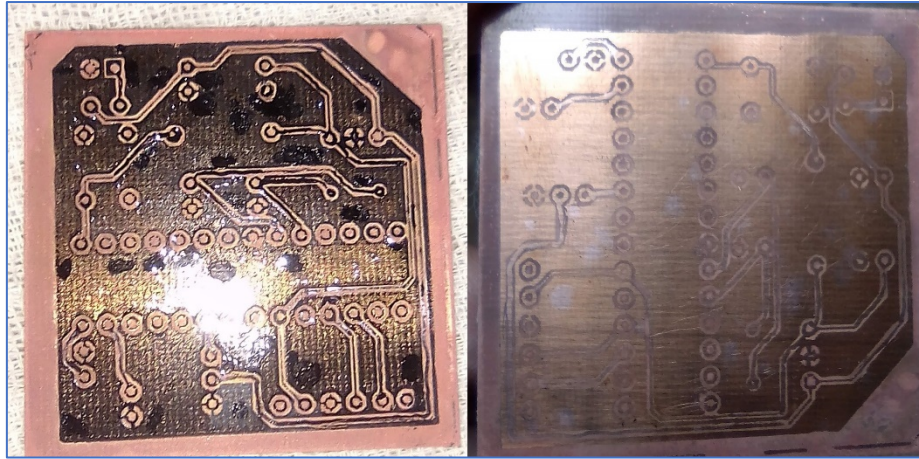


Figura 7.3 Impresión en placa fenólica y ataque químico como resultado

Posteriormente se optó por la fabricación de la placa a través del uso de una máquina de CNC con una fresa especializada de 1.5 mm de diámetro. En la figura 7.4 se muestra el proceso. Sin embargo, al momento de realizar la soldadura sobre la placa para el sistema embebido correspondiente al transmisor, las pistas empezaron a levantarse dejando únicamente la parte

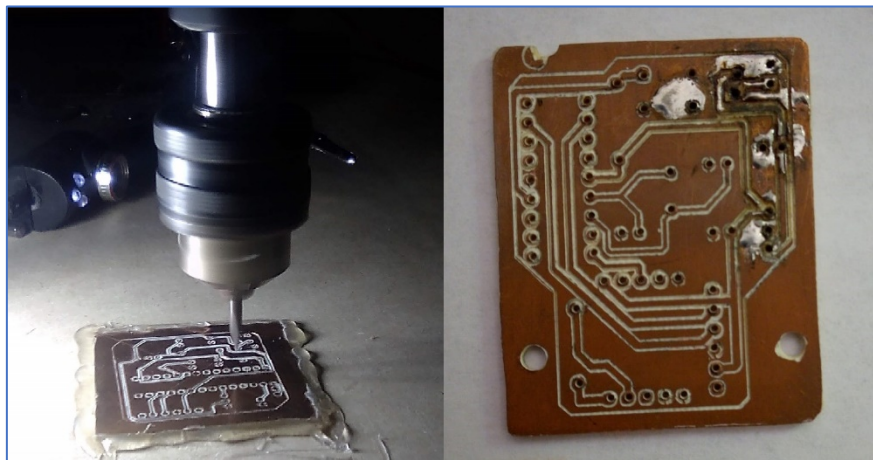


Figura 7.4 Izquierda) Maquinado de placa; Derecha) Placa generada

no conductora de la placa. La figura 7.4 (derecha) muestra el intento de soldado, además de que algunas islas de tierra también habían perdido conectividad con el resto tras el maquinado de la placa.

Para poder construir el prototipo y por cuestiones de tiempo se decidió utilizar placas perforadas y realizar la soldadura y el ensamble de la placa en esta. En la figura 7.5 se muestra el resultado. Los diseños de placa se pueden enviar a manufacturar a empresas especializadas por medio de los archivos *gerber*, que pueden ser utilizados para futuros trabajos relacionados. Estos diseños, tanto los eléctricos como los mecánicos se encuentran en el Anexo 2.

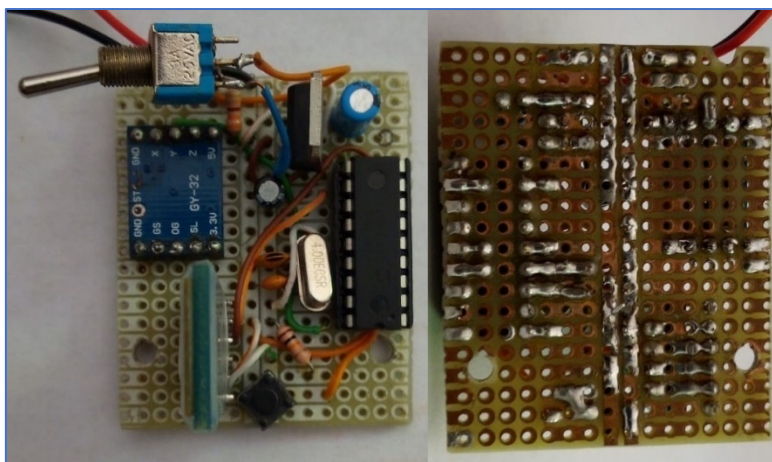


Figura 7.5 Circuito montado y soldado en placa fenólica perforada

El resultado del ensamble para el sistema sensor con el acelerómetro MMA7361L y el microcontrolador PIC16F88 se muestra a continuación en la figura 7.6 junto con un renderizado del diseño original. Se ha realizado la propuesta de caja contenedor para el tamaño de placa resultante del diseño eléctrico obtenido del CAD para PCB. Sin embargo, la falta de información por parte del autor de este trabajo sobre ergonomía veterinaria dificultó el proceso de diseño por lo que este es solamente una propuesta y estará sujeta a modificaciones parciales o totales en un futuro para trabajos posteriores.

Ahora, el diseño para el segundo sistema no solamente implica la adaptación del sistema electrónico de control, el cual posee algunos elementos de señalización para determinar la conectividad por protocolo UART entre los dos sistemas, sino que además debe contener un espacio para ajustarse sobre el cuerpo del perro y el acople con el mecanismo motor. Siendo para el sistema de potencia mecánica se realizaron los mismos métodos de fabricación de la placa siendo estos más efectivos en sus resultados, por lo que no se optó por el uso de maquinaria de control numérico ni tampoco de una placa perforada. Los resultados se mostrarán más adelante.



Figura 7.6 Sistema embebido del sensor con su contenedor: derecha, diseño renderizado; izquierda, producto final.

Como ya se ha comentado, la falta de información sobre ergonomía veterinaria y, además, ergonomía canina, nos imposibilita el generar componentes mecánicos diseñados de tal manera que ajusten perfectamente con el muñón del perro.

El proceso de generación del adaptador (al cual irán acoplados como ya se mencionó el sistema electrónico de control, el motor o potencia y el mecanismo) se llevó a cabo de manera similar al sistema sensor y presentó asimismo cuestiones similares, sin embargo, para éste, al considerársele de mayores dimensiones, fue posible elaborar por medio del método con cloruro férrico, la placa del sistema de potencia con el microcontrolador 18F2550. El resultado se muestra en la figura 7.7. Las siguientes propuestas fueron realizadas en relación con el adaptador del mecanismo del prótesis. Antes, cabe mencionar que la cuestión más importante fue sobre la alimentación de los controles, el cual, para el prototipo inicial, cuyo desarrollo está descrito en todo el documento, fue sugerido el uso de baterías de 9V dada su capacidad para movilizar el servomotor y mantener la alimentación sobre los circuitos, por lo que a su vez también se sugirió el uso de un regulador a 5V de tipo electrónico L7805, tal como se mencionó en la página 153 de este documento. Al momento de realizar la manufactura este circuito presentó los mismos problemas que el anterior por lo que, al igual que este, se utilizó una placa fenólica comercial ya perforada para el montaje. Los resultados se muestran en las figuras 7.7 y 7.8, donde se muestra el resultado final del circuito obtenido.

Una vez concluida la parte de control, así como el diseño del mecanismo del prótesis, es necesario la construcción de un aditamento que pueda colocársele al perro Milo entorno al muñón de su pata amputada, así como la posibilidad de colocársele de manera “embebida” tanto el sistema de control de potencia, el motor y la alimentación.

Durante las revisiones al perro se calcó el perfil del muñón para realizar un adaptador hueco.

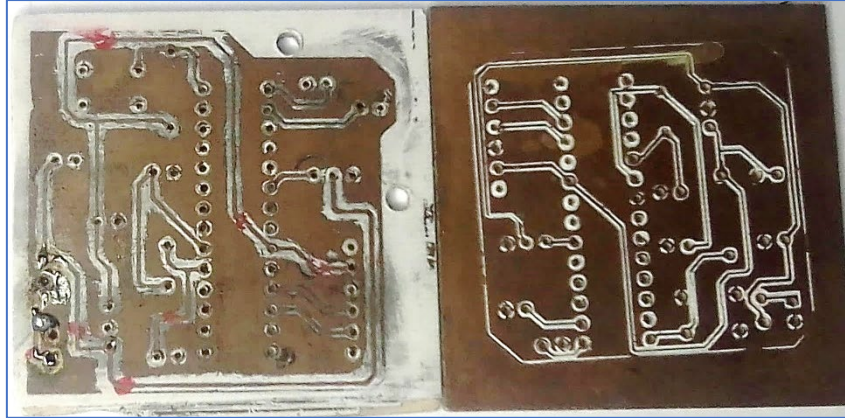


Figura 7.7 Izquierda) Impresión en placa fenólica y ataque químico; Derecha) Maquinado de placa

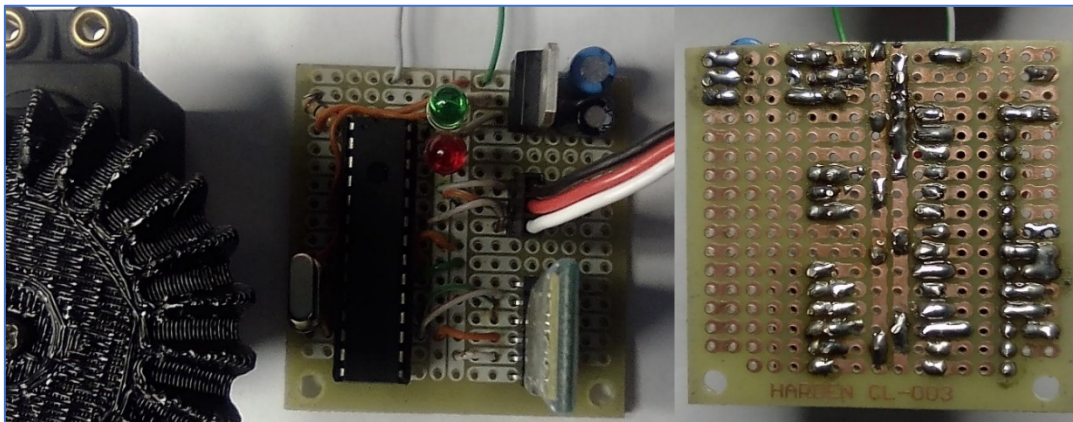


Figura 7.8 Circuito montado y soldado en placa fenólica perforada

Esto se realizó con la intención de generar una superficie para generar un sólido hueco o de tipo cascarón. Siendo el volumen de éste muy grande para el proceso de modelado se ha propuesto para este prototipo la división en dos del cascarón del sujetador, esto con el propósito de permitir al servomotor ajustarse sobre éste y permita las demás partes del prótesis ser conectados entre sí sin ocupar aditamentos mecánicos especiales para enlazar cada eslabón. En la figura 6.9 se muestra el modelo CAD de esta sección (sin las cavidades para insertar el circuito embebido de control y la batería).

Manufactura del prótesis

Dada la disposición del mecanismo obtenido en la síntesis dimensional gráfica, la cual fue explicada en la página 67 del presente documento, donde se debe colocar los ejes de rotación o bancadas de manivela y oscilador a una distancia aproximada de 60 mm y un ángulo negativo de 24° , tal como se muestra en el documento 6 del Anexo 3 de documentos y diagramas.

Es por ello que los ajustes para colocar los elementos se deben diseñar para sostener tanto el eje (el cual es el único de los materiales que no es PLA, sino aluminio), los rodamientos y los eslabones del mecanismo de cuatro barras.

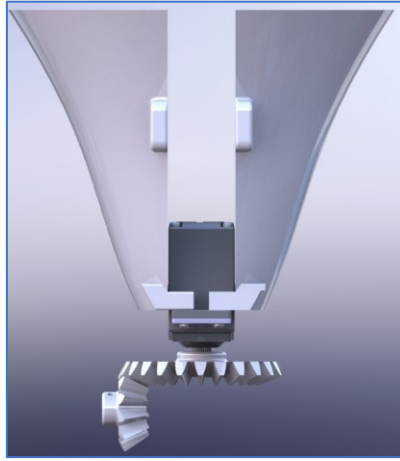


Figura 7.9 Adaptador del mecanismo para el muñón (modelo renderizado)

Para el eje se utilizó una pequeña barra de aluminio en la cual como pieza bruta tenía una longitud de 110 mm de largo y un diámetro de 7.1 mm, este elemento se prevé posea un ajuste justo de tal manera que los rodamientos ensamblen con un juego radial sin necesidad de aditivos químicos para su sujeción, esto va también para los aditamentos de soporte que ya se mencionaron. Para propósitos de los diseños ya realizados para el engrane conducido que se muestra en la figura 7.9 acoplado al engrane conductor, el ajuste debe ser de 5.1mm. Siendo esto es necesario realizar un maquinado para este eje con el uso de un torno manual y una herramienta de corte estándar, un buril de cobalto. Dado que estas herramientas son bastante económicas y de fácil afilado, se requiere entonces realizar los cálculos necesarios para la obtención de los parámetros tecnológicos óptimos y evitar dañar tanto el herramental como la pieza y la máquina. El primer paso es el de la selección de la herramienta de corte en cuanto a su forma. Cada operación en el torno requiere un herramental específico, es decir, la forma del cortador será determinada para las operaciones. Siendo que se requiere solamente un desbaste, la salida de corte puede ser la estándar, a partir de la norma DIN 4951, para el aluminio con las características mostradas en la tabla 7.1 a continuación.

Tabla 6.1 Características de la herramienta de corte para aluminios

Ángulo de incidencia	Ángulo de filo	Ángulo de desprendimiento	Material Destino
10°	40°	40°	Aluminios

En la figura 7.10 se muestran estos ángulos referenciados en el filo de la herramienta de corte. La siguiente parte de las consideraciones de la velocidad del husillo dado el material y las características del mismo, al ser este aluminio se tiene que la velocidad de corte $V_c=61$ m/min y un avance de corte promedio de $f=0.575$ mm (Gerling, 1994).

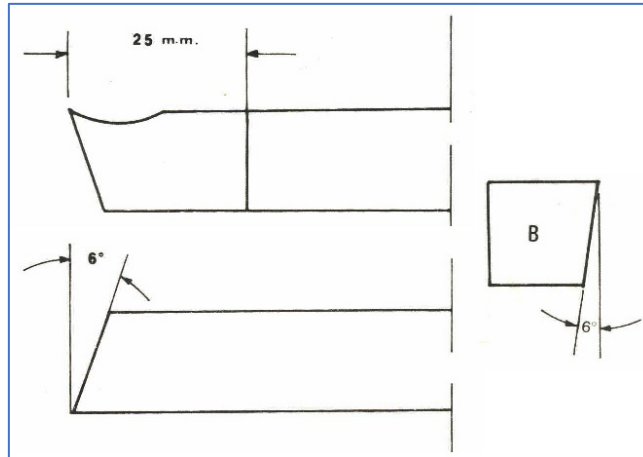


Figura 7.10 Referencias para ángulos en el filo del cortador

La ecuación para la velocidad del husillo en el torno se presenta a continuación en la ecuación 7.3, el resultado se da en revoluciones por minuto.

$$V_{\text{husillo}} = \frac{V_c * 1000}{\pi * D} = \frac{61 * 1000}{\pi * (7.1)} = 2734.775 \text{ rpm}$$

Ec. 7.3 Ecuación del ancho de pista (en milésimas de pulgada)

En las figuras 7.11 a) y b) se muestran tanto la herramienta de corte como el maquinado de la pieza en bruto respectivamente, cuyas medidas se hace referencia en el documento dimensional en el anexo 3 en un único documento dimensional.



Figura 7.11 a) Cortador utilizado para el maquinado del eje de potencia mecánico



Figura 7.11 b) Maquinado del eje de aluminio y resultado final

Siendo que el eje es la única pieza no plástica en el prototipo de prótesis, lo que sigue a continuación, una vez terminadas se procede a la manufactura de las mismas por medio de una impresora 3D, equipo el cual se muestra en la figura 7.12. El proceso de manufactura se hace por medio de un software CAM denominado *slicer* o generador de código G con el cual trabaja la impresora, tal como lo haría una máquina de CNC industrial. Sin embargo, la facilidad de uso de este equipo radica en el *slicer*: este programa requiere que el modelo 3D previamente diseñado en el software CAD sea convertido a un formato de extensión *.stl*. Este formato reduce la información de los archivos CAD para que los programas de impresión (programa en código G), trabajen menos al generar y calcular las trayectorias de la impresora (Martín Cruz, 2020).

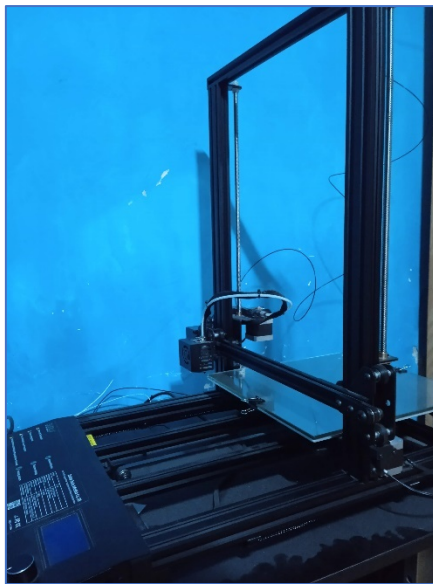


Figura 7.12 Impresora 3D utilizada para manufacturar las piezas del proyecto

En la figura 7.13 se muestra la extensión *.stl* a partir del modelo CAD. Esta forma reducida es leída por el *slicer*, el cual lee las superficies y entidades geométricas reducidas y las convierte en código de control numérico.

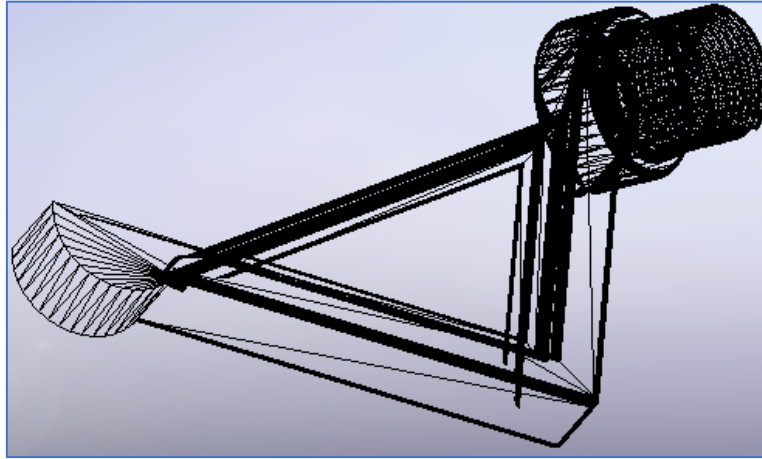


Figura 7.13 Ejemplo de archivo *.stl* del modelo 3D para la pata roscada

Con este archivo de mallado, el *slicer* puede calcular las trayectorias de la máquina para formar la pieza. Primeramente, se deben considerar las dimensiones de trabajo de la impresora, cada impresora tiene un área de trabajo definido debido a su tamaño. En el caso de la impresora a utilizar las medidas del área de trabajo son 30x30x40 centímetros en los ejes X, Y y Z, respectivamente. Estos parámetros se deben introducir en el *slicer* para que, por defecto, indique el cero pieza en el centro del plato caliente.

Los siguientes parámetros a configurar son los siguientes:

- ✚ **Grosor de las capas:** esta está definida por el tamaño del extrusor, es decir, el orificio de la boquilla o nozzle (para la fabricación de piezas en PLA es de 0.4 mm), eligiéndose para todas las piezas un grosor de 0.2 mm.
- ✚ **Densidad del mallado:** la impresión 3D nunca es enteramente sólida, es necesario generar un mallado interno y de soporte. La densidad es un parámetro que define qué tan cerrada es la maya entre secciones. Por estándar, el *slicer* maneja una densidad del 20% y una forma cúbica del mallado.
- ✚ **Espesor de la pared:** la pared es la capa exterior de todas las piezas de impresión. Para el caso de las piezas para el prótesis se utiliza el estándar de 0.8 mm, ya por defecto en el programa CAM.
- ✚ **Temperaturas:** en este apartado existen dos temperaturas a considerar, la de la cama caliente y la del extrusor. Dado que por cuestiones de operación se utilizaron dos

filamentos (uno blanco y otro negro) las temperaturas varían debido a que el PLA negro es más difícil de trabajar por su composición y calidad, siendo el PLA blanco de mejor calidad y de más fácil manejo. Las temperaturas de operación para el filamento negro y blanco son: Cama caliente de 60 °C y 50 °C respectivamente, y del extrusor 210 °C y 200 °C respectivamente.

- ✚ **Selección de soporte:** este apartado es importante, pero a la vez opcional. Dado que existen piezas muy grandes que requieren una buena cantidad de tiempo para trabajar (las piezas más pequeñas rondan entre los 45 minutos y la hora y media) es necesario generar un soporte tanto para las piezas que requieren sostén por su posición y también para evitar el levantamiento de capas inferiores, el efecto conocido como *warping*, el cual produce piezas defectuosas por contracción. Dado que la manufactura de estas piezas se realizó en otoño, era muy probable la aparición de *warping* en las piezas, por lo que todas se realizaron con este soporte.

Con estos datos ya dentro de la configuración de la impresión es posible cargar el archivo de mallado y generar el programa con extensión *.gcode* el cual será leído por la máquina. En la figura 7.14 se muestra un ejemplo de cómo el programa CAM trabaja los modelos reducidos y en la figura 7.15 el trabajo de la impresora 3D sobre el objeto al que se le sacó el código G de comando de control numérico.

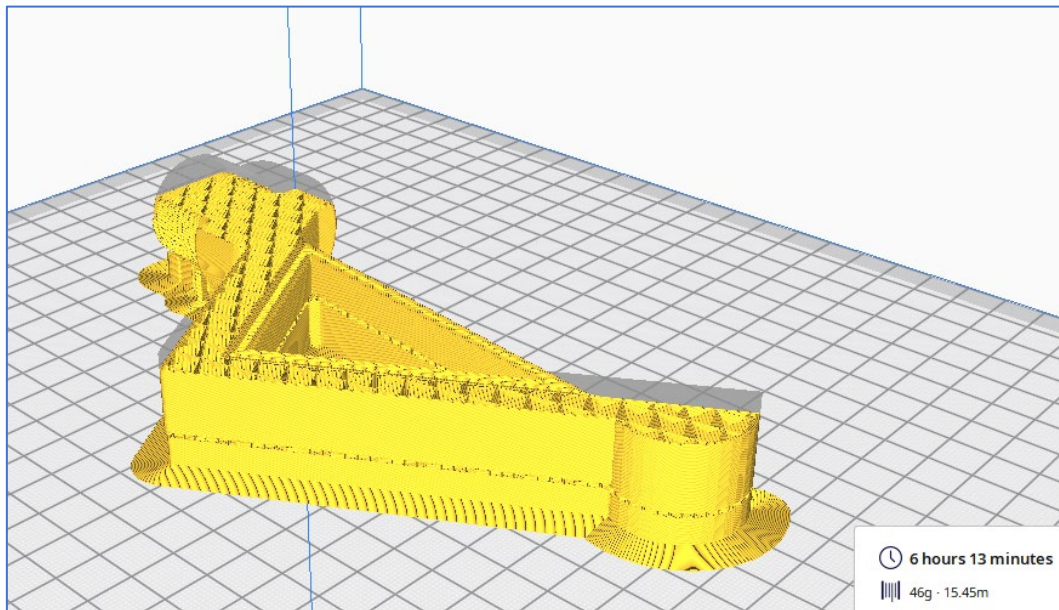


Figura 7.14 Generación gráfica de código G desde software *licer*



Figura 7.15 Manufactura de piezas en PLA por impresión 3D

Esta operación se realizará con todas las piezas como ya se mostró en la página 161 de este documento en la figura 7.6. Cada pieza de manera dimensional posee su documentación en el anexo 3 del presente trabajo.

Una vez impresas todas las piezas y de acuerdo con los documentos de ensamble, ya se puede obtener la prótesis completa, ensamblando las piezas correspondientes a partes del mecanismo, la transmisión de potencia mecánica, tornillerías y rodamientos, así como elementos electrónicos y de alimentación. En la figura 7.16 a) se muestra el modelo CAD del prototipo finalizado, así como en la figura 7.16 b) donde se muestran las piezas componentes y el ensamble completo de manera física respectivamente.

Cabe mencionar que el uso de elementos para sostener los elementos rotacionales se realizó después del diseño del análisis de elemento finito para los sistemas motores. Es decir, no se tomó en consideración estos elementos de soporte dado el tiempo que se tenía para la entrega del trabajo, siendo la necesidad de tener un acoplamiento funcional del elemento de mecanismo tipo rotacional, así como la disposición de la bancada y el centro rotacional de la manivela, la cual, tal como se muestra en el documento 6 del anexo 3, se encuentra a una distancia de 60 mm a un ángulo de -24° , por lo que esta proporción debe conservarse y respetarse en el diseño para generar el movimiento deseado. Siendo que un ensamble completo en CAD introducido al software de elemento finito requiere mucha potencia de información en tanto la disposición de las fuerzas tanto las ya obtenidas para el diseño del mecanismo de cuatro barras generador de

movimiento como las que se encuentran en los engranes y las reacciones sobre los soportes dificultan el análisis de la prótesis completa dado el equipo con el que se contó para el diseño y simulación de la máquina.

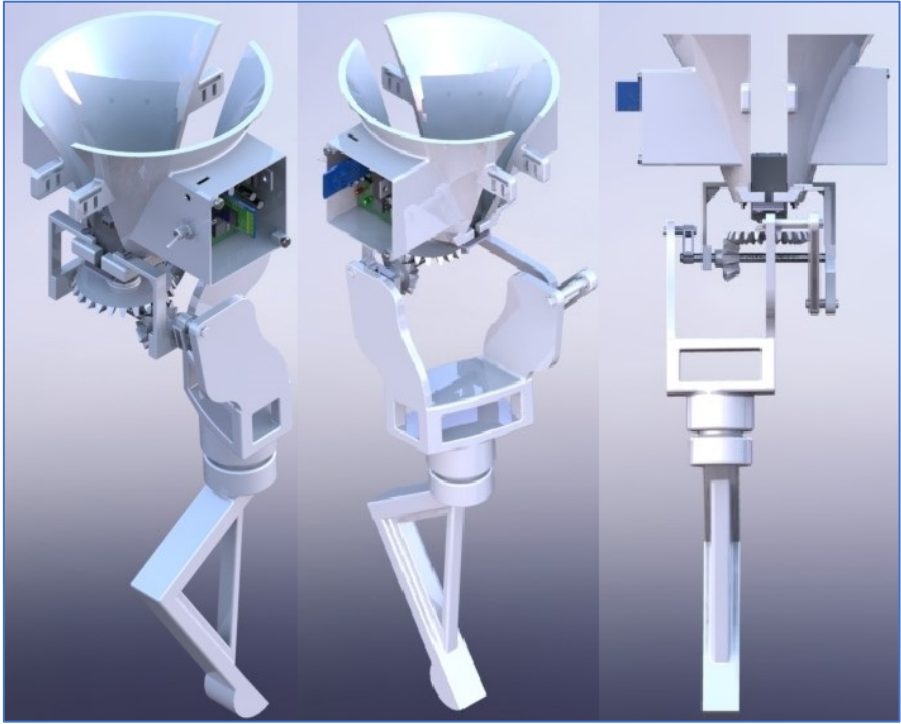


Figura 7.16 a) Ensamble CAD del prototipo de prótesis



Figura 7.16 b) Ensamble del prototipo de prótesis armado

Tras el armado, se presentó una desestabilización en la parte derecha del prótesis (desde la vista lateral derecha), la cual es visible en la sección derecha de la figura 7.16 b). Esta es posiblemente debida a que los únicos sostenes para esa parte del mecanismo son el oscilador y los pernos. Este se puede categorizar como un error de diseño dado es espacio que se buscaba compensar por el aditamento de sujeción o sostén, por lo que para el uso adecuado del prótesis se sugiere un rediseño únicamente de esta sección y el cambio de material.

Todo esto será tratado en la sección siguiente.

VIII. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA FUTURA

Como se ha mencionado con anterioridad, al iniciar el proyecto se planteó el uso de metodologías de cinemática inversa tales como transformaciones homogéneas, criterios de Denavit-Hartenberg e incluso cuaterniones.

Considerando que para el planteamiento de cualquier proyecto de ingeniería se tienen una serie de fases, una de las importantes es el de la medición de los factores o criterios ponderantes. Estos refieren a una serie de criterios que permiten la delimitación de la problemática a atacar al momento de intentar generar la solución para cualquier problema. Estos pueden considerarse en el siguiente listado:

- Conocimientos.
- Tiempo.
- Recursos
 - Humanos.
 - Técnicos.
 - Materiales.
 - Económicos.

Con este listado se puede resumir la decisión sobre el cambio de perspectiva del proyecto: se ha pasado de la concepción de un prótesis robótica de dos grados de libertad, al cual se le puede diseñar con los datos obtenidos de la medida de la pata sana de Milo y someterlos al estudio de cuaterniones para la cinemática del robot, considerando la localización en ángulos del acelerómetro y, bajo el principio de Hildebrand, ejecutar estos desplazamientos. Sin embargo, a falta de conocimientos por parte del desarrollador de los temas de cinemática y dinámica de robots, se optó por un conocimiento bien conocido por los alumnos de ingeniería mecánica y eléctrica de la Facultad: mecanismo de cuatro barras de un solo grado de libertad. Toda esta metodología fue desarrollada desde la síntesis y análisis del mecanismo en el capítulo 5 en su apartado correspondiente.

Dado que estos mecanismos requieren de un soporte muy estable (por lo general el suelo o bastidores propios de la maquinaria empotrada al suelo) la ausencia de un soporte estable para el mecanismo de un grado de libertad generado compromete la estabilidad de todo el prótesis y, por consiguiente, el desarrollo no cumple de forma adecuada con lo planteado en la hipótesis

y los objetivos finales. Las vibraciones al momento de sostener el resultado físico y su inestabilidad fueron evidentes y suficientes para no arriesgar al perro Milo a colocarse el diseño creado a través de la generación del mecanismo por los métodos planteados en el capítulo 5, por lo que se tomó la decisión de descartar el diseño obtenido.

Esto no quiere decir que la metodología estuviese errada, sino que el comprometer el mecanismo a un solo grado de libertad no es la solución para la problemática planteada a modo de generar un prototipo funcional completo.

En tanto la parte de control y electrónica, el tiempo de envío de datos en el primer sistema embebido, el que se encarga de censar las posiciones de la pata sana, así como el método planteado, a pesar de ser funcional y adecuado, no permite que la información sea enviada de forma correcta; por lo que se plantea una revisión del código del sistema embebido sensor para determinar el tipo de dato adecuado que será enviado al receptor, siendo el tipo de dato enviado del tipo cadena de caracteres.

Todo lo anterior será el punto de partida para la generación de un segundo prototipo de prótesis para el mismo perro, pero ahora con el uso de dos grados de libertad y consideraciones teóricas en el campo de la robótica, como las mencionadas al inicio de este capítulo, lo cual será revisado en futuros trabajos.










Referencias

- 330ohms. (18 de Octubre de 2019). *Guía sintetizada de comandos AT GSM+BT*. Obtenido de <https://blog.330ohms.com/2019/10/18/guia-definitiva-de-comandos-at-gsmbt/>
- Alexander, R. (1989). Optimization and Gaits in the Locomotion of Vertebrates. *Physiological Reviews*, 1199-1227.
- arduino123. (2016). *Robótica con Arduino*. Obtenido de <https://arduino123.blogspot.com/p/bluetooth.html>
- Ashby, M. (2005). *Materials Selection in Mechanical Design*. New York City: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Askeland, D. (1987). *La Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Ciudad de México: Grupo Editorial Iberoamérica.
- Avello, A. (2014). *Teoría de Máquinas*. Navarra: Universidad de Navarra.
- Badoux, D. (1965). A contribution to the study of the body axis in mammals with special reference to domesticated dog. *Akad. Wetensch*, 68:374-390.
- Beer, F., & Johnston, E. (1973). *Mecánica vectorial para ingenieros. Tomo II: Dinámica*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Bertoline, G., & Wiebe, E. (1994). *Dibujo en ingeniería y comunicación gráfica*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- Bhatti, Z., & Waqas, A. (2017). Gait Analysis and Biomechanics of Quadruped Motion for procedural Animation and Robotic Simulation. *Bahria University Journal of Information & Communication Technologies*.
- Biewener, A. A., & Lyman, C. P. (2003). *Animal Locomotion*. New York: Oxford University Press.
- Blatz, P., Mae Chu, B., & Wayland, H. (1969). On the mechanical behavior of elastic animal tissue. *The Society of Rheology*, 83-102.
- Bolton, W. (2013). *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica*. México D.F.: Alfaomega.
- Budynas, R., & Nisbett, J. (2019). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- Camberg, A., Bohner, F., & Töller, J. (2018). Formability enhancement of EN AW-5182 H18 aluminum. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1-8.
- Caminero, M., & Chacón, J. (2019). Additive Manufacturing of PLA-Based Composites: The Effects of Graphene Nanoplatelet Reinforcement on Mechanical Properties, Dimensional Accuracy and Texture. *Polymers*, 1-22.
- Carr, B. J., & Dycus, D. L. (2016). Canine Gait Analysis. *Today's Veterinary Practice Journal*, 93-99.
- Corona Ramírez, L., & Abarca Jiménez, G. (2019). *Sensores y Actuadores. Aplicaciones con Arduino*. Ciudad de México: Patria Educación.
- De Erice, E., & González, A. (2009). *Biología. La Ciencia de la Vida*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Control. (2011). *Módulo 3: Sistemas Embebidos*. UNED.
- Díaz del Castillo Rodríguez, F. (2017). *Impresión 3D, Una Introducción (Lecturas de Ingeniería N° 26)*. Cuautitlán: UNAM FES Cuautitlán Depto. de Ingeniería.

- Done, S. H., & Evans, S. A. (2010). *Atlas en color de anatomía veterinaria. El perro y el gato*. Madrid: Elsevier Mosby.
- Dyce, K. W. (2002). *Textbook Of Veterinary Anatomy*. Philadelphia, Pennsylvania: Saunders Elsevier.
- Erdman, A. G., & Sandor, G. N. (1998). *Diseño de Mecanismos. Análisis y Síntesis*. Ciudad de México: Pearson.
- Fariña, J., Smith, F., & Nestler, B. (2016). *Manual Ilustrado de Cinología*. Buenos Aires: Federación Cinológica Argentina.
- Fischer, M., & Blickhan, R. (2006). The three segmented limbs of therian mammals: kinematics, dynamics and self-stabilization - A Review. *Journal of Experimental Zoology*, 935-950.
- Fleming, A.-M. (2015, August 31). *Dog Quality*. Retrieved December 15, 2019, from dogquality.com/blogs/senior-dog-blog/59698627-prosthetics-improving-mobility-for-dogs-amputee
- Fundación Carlos Slim. (2019). *aprende.org*. Obtenido de https://aprende.org/pages.php?r=.cfcs_course&tagID=11670&load=14918
- García Breijo, E. (2008). *Compilador C CCS y simulador PROTEUS para microcontroladores PIC*. Madrid: Alfaomega .
- García Moreno, E. (2001). *Automatización de Procesos Industriales*. México D.F.: Alfaomega.
- Getty, R. (2005). *Anatomía de los animales domésticos. Tomo I*. Barcelona: Masson.
- Gillette, R. L., & Angle, C. (2012). Canine Locomotion Analysis. *American Veterinary Journey*, 201-20.
- Guerra Torres, C. (2016). *Análisis y síntesis de mecanismos con aplicaciones*. Ciudad de México: Grupo Editorial Patria.
- Guillet. (1973). *Cinemática de las máquinas*. México: C.E.C.S.A. Editores.
- Hall, A., Holowenko, A., & Laughlin, H. (1988). *Diseño de Máquinas*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Hernández, A. (2004). *Cinemática de mecanismos. Análisis y diseño*. Madrid: Editorial Síntesis.
- Hibbeler, R. (2017). *Mecánica de materiales*. Distrito Federal: Pearson.
- Hildebrand, M. (1965). Analysis of the simmetrical gaits of tetrapods. *Folia Biotheoretica*, 6:9-22.
- IBM Corp. (2014). *IBM Docs SPSS Statistics*. Obtenido de <https://www.ibm.com/docs/es/spss-statistics/SaaS?topic=regression-nonlinear>
- Jayes, A., & Alexander, R. (1978). Mechanics of locomotion of dogs(*canis familiaris*) and sheep (*ovis aries*). *Journal of Zoology of London*, 289-308.
- Kalpakistan, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Ciudad de México: Prentice Hall.
- Kern, T. (2014). Veterinary Orthotics & Prosthetics. *Pawsitive Steps Rehabilitation & Therapy for Pets*.
- Kirpensteijn, J., & Van den Bos, R. (2011). Adaptation of dogs to the amputation of a limb and their owners' satisfaction with the procedure. *Veterinary Record*, 115-118.
- König, E. (2001). *Anatomie Der Haussäugetiere*. Stuttgart, Deutschland: Schattauer Verlag.
- Martín Cruz, D. (2020). *Aprender impresión 3D para makers con 100 ejercicios prácticos*. Ciudad de México: Alfaomega Grupo Editor.

- MEMS and Nanotechnology Community. (1999). *MEMSnet.org*. Obtenido de http://www.memsnet.org/mems/what_is.html
- Meza, C., & Tamayo, F. (2015). Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. *El hombre y la máquina*, 72-79.
- mikroe.com. (2021). *Módulos de Comunicación Serie*. Obtenido de <https://www.mikroe.com/ebooks/microcontroladores-pic-programacion-en-c-con-ejemplos/modulos-de-comunicacion-serie>
- Mitofsky. (2014). *México: Las mascotas en nuestros hogares*. México D.F.
- Murray, R., & Granner, D. (2003). *Harper's Illustrated Biochemistry*. New York: McGraw-Hill.
- Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- Padmanabhan, R., Oliveira, M., & Menezes, L. (2011). Lightweight metal alloy tailor welded blanks. *Tailor Welded Blanks for Advanced Manufacturing*, 97-117.
- Palacios, E., Remiro, F., & López, L. (2009). *Microcontrolador PIC16f84. Desarrollo de proyectos*. México D.F.: Alfaomega.
- Ponce Cruz, P. (2011). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Rioja Lo Bianco, E. R. (1975). *Tratado Elemental de Zoología*. México D.F.: E.C.L.A.L.S.A.
- SimiSystems. (21 de Octubre de 2009). *Dog Gait Analysis 2D with Simi Motion*. Obtenido de https://youtu.be/fljOrHHC_pU
- The Closure Library Authors. (2008). *Electronica Analogica_JuanPerez*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/electronicaanalogicajuanperez/teoria-de-semiconductores/3-3-3-convertidor-de-aproximaciones-sucesivas>
- Tojeiro Calaza, G. (2012). *Taller de Arduino. Un enfoque práctico para principiantes*. Madrid: Marcombo.
- Tusharkumar B., J., & Prashant A., S. (2015). Tensile Test and FEA Correlations of ABS Plastic. *Technical Research Organisation India*, 33-37.
- Úbeda Miñarro, B. (2009). *Apuntes de Sistemas Embebidos*. Murcia: Universidad de Murcia .
- Valdés Pérez, F., & Pallás Areny, R. (2007). *Microcontroladores. Fundamentos y Aplicaciones con PIC*. México D.F.: Alfaomega.

Software utilizado

-  Autodesk AutoCAD® 2016
-  Dassault Systèmes SolidWorks® 2017
-  The Mathworks Matlab® 2015a
-  Compilador lenguaje C Dev C++
-  ANSYS Workbench® 2021 R1
-  Altium Designer® 2019
-  CCS® PIC C Compiler
-  MikroElektronika® mikroC for PIC
-  XFuzzy v3.5

ANEXO 1

MATERIALES

Y

COMPONENTES

Aluminum 5182-H19

Categories: [Metal](#); [Nonferrous Metal](#); [Aluminum Alloy](#); [5000 Series Aluminum Alloy](#)


Material Notes: Data points with the AA note have been provided by the Aluminum Association, Inc. and are NOT FOR DESIGN.

Composition Notes:

Composition information provided by the Aluminum Association and is not for design.

Key Words: UNS A95182; Aluminium 5182-H19; AA5182-H19; Al5182-H19

Vendors: No vendors are listed for this material. Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.65 g/cc	0.0957 lb/in ³	AA; Typical
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	112	112	500 kg load with 10 mm ball. Calculated value.
Hardness, Knoop	140	140	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell A	44.8	44.8	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Rockwell B	70	70	Converted from Brinell Hardness Value
Hardness, Vickers	127	127	Converted from Brinell Hardness Value
Tensile Strength, Ultimate	420 MPa	60900 psi	
Tensile Strength, Yield	395 MPa	57300 psi	
Elongation at Break	4.0 % @Thickness 1.60 mm	4.0 % @Thickness 0.0630 in	In 5 cm
Tensile Modulus	69.6 GPa	10100 ksi	
Compressive Modulus	70.9 GPa	10300 ksi	
Poissons Ratio	0.33	0.33	
Shear Modulus	26.0 GPa	3770 ksi	Calculated
Shear Strength	250 MPa	36300 psi	Calculated value.
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	0.00000560 ohm-cm	0.00000560 ohm-cm	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	22.2 µm/m-°C @Temperature -50.0 - 20.0 °C	12.3 µin/in-°F @Temperature -58.0 - 68.0 °F	
	23.9 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.3 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	24.1 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	13.4 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F	
	25.0 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 200 °C	13.9 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 392 °F	
	26.0 µm/m-°C @Temperature 20.0 - 300 °C	14.4 µin/in-°F @Temperature 68.0 - 572 °F	
Specific Heat Capacity	0.904 J/g-°C	0.216 BTU/lb-°F	
Thermal Conductivity	126 W/m-K	874 BTU-in/hr-ft ² -°F	
Melting Point	577 - 638 °C	1070 - 1180 °F	
Solidus	577 °C	1070 °F	
Liquidus	638 °C	1180 °F	
Processing Properties	Metric	English	Comments

Annealing Temperature	343 °C	650 °F
Hot-Working Temperature	260 - 510 °C	500 - 950 °F

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Aluminum, Al	93.2 - 95.8 %	93.2 - 95.8 %	As remainder
Chromium, Cr	<= 0.10 %	<= 0.10 %	
Copper, Cu	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
Iron, Fe	<= 0.35 %	<= 0.35 %	
Magnesium, Mg	4.0 - 5.0 %	4.0 - 5.0 %	
Manganese, Mn	0.20 - 0.50 %	0.20 - 0.50 %	
Other, each	<= 0.05 %	<= 0.05 %	
Other, total	<= 0.15 %	<= 0.15 %	
Silicon, Si	<= 0.20 %	<= 0.20 %	
Titanium, Ti	<= 0.10 %	<= 0.10 %	
Zinc, Zn	<= 0.25 %	<= 0.25 %	

[References](#) for this datasheet.

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.



Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Extruded

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [ABS Polymer](#); [Acrylonitrile Butadiene Styrene \(ABS\)](#), [Extruded](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Extruded". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.01 - 1.20 g/cc	0.0365 - 0.0434 lb/in ³	Average value: 1.07 g/cc Grade Count:187
Water Absorption	0.050 - 1.0 %	0.050 - 1.0 %	Average value: 0.410 % Grade Count:30
Moisture Absorption at Equilibrium	0.00 - 0.30 %	0.00 - 0.30 %	Average value: 0.217 % Grade Count:13
Water Absorption at Saturation	0.30 - 1.03 %	0.30 - 1.03 %	Average value: 0.713 % Grade Count:5
Maximum Moisture Content	0.010 - 0.15	0.010 - 0.15	Average value: 0.0490 Grade Count:20
Linear Mold Shrinkage	0.0020 - 0.0080 cm/cm	0.0020 - 0.0080 in/in	Average value: 0.00552 cm/cm Grade Count:144
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.0030 - 0.0080 cm/cm	0.0030 - 0.0080 in/in	Average value: 0.00575 cm/cm Grade Count:10
Melt Flow	0.10 - 35 g/10 min	0.10 - 35 g/10 min	Average value: 6.18 g/10 min Grade Count:187
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	68 - 118	68 - 118	Average value: 106 Grade Count:114
Ball Indentation Hardness	65.0 - 110 MPa	9430 - 16000 psi	Average value: 93.2 MPa Grade Count:11
Tensile Strength, Ultimate	22.1 - 74.0 MPa	3210 - 10700 psi	Average value: 38.8 MPa Grade Count:55
Tensile Strength, Yield	13.0 - 65.0 MPa	1890 - 9430 psi	Average value: 44.8 MPa Grade Count:168
 Tensile Strength, Yield	22.1 - 59.3 MPa @Temperature -18.0 - 71.0 °C	3210 - 8600 psi @Temperature -0.400 - 160 °F	Average value: 40.7 MPa Grade Count:1
Elongation at Break	3.0 - 150 %	3.0 - 150 %	Average value: 49.1 % Grade Count:135
Elongation at Yield	0.62 - 30 %	0.62 - 30 %	Average value: 5.44 % Grade Count:54
Modulus of Elasticity	1.00 - 2.65 GPa	145 - 384 ksi	Average value: 2.06 GPa Grade Count:64
 Modulus of Elasticity	1.50 - 2.60 GPa @Temperature -18.0 - 71.0 °C	218 - 377 ksi @Temperature -0.400 - 160 °F	Average value: 2.05 GPa Grade Count:1
Flexural Yield	0.379 - 593 MPa	55.0 - 86000 psi	Average value: 73.7 MPa Grade Count:140

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	76.7 - 230 °C	170 - 446 °F	Average value: 159 °C Grade Count:8
Nozzle Temperature	180 - 310 °C	356 - 590 °F	Average value: 273 °C Grade Count:46
Adapter Temperature	200 - 300 °C	392 - 572 °F	Average value: 275 °C Grade Count:42
Die Temperature	200 - 295 °C	392 - 563 °F	Average value: 262 °C Grade Count:45
Melt Temperature	170 - 320 °C	338 - 608 °F	Average value: 261 °C Grade Count:101
Mold Temperature	29.0 - 120 °C	84.2 - 248 °F	Average value: 74.6 °C Grade Count:79
Injection Velocity	240 mm/sec	9.45 in/sec	Average value: 240 mm/sec Grade Count:8
Roll Temperature	47.0 - 150 °C	117 - 302 °F	Average value: 119 °C Grade Count:44
Drying Temperature	70.0 - 120 °C	158 - 248 °F	Average value: 90.7 °C Grade Count:102
Moisture Content	0.010 - 0.050 %	0.010 - 0.050 %	Average value: 0.0210 % Grade Count:40
Dew Point	-29.0 °C	-20.2 °F	Average value: -29.0 °C Grade Count:3
Injection Pressure	4.83 - 150 MPa	700 - 21800 psi	Average value: 35.7 MPa Grade Count:15

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.

Ultimaker PLA Filament

Categories: [Polymer](#); [Rapid Prototyping Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Polylactic Acid \(PLA\) Biopolymer](#)

Material Notes: Description: Ultimaker PLA filament provides a no-hassle 3D printing experience thanks to its reliability and good surface quality. Our PLA is made from organic and renewable sources. It's safe, easy to print with, and it serves a wide range of applications for both novice and advanced users

Key features: Good tensile strength and surface quality, easy to work with at high print speeds, user-friendly for both home and office environments, PLA allows the creation of high-resolution parts. There is a wide range of color options available

Applications: Household tools, toys, educational projects, show objects, prototyping, architectural models, as well as lost casting methods to create metal parts

Non-suitable for: Food contact and in vivo applications. Long term outdoor usage or applications

Information provided by Ultimaker

Vendors:



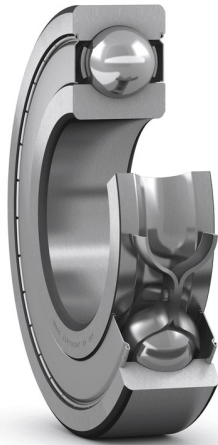
[Solaxis](#) - Geared for world-class manufacturing, Solaxis specializes in high-quality industrial 3D printing service with advanced thermoplastics, for end-use production parts, functional prototypes and specialized tooling. [Contact us here!](#)

[Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.24 g/cc	0.0448 lb/in ³	ASTM D1505
Filament Diameter	2750 - 2950 µm	2750 - 2950 µm	
Melt Flow	6.09 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 210 °C	6.09 g/10 min @Load 4.76 lb, Temperature 410 °F	ISO 1133
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Shore D	83	83	
Tensile Strength at Break	45.6 MPa	6610 psi	50 mm/min; ISO 527
Tensile Strength, Yield	49.5 MPa	7180 psi	50 mm/min; ISO 527
Elongation at Break	5.2 %	5.2 %	50 mm/min; ISO 527
Elongation at Yield	3.3 %	3.3 %	50 mm/min; ISO 527
Tensile Modulus	2.3465 GPa	340.33 ksi	1 mm/min; ISO 527
Flexural Strength	103 MPa	14900 psi	ISO 178
Flexural Modulus	3.15 GPa	457 ksi	ISO 178
Izod Impact, Notched (ISO)	5.10 kJ/m ²	2.43 ft-lb/in ²	ISO 180
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Dielectric Constant	2.7 @Frequency 1.00e+6 Hz	2.7 @Frequency 1.00e+6 Hz	ASTM D150-11
Dissipation Factor	0.0080 @Frequency 1.00e+6 Hz	0.0080 @Frequency 1.00e+6 Hz	ASTM D150-11
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Melting Point	145 - 160 °C	293 - 320 °F	ISO 11357
Glass Transition Temp, Tg	60.0 °C	140 °F	ISO 11357

Some of the values displayed above may have been converted from their original units and/or rounded in order to display the information in a consistent format. Users requiring more precise data for scientific or engineering calculations can click on the property value to see the original value as well as raw conversions to equivalent units. We advise that you only use the original value or one of its raw conversions in your calculations to minimize rounding error. We also ask that you refer to MatWeb's [terms of use](#) regarding this information. [Click here](#) to view all the property values for this datasheet as they were originally entered into MatWeb.



638/5-2Z Rodamientos rígidos de bolas

Rodamientos rígidos de bolas

Datos de los rodamientos

Tolerancias,

Normal (métrica), P6, P5, Normal (en pulgadas),

Juego radial interno,

Pares de rodamientos apareados, Acero inoxidable $d < 10$ mm, Otros rodamientos

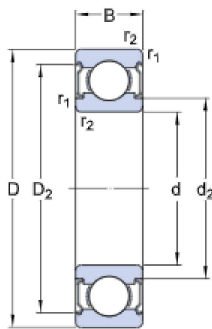
Interfaces del rodamiento

Tolerancias de los asientos

para condiciones estándares,

Tolerancias y ajustes resultantes

Especificación técnica

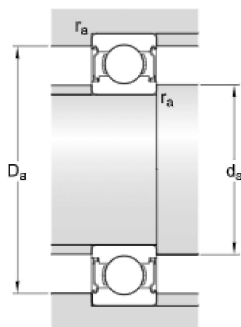


DIMENSIONES

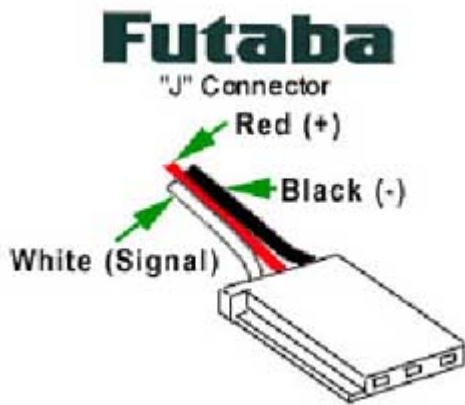
d	5 mm
D	11 mm
B	5 mm
d_2	≈ 6.2 mm
D_2	≈ 9.9 mm
$r_{1,2}$	min. 0.15 mm

DIMENSIONES DE LOS RESALTES

d_a	min. 5.8 mm
d_a	max. 6 mm
D_a	max. 10.2 mm
r_a	max. 0.1 mm



S3003 FUTABA SERVO



...S3003 FUTABA SERVO...

Detailed Specifications

Control System:	+Pulse Width Control 1520usec Neutral	Current Drain (4.8V):	7.2mA/idle
Required Pulse:	3-5 Volt Peak to Peak Square Wave	Current Drain (6.0V):	8mA/idle
Operating Voltage:	4.8-6.0 Volts	Direction:	Counter Clockwise/Pulse Traveling 1520- 1900usec
Operating Temperature Range:	-20 to +60 Degree C	Motor Type:	3 Pole Ferrite
Operating Speed (4.8V):	0.23sec/60 degrees at no load	Potentiometer Drive:	Indirect Drive
Operating Speed (6.0V):	0.19sec/60 degrees at no load	Bearing Type:	Plastic Bearing
Stall Torque (4.8V):	44 oz/in. (3.2kg.cm)	Gear Type:	All Nylon Gears
Stall Torque (6.0V):	56.8 oz/in. (4.1kg.cm)	Connector Wire Length:	12"
Operating Angle:	45 Deg. one side pulse traveling 400usec	Dimensions:	1.6" x 0.8"x 1.4" (41 x 20 x 36mm)
360 Modifiable:	Yes	Weight:	1.3oz. (37.2g)

COMMON SPECIFICATIONS

Radio Chip: CSR BC417
 Memory: External 8Mbit Flash
 Output Power: -4 to +6dbm Class 2
 Sensitivity: -80dbm Typical
 Bit Rate: EDR, up to 3Mbps
 Interface: UART
 Antenna: Built-in
 Dimension: 27W x 13H mm

Voltage: 3.1 to 4.2VDC
 Current: 40mA max

COMMON HARDWARE INTERFACING CONSIDERATIONS

The EGBT-04 module will work with supply voltage of 3.1VDC to 4.2VDC. When supplied with 3.3VDC, it will interface directly with the UART port of any microcontroller chip running at 3.3VDC.

When used with 5V microcontrollers, The TXD output logic swing of the EGBT-04 still falls within the valid 5V TTL range, hence, can be connected directly to the UART RXD of the 5V microcontroller host. EGBT RXD and inputs, however, are not 5V tolerant, and can be damaged by 5V level logic going in. Some level translation circuit must be added to protect the inputs.

A simple diode level translator circuit like the ones shown in Figure 3 and 7 will suffice in most applications. A better alternative is with the use of 5V input tolerant tiny logic chips such as 74LVC1G125 – a single buffer chip housed in smd sot23-5 package.

EGBT-046S PIN CONFIGURATION

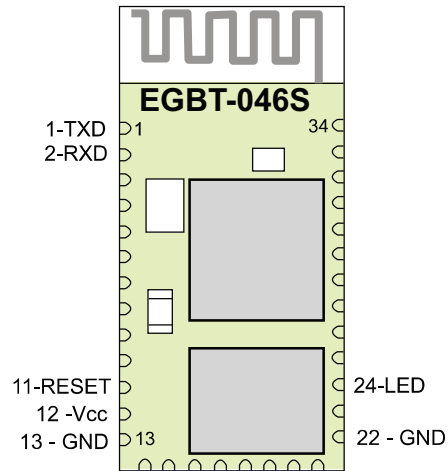


Figure 1. EGBT-046S Pin Layout

Table 1. EGBT-046S Pin Description

PIN	ID	DESCRIPTION
1	TXD	UART TXD Output
2	RXD	UART RXD Input
11	RESET	RESET Input
12	Vcc	+3.1 to 4.2VDC Power Input
13	GND	Common Ground
22	GND	Common Ground
24	LED	LED Status Indicator Flashing - Waiting to Connect/Pair Steady ON - Connected/Paired

Note:
 All unassigned pins must be left unconnected.

±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer

The MMA7361L is a low power, low profile capacitive micromachined accelerometer featuring signal conditioning, a 1-pole low pass filter, temperature compensation, self test, 0g-Detect which detects linear freefall, and g-Select which allows for the selection between 2 sensitivities. Zero-g offset and sensitivity are factory set and require no external devices. The MMA7361L includes a Sleep Mode that makes it ideal for handheld battery powered electronics.

Features

- 3mm x 5mm x 1.0mm LGA-14 Package
- Low Current Consumption: 400 μ A
- Sleep Mode: 3 μ A
- Low Voltage Operation: 2.2 V – 3.6 V
- High Sensitivity (800 mV/g @ 1.5g)
- Selectable Sensitivity (\pm 1.5g, \pm 6g)
- Fast Turn On Time (0.5 ms Enable Response Time)
- Self Test for Freefall Detect Diagnosis
- 0g-Detect for Freefall Protection
- Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Robust Design, High Shocks Survivability
- RoHS Compliant
- Environmentally Preferred Product
- Low Cost

Typical Applications

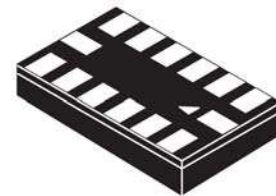
- 3D Gaming: Tilt and Motion Sensing, Event Recorder
- HDD MP3 Player: Freefall Detection
- Laptop PC: Freefall Detection, Anti-Theft
- Cell Phone: Image Stability, Text Scroll, Motion Dialing, E-Compass
- Pedometer: Motion Sensing
- PDA: Text Scroll
- Navigation and Dead Reckoning: E-Compass Tilt Compensation
- Robotics: Motion Sensing

ORDERING INFORMATION				
Part Number	Temperature Range	Package Drawing	Package	Shipping
MMA7361LT	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	Tray
MMA7361LR1	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	7" Tape & Reel
MMA7361LR2	-40 to +85°C	1977-01	LGA-14	13" Tape & Reel

MMA7361L

**MMA7361L: XYZ AXIS
ACCELEROMETER**
 \pm 1.5g, \pm 6g

Bottom View



14 LEAD
LGA
CASE 1977-01

Top View

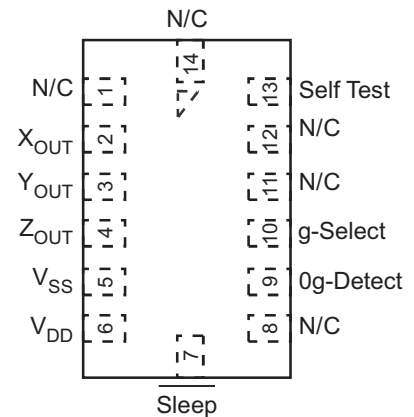


Figure 1. Pin Connections

18/20/28-Pin Enhanced Flash MCUs with nanoWatt Technology

Low-Power Features:

- Power-Managed modes:
 - Primary Run: RC oscillator, 76 μ A, 1 MHz, 2V
 - RC_RUN: 7 μ A, 31.25 kHz, 2V
 - SEC_RUN: 9 μ A, 32 kHz, 2V
 - Sleep: 0.1 μ A, 2V
- Timer1 Oscillator: 1.8 μ A, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.2 μ A, 2V
- Two-Speed Oscillator Start-up

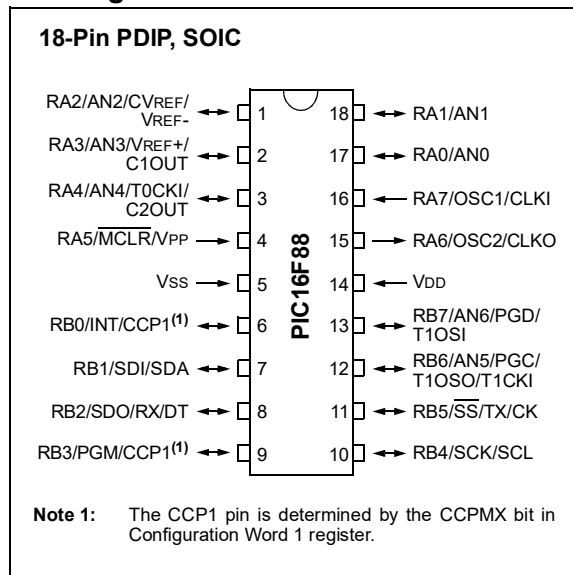
Oscillators:

- Three Crystal modes:
 - LP, XT, HS: up to 20 MHz
- Two External RC modes
- One External Clock mode:
 - ECIO: up to 20 MHz
- Internal oscillator block:
 - 8 user selectable frequencies: 31 kHz, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz, 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz

Peripheral Features:

- Capture, Compare, PWM (CCP) module:
 - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
 - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
 - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit, 7-channel Analog-to-Digital Converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master/Slave) and I²C™ (Slave)
- Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (AUSART/SCI) with 9-bit address detection:
 - RS-232 operation using internal oscillator (no external crystal required)
- Dual Analog Comparator module:
 - Programmable on-chip voltage reference
 - Programmable input multiplexing from device inputs and internal voltage reference
 - Comparator outputs are externally accessible

Pin Diagram



Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycles Enhanced Flash program memory typical
- 1,000,000 typical erase/write cycles EEPROM data memory typical
- EEPROM Data Retention: > 40 years
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Low-Voltage Programming
- In-Circuit Debugging via two pins
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 1 ms to 268s
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V

Device	Program Memory		Data Memory		I/O Pins	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	AUSART	Comparators	SSP	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)							
PIC16F87	7168	4096	368	256	16	N/A	1	Y	2	Y	2/1
PIC16F88	7168	4096	368	256	16	1	1	Y	2	Y	2/1



MICROCHIP

PIC18F2455/2550/4455/4550

28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology

Universal Serial Bus Features:

- USB V2.0 Compliant
- Low Speed (1.5 Mb/s) and Full Speed (12 Mb/s)
- Supports Control, Interrupt, Isochronous and Bulk Transfers
- Supports up to 32 Endpoints (16 bidirectional)
- 1-Kbyte Dual Access RAM for USB
- On-Chip USB Transceiver with On-Chip Voltage Regulator
- Interface for Off-Chip USB Transceiver
- Streaming Parallel Port (SPP) for USB streaming transfers (40/44-pin devices only)

Power-Managed Modes:

- Run: CPU on, peripherals on
- Idle: CPU off, peripherals on
- Sleep: CPU off, peripherals off
- Idle mode currents down to 5.8 μ A typical
- Sleep mode currents down to 0.1 μ A typical
- Timer1 Oscillator: 1.1 μ A typical, 32 kHz, 2V
- Watchdog Timer: 2.1 μ A typical
- Two-Speed Oscillator Start-up

Flexible Oscillator Structure:

- Four Crystal modes, including High Precision PLL for USB
- Two External Clock modes, up to 48 MHz
- Internal Oscillator Block:
 - 8 user-selectable frequencies, from 31 kHz to 8 MHz
 - User-tunable to compensate for frequency drift
- Secondary Oscillator using Timer1 @ 32 kHz
- Dual Oscillator options allow microcontroller and USB module to run at different clock speeds
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown if any clock stops

Peripheral Highlights:

- High-Current Sink/Source: 25 mA/25 mA
- Three External Interrupts
- Four Timer modules (Timer0 to Timer3)
- Up to 2 Capture/Compare/PWM (CCP) modules:
 - Capture is 16-bit, max. resolution 5.2 ns ($T_{CY}/16$)
 - Compare is 16-bit, max. resolution 83.3 ns (T_{CY})
 - PWM output: PWM resolution is 1 to 10-bit
- Enhanced Capture/Compare/PWM (ECCP) module:
 - Multiple output modes
 - Selectable polarity
 - Programmable dead time
 - Auto-shutdown and auto-restart
- Enhanced USART module:
 - LIN bus support
- Master Synchronous Serial Port (MSSP) module supporting 3-wire SPI (all 4 modes) and I²C™ Master and Slave modes
- 10-bit, up to 13-channel Analog-to-Digital Converter module (A/D) with Programmable Acquisition Time
- Dual Analog Comparators with Input Multiplexing

Special Microcontroller Features:

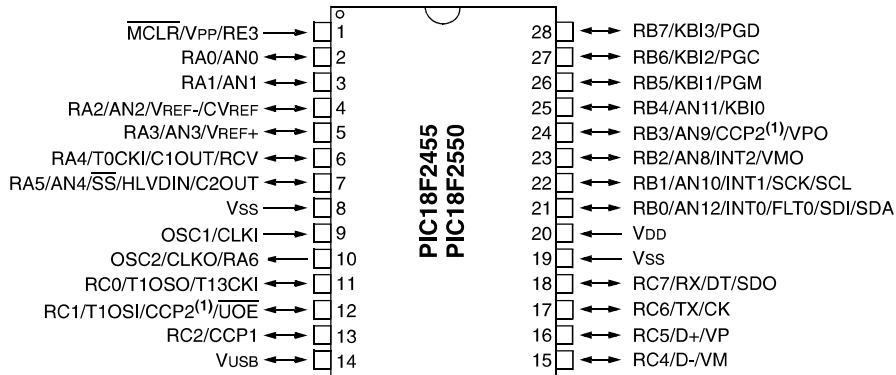
- C Compiler Optimized Architecture with optional Extended Instruction Set
- 100,000 Erase/Write Cycle Enhanced Flash Program Memory typical
- 1,000,000 Erase/Write Cycle Data EEPROM Memory typical
- Flash/Data EEPROM Retention: > 40 years
- Self-Programmable under Software Control
- Priority Levels for Interrupts
- 8 x 8 Single-Cycle Hardware Multiplier
- Extended Watchdog Timer (WDT):
 - Programmable period from 41 ms to 131s
- Programmable Code Protection
- Single-Supply 5V In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins
- Optional dedicated ICD/ICSP port (44-pin devices only)
- Wide Operating Voltage Range (2.0V to 5.5V)

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-Bit A/D (ch)	CCP/ECCP (PWM)	SPP	MSSP		EAUSART	Comparators	Timers 8/16-Bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					SPI	Master I ² C™			
PIC18F2455	24K	12288	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F2550	32K	16384	2048	256	24	10	2/0	No	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4455	24K	12288	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3
PIC18F4550	32K	16384	2048	256	35	13	1/1	Yes	Y	Y	1	2	1/3

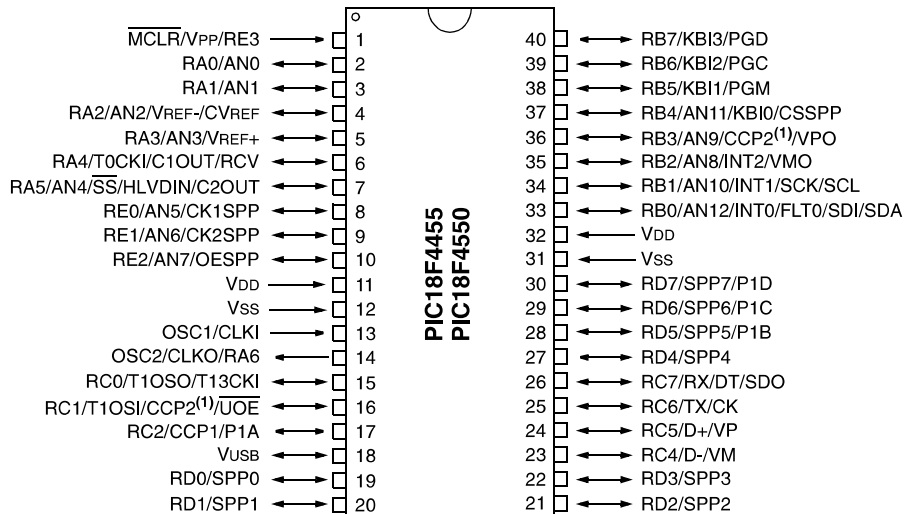
PIC18F2455/2550/4455/4550

Pin Diagrams

28-Pin PDIP, SOIC



40-Pin PDIP



Note 1: RB3 is the alternate pin for CCP2 multiplexing.

ANEXO 2

PROGRAMAS Y CÓDIGOS DE APOYO Y PARA MCU

```

1  /*PROGRAMA PARA CALCULAR MECANISMO DE CUATRO BARRAS POR GENERADOR DE FUNCIONES
2  Programador: Eduardo de Jesús García Velázquez
3  Ing. Mecánica Eléctrica
4  UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán*/
5  #include<stdio.h>
6  #include<conio.h>
7  #include<math.h>
8  //Declaración de funciones y variables
9  void ESCV(double VEC[],int); //Impresión del vector
10 void ESCM(double MAT[3][3],int); //Impresión de la matriz
11 double PuPeX(double,double,int); //Calculo de puntos de precisión en X
12 double PuPeY(double VEC1[],double VEC2[],double,double,int); //Calculo puntos de
    precisión en Y
13 double Escal(double VEC1[],double VEC2[],double VEC3[],double
    VEC4[],double,double,double,double,double,double); //Escalamiento de Freudenstein
14 double MATRIZ(double MAT[3][3],double VEC1[],double VEC2[],int tam1); //Calculo de la
    matriz de ecuaciones de Freudenstein
15 double EQ(double VECR[],double VEC1[],double VEC2[],int);
16 /*PROGRAMA PRINCIPAL*/
17 void main(void)
18 {
19     int i,tam1=3,tam2=5; //Tamaño de los vectores
20     double valor,min,max,deltax,deltay,Re,Rs,Pe,Ps; //Limites de cálculo de la función
21     double PPX[tam1],PPY[tam2]; //Vectores para puntos de precisión
22     double ESX[tam1],ESY[tam1]; //Escalamiento de Freudenstein
23     double Freud[3][3]; //Sistema de ecuaciones de Freudenstein
24     double Equival[tam1]; //Equivalente para el sistema de ecuaciones
25     printf("PROGRAMA PARA CALCULAR MECANISMO DE CUATRO BARRAS POR\n");
26     printf("GENERADOR DE FUNCION: f(x)=139.4x^5-857.5x^4+1784x^3-1402x^2+307.6x+104.4");
27     printf("\n\nDar el limite menor de la funcion: ");
28     scanf("%lf",&min);
29     printf("\nDar el limite mayor de la funcion: ");
30     scanf("%lf",&max);
31     int contador=1;
32     for(i=0;i<3;i++)
33     {
34         valor=PuPeX(min,max,contador); //Función para calcular el punto de precisión en X
35         PPX[i]=valor;
36         contador=contador+1;
37     }
38
39     printf("\n=====
    =====\n");
40     printf("\nLos valores de puntos de precision en X son: ");
41     ESCV(PPX,tam1); //Función para impresión del vector
42     PuPeY(PPX,PPY,max,min,tam1); //Función para calcular puntos de precisión en Y
43     printf("\nLos valores de puntos de precision en Y son: ");
44     ESCV(PPY,tam2);
45
46     printf("\n\n=====
    =====\n");
47     printf("\nA continuacion se presentan los factores de escala de Chebyshev\n");
48     printf("\nDe la variacion en las entradas Dx (grados): ");
49     scanf("%lf",&deltax);
50     printf("\nDe la variacion en las salidas Dy (grados): ");
51     scanf("%lf",&deltay);
52     Re=deltax/(max-min);
53     Rs=deltay/(PPY[4]-PPY[0]);
54     printf("\n\nEl factor de escala para las entradas es: %3.3lf",Re);
55     printf("\nEl factor de escala para las salidas es: %3.3lf\n",Rs);
56
57     printf("\n=====
    =====\n");
58     printf("\nIngresar el valor inicial del mecanismo a la entrada: ");
59     scanf("%lf",&Pe);
60     printf("\nIngresar el valor inicial del mecanismo a la salida: ");
61     scanf("%lf",&Ps);
62     //Para los valores menores en ambos escalamientos
63     double menor=PPY[0]; //Valor menor de los puntos de precisión de Y

```

```

61 Escal(ESX,ESY,PPX,PPY,Pe,Ps,Re,Rs,min,menor);
62 printf("\nLos angulos para 3 puntos de precision en la entrada son:");
63 ESCV(ESX,tam1);
64 printf("\nLos angulos para 3 puntos de precision en la salida son:");
65 ESCV(ESY,tam1);
66 //Se va a llenar la matriz para el sistema de ecuaciones de Freudenstein
67
printf("\n=====
=====
\n");
68 printf("\n\nMATRIZ DEL SISTEMA DE ECUACIONES DE FREUDENSTEIN");
69 MATRIZ(Freud,ESX,ESY,tam1);
70 printf("\nLa matriz del sistema queda de la siguiente manera: \n");
71 ESCM(Freud,tam1);
72 printf("\nLos equivalentes para el sistema de ecuaciones es: \n");
73 EQ(Equival,ESX,ESY,tam1);
74 ESCV(Equival,tam1);
75 getch();
76 }
77 /*FUNCIÓN PARA CÁLCULO DE PUNTOS DE PRECISIÓN EN X*/
78 double PuPeX(double men,double may,int T)
79 {
80     double val,a,b;
81     a=cos((M_PI*((2*T)-1))/6);
82     b=((0.5)*(may-men)*a);
83     val=((0.5)*(may+men))-b;
84     return val;
85 }
86 /*FUNCIÓN PARA IMPRESIÓN DEL VECTOR DE LOS VALORES DE PRECISIÓN X*/
87 void ESCV(double VEC[],int T)
88 {
89     int i;
90     for(i=0;i<T;i++)
91     {
92         printf("\t%4.3lf",VEC[i]);
93     }
94 }
95 /*FUNCIÓN PARA IMPRESIÓN DE LA MATRIZ DE FREUDENSTEIN*/
96 void ESCM(double MAT[3][3],int T)
97 {
98     int i,j;
99     for(i=0;i<T;i++)
100     {
101         for(j=0;j<T;j++)
102         {
103             printf("\t%3.3lf * K%d",MAT[i][j],j+1);
104         }
105         printf("\n");
106     }
107 }
108 /*FUNCIÓN PARA CÁLCULO DE PUNTOS DE PRECISIÓN EN Y*/
109 double PuPeY(double VEC1[],double VEC2[],double may,double men,int T)
110 {
111     int i;
112     double val;
113     //Para el punto Y0, no encontrado dentro del primer vector
114
115     val=(139.4*pow(men,5))-(857.5*pow(men,4))+(1784*pow(men,3))-(1402*pow(men,2))+(307.6*
116     men)+(104.4);
117     VEC2[0]=val;
118     //Se calcula esto para los valores 1-3
119     for(i=0;i<3;i++)
120     {
121         val=(139.4*pow(VEC1[i],5))-(857.5*pow(VEC1[i],4))+(1784*pow(VEC1[i],3))-(1402*pow
122         (VEC1[i],2))+(307.6*VEC1[i])+(104.4);
123         VEC2[i+1]=val;
124     }
125     //Para el punto Y4, no encontrado dentro del primer vector

```

```

124     val=(139.4*pow(may,5))-(857.5*pow(may,4))+(1784*pow(may,3))-(1402*pow(may,2))+(307.6*
125     may)+(104.4);
126     VEC2[4]=val;
127 }
128 /*FUNCIÓN DE ESCALAMIENTO DE FREUDENSTEIN PARA GENERAR MATRIZ DE OPERACIÓN*/
129 double Escal(double VEC1[],double VEC2[],double VEC3[],double VEC4[],double PE,double
130 PS,double DX,double DY,double MX,double MY)
131 {
132     int i;
133     //Para las entradas a partir del punto mínimo del mecanismo propuesto para la
134     entrada
135     for(i=0;i<3;i++)
136     {
137         VEC1[i]=DX*(VEC3[i]-MX)+PE;
138     }
139     //Para las salidas a partir del punto mínimo del mecanismo propuesto para la salida
140     for(i=0;i<3;i++)
141     {
142         VEC2[i]=DY*(VEC4[i+1]-MY)+PS;
143     }
144 }
145 /*FUNCIÓN PARA SISTEMA DE ECUACIONES DE FREUDENSTEIN*/
146 double MATRIZ(double MAT[3][3],double VEC1[],double VEC2[],int T)
147 {
148     //Se realiza de manera manual la matriz
149     MAT[0][0]=1;
150     MAT[1][0]=1;
151     MAT[2][0]=1;
152     MAT[0][1]=(-1)*cos(((VEC1[0])*M_PI)/180);
153     MAT[1][1]=(-1)*cos(((VEC1[1])*M_PI)/180);
154     MAT[2][1]=(-1)*cos(((VEC1[2])*M_PI)/180);
155     MAT[0][2]=cos(((VEC2[0])*M_PI)/180);
156     MAT[1][2]=cos(((VEC2[1])*M_PI)/180);
157     MAT[2][2]=cos(((VEC2[2])*M_PI)/180);
158 }
159 /*FUNCIÓN DE EQUIVALENTE PARA EL SISTEMA DE ECUACIONES*/
160 double EQ(double VECR[],double VEC1[],double VEC2[],int T)
161 {
162     int i;
163     for(i=0;i<T;i++)
164     {
165         VECR[i]=(-1)*(cos(((VEC1[i]-VEC2[i])*M_PI)/180));
166     }
167 }

```



```

1 %%PROGRAMA PARA GENERAR UN GRÁFICO DE TRAYECTORIA PARA MECANISMO DE CUATRO BARRAS
2 %%Programador: Eduardo de Jesús García Velázquez
3 %%Ing. Mecánica Eléctrica
4 %%UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán
5 clc,clear all,close all
6 fprintf('PROGRAMA GRAFICADOR DE TRAYECTORIA DE MECANISMO DE 4 BARRAS\n');
7 fprintf('\n*****\n');
8 fprintf('\nDATOS DEL MECANISMO SINTETIZADO\n');
9 l1=input('Ingrese el valor de l1: ');
10 l2=input('Ingrese el valor de l2: ');
11 l3=input('Ingrese el valor de l3: ');
12 l4=input('Ingrese el valor de l4: ');
13 e=input('Ingrese el valor del lado A-P de la biela: ');
14 alpha=input('Ingrese el valor del ángulo entre l3 y A-P: ');
15 angbil=alpha*(pi/180);
16 fprintf('\n*****\n');
17 fprintf('\nVALORES DE SALIDA DEL MECANISMO');
18 %%Aquí entran los grados de todo el mecanismo
19 XT=[0:1:360];
20 X=XT*(pi/180); %%Se convierten en radianes para el cálculo de cos/sen
21 %%Inicia el cálculo para las constantes de Freudenstein
22 A=(2*l2*(l4*cos(X)))-(2*l1*l4);
23 B=(2*l2*(l4*sin(X)));
24 C=(l1^2)+(l2^2)+(l4^2)-(l3^2)-(2*l1*(l2*cos(X)));
25 %%Convertir las literales a radianes
26 a=A.*(pi/180);
27 b=B.*(pi/180);
28 c=C.*(pi/180);
29 val1=(atan(b./a)).*(180/pi);
30 val2=(acos(c./sqrt((a.^2)+(b.^2)))).*(180/pi);
31 ang=(val1-val2)+180;
32 ang=real(ang);
33 a2=input('\nIngrese el ángulo de entrada del mecanismo: ');
34 fprintf('El valor del ángulo de salida es: ');
35 ang4=ang(a2+1)
36 %%Para el ángulo theta3 de la biela
37 a1=input('\nIngrese el ángulo entre O2 y O4: ');
38 angl=a1*(pi/180);
39 %%ang son los ángulos de salida totales, X todos los de entrada posibles
40 %%Se necesita calcular theta3
41 val1=(l1*cos(angl))+(l4*cos((ang*(pi/180))))-(2.*cos(X));
42 val2=(l1*sin(angl))+(l4*sin((ang*(pi/180))))-(2.*sin(X));
43 res=atan(val2./val1);
44 ang3=res.*(180/pi);
45 fprintf('\nPara el valor de entrada indicado, el valor del ángulo de biela es: ');
46 a3=ang3(a2+1)
47 fprintf('*****\n');
48 fprintf('\n\nA continuación aparecerá la gráfica de la trayectorial del mecanismo\n');
49 Xp=(l2*cos(X))+(e*cos(res+angbil));
50 Yp=(l2*sin(X))+(e*sin(res+angbil));
51 %%Para graficar la trayectoria
52 subplot(2,1,1);
53 plot(Xp,Yp,'r','LineWidth',2);
54 axis([-300 200 -300 100]);
55 title('GRÁFICA DE TRAYECTORIA DEL MECANISMO DE CUATRO BARRAS');
56 xlabel('Posicion en X');
57 ylabel('Posición en Y');
58 grid on
59

```

```

1 %%PROGRAMA PARA ANÁLISIS COMPLETO DE MECANISMO DE CUATRO BARRAS R
2 %%Programador: Eduardo de Jesús García Velázquez
3 %%Ing. Mecánica Eléctrica
4 %%UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán
5 clc,clear all,close all
6 fprintf('PROGRAMA PARA ANÁLISIS CINEMÁTICO DE MECANISMOS 4BARRAS');
7 fprintf('\n*****');
8 fprintf('\n\nINGRESO DE LOS DATOS DEL MECANISMO');
9 l1=input('\nIngresar el valor entre bancadas l1: ');
10 l2=input('Ingresar el valor de eslabon l2: ');
11 l3=input('Ingresar el valor de eslabon l3: ');
12 l4=input('Ingresar el valor de eslabon l4: ');
13 e=input('Ingresar el valor de la longitud Ae de biela: ');
14 alpha=input('Ingresar el valor del angulo entre biela y e: ');
15 a1=input('Ingresar el valor del ángulo entre O2 y O4: ');
16 fprintf('*****');
17 fprintf('\nVALORES CINEMÁTICOS INICIALES PARA EL ANÁLISIS');
18 a2=input('\nIngrese el ángulo de inicio: ');
19 w2=input('Ingrese la velocidad angular de inicio: ');
20 aa2=input('Ingrese la aceleración angular de inicio: ');
21 fprintf('*****');
22 %%
23 %%ANÁLISIS DE POSICIÓN
24 fprintf('\nANÁLISIS DE POSICIÓN PARA UNA ENTRADA DADA\n');
25 X=[1:1:360]; %%Todos los angulos posibles
26 format bank
27 A=(2*l2*l4*cosd(X))-(2*l1*l4);
28 B=2*l2*l4*sind(X);
29 C=((l1^2)+(l2^2)+(l4^2))-((l3^2))-(2*l1*l2*cosd(X));
30 val1=sqrt((A.^2)+(B.^2));
31 val2=acosd(C./val1);
32 val1=(atand(B./A));
33 a4=180+(val1-val2);
34 fprintf('\nEl valor del ángulo de salida a4 es: ');
35 a4(a2) %%Se muestra la salida
36 val1=(l1*sind(a1))+(l4*sind(a4))-(l2*sind(X));
37 val2=(l1*cosd(a1))+(l4*cosd(a4))-(l2*cosd(X));
38 a3=360-(atand(val1./val2));
39 fprintf('\nEl valor del ángulo de la biela contra la horizontal es: ');
40 a3(a2)
41 %%
42 %%ANÁLISIS DE VELOCIDAD
43 fprintf('*****\n');
44 fprintf('ANÁLISIS DE VELOCIDAD PARA LA ENTRADA DESIGNADA\n');
45 val1=sind(a4-a2);
46 val2=sind(a3-a4);
47 w3=((l2*w2)/l3)*(val1./val2); %%Velocidad angular 3
48 fprintf('La velocidad angular para la biela es:');
49 w3(a2)
50 val1=sind(a2-a3);
51 val2=sind(a4-a3);
52 w4=((l2*w2)/l4)*(val1./val2); %%Velocidad angular 4
53 fprintf('La velocidad angular para el seguidor es:');
54 w4(a2)
55 val1=l2*w2*(sind(X));
56 val2=e.*(w3).*(sind(a3-alpha));
57 Vpx=(-1)*(val1+val2);
58 val1=l2*w2*(cosd(X));
59 val2=e.*(w3).*(cosd(a3-alpha));
60 Vpy=val1+val2;
61 Vp=sqrt((Vpx.^2)+(Vpy.^2)); %%Resultante de Vp
62 dVp=atand(Vpy./Vpx); %%Dirección de Vp
63 fprintf('\nEl valor de la velocidad en P es:');
64 Vp(a2)
65 fprintf('\nLa dirección de la velocidad en P es:');
66 dVp(a2)
67 %%
68 %%ANÁLISIS DE ACELERACIÓN
69 fprintf('*****\n');

```

```

70 fprintf('ANÁLISIS DE ACELERACIÓN PARA LA ENTRADA DESIGNADA\n');
71 val1=(-1)*(12*aa2*(sind(a4-X)))+(12*(w2^2)*(cosd(a4-X)))+(13*(w3.^2).*(cosd(a4-a3))-(1
4*(w4.^2));
72 val2=(13.*(sind(a4-a3)));
73 aa3=val1./val2;
74 fprintf('La aceleración angular de la biela es:');
75 aa3(a2)
76 val1=(-1)*((12*aa2*(sind(X)))+(12*(w2^2).*(cosd(X))));
77 val2=(-1)*((e*aa3.*(sind(a3-alpha)))+(e*(w3.^2).*(cosd(X))));
78 apx=val1+val2;
79 val1=(12*aa2*(sind(a4-X)))-(12*(w2^2).*(cosd(X)));
80 val2=(e*aa3.*(sind(a3-alpha)))-(e*(w3.^2).*(cosd(X)));
81 apy=val1+val2;
82 Ap=sqrt((apx.^2)+(apy.^2)); %%Resultante de Ap
83 dAp=atand(apy./apx); %%Dirección de Vp
84 fprintf('\nEl valor de la aceleración en P es:');
85 Ap(a2)
86 fprintf('\nLa dirección de la aceleración en P es:');
87 dAp(a2)
88 %%
89 %%GRÁFICA DE ANÁLISIS
90 subplot(3,1,1)
91 plot(X,a4,'b','linewidth',2);
92 title('ANÁLISIS DE POSICIÓN PARA EL PUNTO B');
93 xlabel('Entrada theta2 (°)');
94 ylabel('Salida de biela theta4 (°)');
95 grid on
96 subplot(3,1,2)
97 tiempo=linspace(0,2.4,360);
98 plot(tiempo,Vp,'b','linewidth',2);
99 title('ANÁLISIS DE VELOCIDAD PARA EL PUNTO B');
100 xlabel('Tiempo (seg)');
101 ylabel('Velocidad (mm/seg)');
102 grid on
103 subplot(3,1,3)
104 plot(tiempo,Ap,'b','linewidth',2);
105 title('ANÁLISIS DE ACELERACIÓN PARA EL PUNTO B');
106 xlabel('Tiempo (seg)');
107 ylabel('Aceleración (mm/seg^2)');
108 grid on
109
110

```

```
1  /*PROGRAMA DE OBTENICIÓN DE DATOS DEL ACELERÓMETRO ANALÓGICO
2  Programador: Eduardo de Jesús García Velázquez
3  Ing. Mecánica Eléctrica
4  UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán*/
5
6  //Variables y entradas
7  int AcelPin=A0; //Pin del Roll del Acelerómetro
8  int ValInic=0; //Valor inicial
9  int Valor; //Variable de lectura
10
11 void setup()
12 {
13   pinMode(AcelPin,INPUT); //Roll en A0
14   Serial.begin(9600); //Comunicación serial 9600 baudios
15   Serial.print("Inicio de Programa - Valores 'roll' del acelerometro");
16 }
17
18 void loop()
19 {
20   Valor=analogRead(AcelPin); //Lectura del sensor
21   Serial.print("El valor es = ");
22   Serial.println(Valor);
23   delay(1500); //Tiempo de operación del programa
24 }
25
```

```

1  /* PROGRAMA PARA EL PRIMER SISTEMA EMBEBIDO (INSTRUMENTO)
2  Programador: Eduardo de Jesús García Velázquez
3  Ing. Mecánica Eléctrica
4  UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán*/
5
6  //Directivas de hardware
7  #include<16f88.h>          //Directiva del microcontrolador
8  #device adc=10            //Directiva del convertidor AN_DIG a 10 bits
9  #fuses XT,NOWDT,NOPROTECT //Fusibles (Cristal externo, sin watchdog, sin protec
10 #use delay(clock=4M)      //Frecuencia del cristal externo
11 #use rs232(baud=9600,xmit=pin_b5,rcv=pin_b2) //Transmisión UART a 9600 baudios
12
13 //Definición de funciones
14 float Angulos(int); //Transformación de ADC a ángulo
15
16 //Definición de variables
17 int16 dato;
18 float angle;
19
20 //Programa principal
21 void main(void)
22 {
23     setup_adc_ports(all_analog); //Se mandan todo el puerto A a analógico
24     setup_adc(adc_clock_internal); //Reloj interno del convertidor
25     while(TRUE)
26     {
27         set_adc_channel(0); //Se toma el canal 0 para recibir datos
28         delay_ms(1); //Tiempo de adquisición
29         dato=read_adc(); //Lectura del dato en ADC
30         angle=Angulos(dato); //Llamada a la función de ángulos
31         putc(angle); //Envia dato al esclavo
32         delay_ms(500); //Tiempo de retraso antes de continuar
33     }
34 }
35
36 //Función de la función característica
37 float Angulos(int valor)
38 {
39     const float a1=0.5642; //Valores de la función característica
40     const float a2=180.1;
41     float ang;
42     ang=((a1*valor)+a2)-27; //Función característica lineal y ajuste
43     return ang; //Regresa el valor del ángulo
44 }
45
46
47

```

```

1  /*PROGRAMA PARA EL SEGUNDO SISTEMA EMBEBIDO (ACTUADOR)
2  Programador: Eduardo de Jesús García Velázquez
3  Ing. Mecánica Eléctrica
4  UNAM Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán*/
5  //PROGRAMA EN mikroC Compiler
6  //PIC 18F2550
7  //Cristal 4MHz
8
9  //Definición de funciones
10 float Angle(float); //Conversión de ángulos en pulso
11 float ControlDifusolInferenceEngine(float, float*); //Controlador Difuso
12 void PWM_Servo(float); //Pulso para tren PWM
13 //Definición de variables
14 char comp; //Datos leídos desde comunicación y comprobación de comunicación
15 char Texto[20];
16 float vange,vangs=0,pulso; //Valor de ángulos convertidos
17 //Programa Principal
18 void main(void)
19 {
20     TRISB.F7=0; //Puerto B7 como salida
21     TRISB.F6=0; //Puerto B6 como salida
22     UART1_Init(9600); //Inicia la comunicación BTHC05
23     while(1)
24     {
25         comp=UART_Data_Ready(); //Registra si está recibiendo datos
26         if(comp==1)
27         {
28             PORTB.F7=1; //Enciende LED OK
29             PORTB.F6=0; //Apaga LED NO OK
30             Texto[20]=UART1_Read(); //Registra el dato recibido en datos
31             vange=StrToFloat(Texto); //Conversión del dato de texto a flotante
32             ControlDifusolInferenceEngine(vange,&vangs); //Llamada a Controlador Difuso
33             pulso=Angle(vangs); //LLamada a la función
34             PWM_Servo(pulso); //Generador de tren de pulsos PWM
35         }
36         else
37         {
38             PORTB.F7=0; //Apaga LED de OK
39             PORTB.F6=1; //Enciende LED de NO OK
40         }
41     }
42 }
43 //Función de conversión ángulo-pulso
44 float Angle(float vang)
45 {
46     float a0=0.0123;
47     float a1=14.44;
48     float a2=300.0;
49     float pulse;
50     pulse=pow(a0,2)+a1+a2;
51     return pulse;
52 }
53 //Función de tren de pulsos PWM
54 void PWM_Servo(float pulso)
55 {
56     unsigned int n;
57     int ancho=pulso; //Como valor entero pulso
58     PORTB.F2=1; //Alto en Pin 23
59     delay_ms(1);
60     for(n=0;n<ancho;n++)
61     {
62         delay_ms(1); //Se hace el tren cada 1ms
63     }
64     PORTB.F2=0; //Bajo en Pin 23
65     delay_ms(20); //El resto del tren de pulsos
66 }
67 }

```

```

1  /*+++++++*/
2  /*                                           */
3  /* File:  ControlDifusol.c                 */
4  /*                                           */
5  /* Author: Automatically generated by Xfuzzy */
6  /*                                           */
7  /*+++++++*/
8
9  #include <stdio.h>
10 #include <math.h>
11 #include "ControlDifusol.h"
12
13 /*=====*/
14 /* Common function to compute a fuzzy number */
15 /*=====*/
16
17 static double compute(FuzzyNumber fn,double x) {
18     int length = fn.length;
19     int i;
20     double imp = fn.imp(fn.degree[0],fn.conc[0].equal(x));
21     double mu = imp;
22
23     for(i=1; i<length; i++)
24     {
25         imp = fn.imp(fn.degree[i],fn.conc[i].equal(x));
26         mu = fn.also(mu,imp);
27     }
28     return mu;
29 }
30
31 /*=====*/
32 /* MembershipFunction MF_xfl_trapezoid      */
33 /*=====*/
34
35 /*-----*/
36 /* Function to compute an equal relationship */
37 /*-----*/
38
39 static double MF_xfl_trapezoid_equal(double x, double min, double max, double step,
40 double a, double b, double c, double d) {
41     return (x<a || x>d? 0: (x<b? (x-a)/(b-a) : (x<c?1 : (d-x)/(d-c))));
42 }
43
44 /*=====*/
45 /* MembershipFunction MF_xfl_triangle      */
46 /*=====*/
47
48 /*-----*/
49 /* Function to compute an equal relationship */
50 /*-----*/
51
52 static double MF_xfl_triangle_equal(double x, double min, double max, double step,
53 double a, double b, double c) {
54     return (a<x && x<=b? (x-a)/(b-a) : (b<x && x<c? (c-x)/(c-b) : 0));
55 }
56
57 /*=====*/
58 /* Operatorset OP_Operaciones              */
59 /*=====*/
60
61 /*-----*/
62 /* Description of the defuzzification method */
63 /*-----*/
64
65 static double OP_Operaciones_Defuz(FuzzyNumber mf) {
66     double min = mf.min;
67     double max = mf.max;

```

```

68     double step = mf.step;
69     double x, m, num=0, denom=0;
70     for(x=min; x<=max; x+=step) {
71         m = compute(mf,x);
72         num += x*m;
73         denom += m;
74     }
75     if(denom==0) return (min+max)/2;
76     return num/denom;
77
78 }
79
80
81 /*=====*/
82 /* Operatorset OP__default_ */
83 /*=====*/
84
85 /*-----*/
86 /* Description of the operator ALSO */
87 /*-----*/
88
89 static double OP__default__Also(double a, double b) {
90     return (a>b? a : b);
91 }
92
93
94 /*-----*/
95 /* Description of the operator IMPLICATION */
96 /*-----*/
97
98 static double OP__default__Imp(double a, double b) {
99     return (a<b? a : b);
100 }
101
102
103 /*-----*/
104 /* Description of the defuzzification method */
105 /*-----*/
106
107 static double OP__default__Defuz(FuzzyNumber mf) {
108     double min = mf.min;
109     double max = mf.max;
110     double step = mf.step;
111     double x, m, num=0, denom=0;
112     for(x=min; x<=max; x+=step) {
113         m = compute(mf,x);
114         num += x*m;
115         denom += m;
116     }
117     if(denom==0) return (min+max)/2;
118     return num/denom;
119 }
120
121
122
123 /*=====*/
124 /* TypeLV TP_InAng */
125 /*=====*/
126
127 /*-----*/
128 /* Description of the label Agudo */
129 /*-----*/
130
131 static double TP_InAng_Agudo_equal(double x){
132     return
133         MF_xfl_trapezoid_equal(x,-90.0,90.0,0.7058823529411765,-120.0,-90.0,-75.0,-40.0);
134 }
135
136 /*-----*/

```



```

136  /* Description of the label MedioAgudo          */
137  /*-----*/
138
139  static double TP_InAng_MedioAgudo_equal(double x){
140      return MF_xfl_triangle_equal(x,-90.0,90.0,0.7058823529411765,-60.0,-30.0,0.0);
141  }
142
143  /*-----*/
144  /* Description of the label Recto                */
145  /*-----*/
146
147  static double TP_InAng_Recto_equal(double x){
148      return MF_xfl_triangle_equal(x,-90.0,90.0,0.7058823529411765,-25.0,0.0,25.0);
149  }
150
151  /*-----*/
152  /* Description of the label MedioObtuso          */
153  /*-----*/
154
155  static double TP_InAng_MedioObtuso_equal(double x){
156      return MF_xfl_triangle_equal(x,-90.0,90.0,0.7058823529411765,0.0,30.0,60.0);
157  }
158
159  /*-----*/
160  /* Description of the label Obtuso               */
161  /*-----*/
162
163  static double TP_InAng_Obtuso_equal(double x){
164      return MF_xfl_trapezoid_equal(x,-90.0,90.0,0.7058823529411765,40.0,75.0,90.0,120.0);
165  }
166
167  /*=====*/
168  /*  TypeLV TP_OutAng                            */
169  /*=====*/
170
171  /*-----*/
172  /* Description of the label Agudo                */
173  /*-----*/
174
175  static double TP_OutAng_Agudo_equal(double x){
176      return MF_xfl_trapezoid_equal(x,0.0,180.0,0.7058823529411765,-30.0,0.0,15.0,50.0);
177  }
178
179  /*-----*/
180  /* Description of the label MedioAgudo          */
181  /*-----*/
182
183  static double TP_OutAng_MedioAgudo_equal(double x){
184      return MF_xfl_triangle_equal(x,0.0,180.0,0.7058823529411765,30.0,60.0,90.0);
185  }
186
187  /*-----*/
188  /* Description of the label Recto                */
189  /*-----*/
190
191  static double TP_OutAng_Recto_equal(double x){
192      return MF_xfl_triangle_equal(x,0.0,180.0,0.7058823529411765,65.0,90.0,115.0);
193  }
194
195  /*-----*/
196  /* Description of the label MedioObtuso          */
197  /*-----*/
198
199  static double TP_OutAng_MedioObtuso_equal(double x){
200      return MF_xfl_triangle_equal(x,0.0,180.0,0.7058823529411765,90.0,120.0,150.0);
201  }
202
203  /*-----*/
204  /* Description of the label Obtuso               */

```

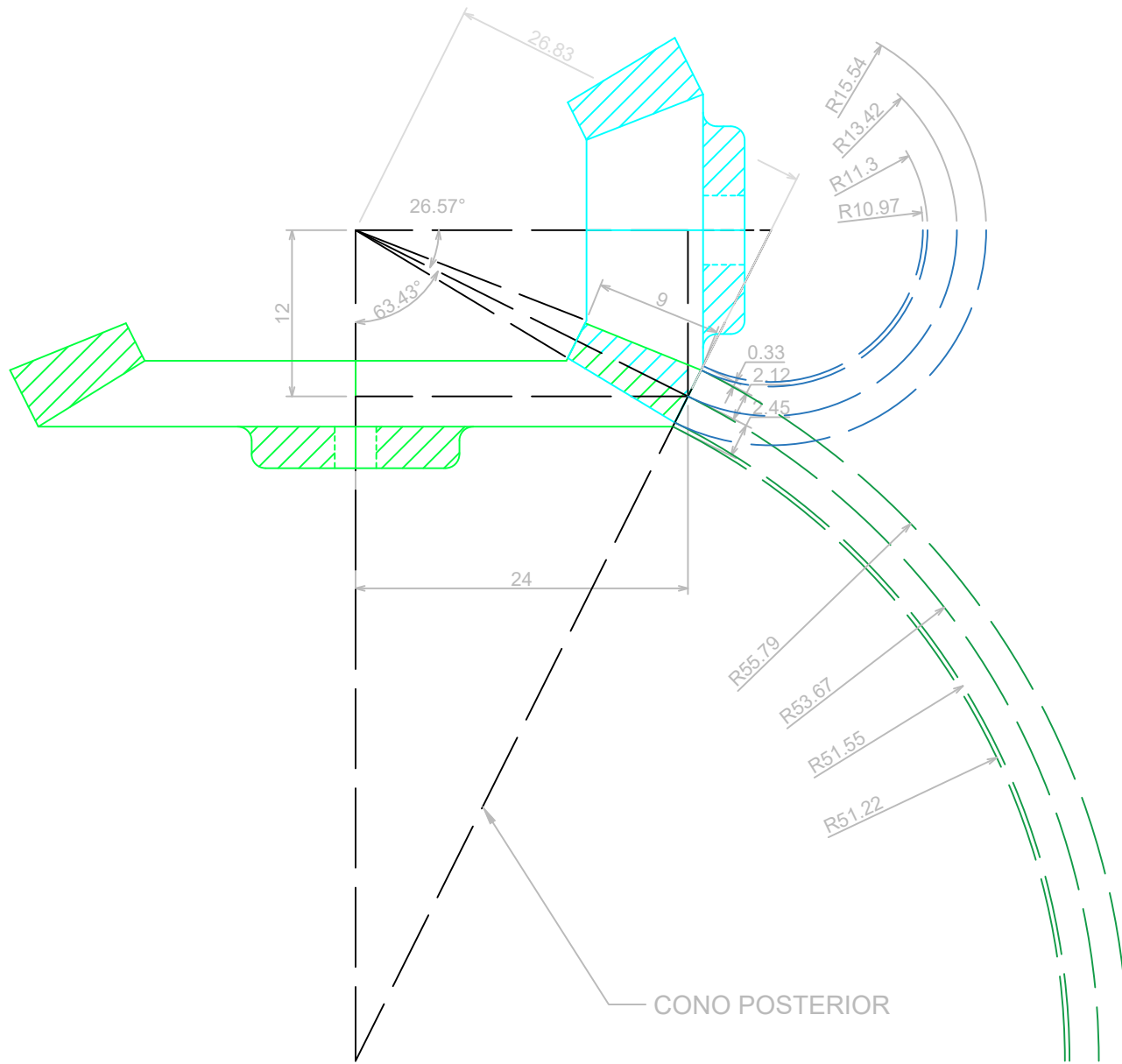
```

205  /*-----*/
206
207  static double TP_OutAng_Obtuso_equal(double x){
208      return MF_xfl_trapezoid_equal(x,0.0,180.0,0.7058823529411765,130.0,165.0,180.0,210.0);
209  }
210
211  /*=====*/
212  /* Rulebase RL_Reglas */
213  /*=====*/
214
215  static void RL_Reglas(double EntAng, double *SalAng) {
216      double _rl;
217      int _SalAng_i = 0;
218      double _EntAng_eq[5];
219      double _SalAng_degree[5];
220      Consequent _SalAng_conc[5];
221      FuzzyNumber _SalAng;
222      _SalAng.min = 0.0;
223      _SalAng.max = 180.0;
224      _SalAng.step = 0.7058823529411765;
225      _SalAng.imp = OP__default__Imp;
226      _SalAng.also = OP__default__Also;
227      _SalAng.length = 5;
228      _SalAng.degree = _SalAng_degree;
229      _SalAng.conc = _SalAng_conc;
230
231      _EntAng_eq[0] = TP_InAng_Agudo_equal(EntAng);
232      _EntAng_eq[1] = TP_InAng_MedioAgudo_equal(EntAng);
233      _EntAng_eq[2] = TP_InAng_Recto_equal(EntAng);
234      _EntAng_eq[3] = TP_InAng_MedioObtuso_equal(EntAng);
235      _EntAng_eq[4] = TP_InAng_Obtuso_equal(EntAng);
236
237      _rl = _EntAng_eq[0];
238      _SalAng_degree[_SalAng_i] = _rl;
239      _SalAng_conc[_SalAng_i].equal = TP_OutAng_Obtuso_equal;
240      _SalAng_i++;
241
242      _rl = _EntAng_eq[1];
243      _SalAng_degree[_SalAng_i] = _rl;
244      _SalAng_conc[_SalAng_i].equal = TP_OutAng_MedioObtuso_equal;
245      _SalAng_i++;
246
247      _rl = _EntAng_eq[2];
248      _SalAng_degree[_SalAng_i] = _rl;
249      _SalAng_conc[_SalAng_i].equal = TP_OutAng_Recto_equal;
250      _SalAng_i++;
251
252      _rl = _EntAng_eq[3];
253      _SalAng_degree[_SalAng_i] = _rl;
254      _SalAng_conc[_SalAng_i].equal = TP_OutAng_MedioAgudo_equal;
255      _SalAng_i++;
256
257      _rl = _EntAng_eq[4];
258      _SalAng_degree[_SalAng_i] = _rl;
259      _SalAng_conc[_SalAng_i].equal = TP_OutAng_Agudo_equal;
260      _SalAng_i++;
261
262      *SalAng = OP__default__Defuz(_SalAng);
263  }
264
265
266  /*=====*/
267  /* Inference Engine */
268  /*=====*/
269
270  void ControlDifusolInferenceEngine(double Entradas, double *_d_Sallidas) {
271      double Sallidas;
272      RL_Reglas(Entradas, &Sallidas);
273      *_d_Sallidas = Sallidas;

```


ANEXO 3

PLANOS DE PIEZAS Y ENSAMBLES



ENGRANE CONDUCTOR (TREGOLD)

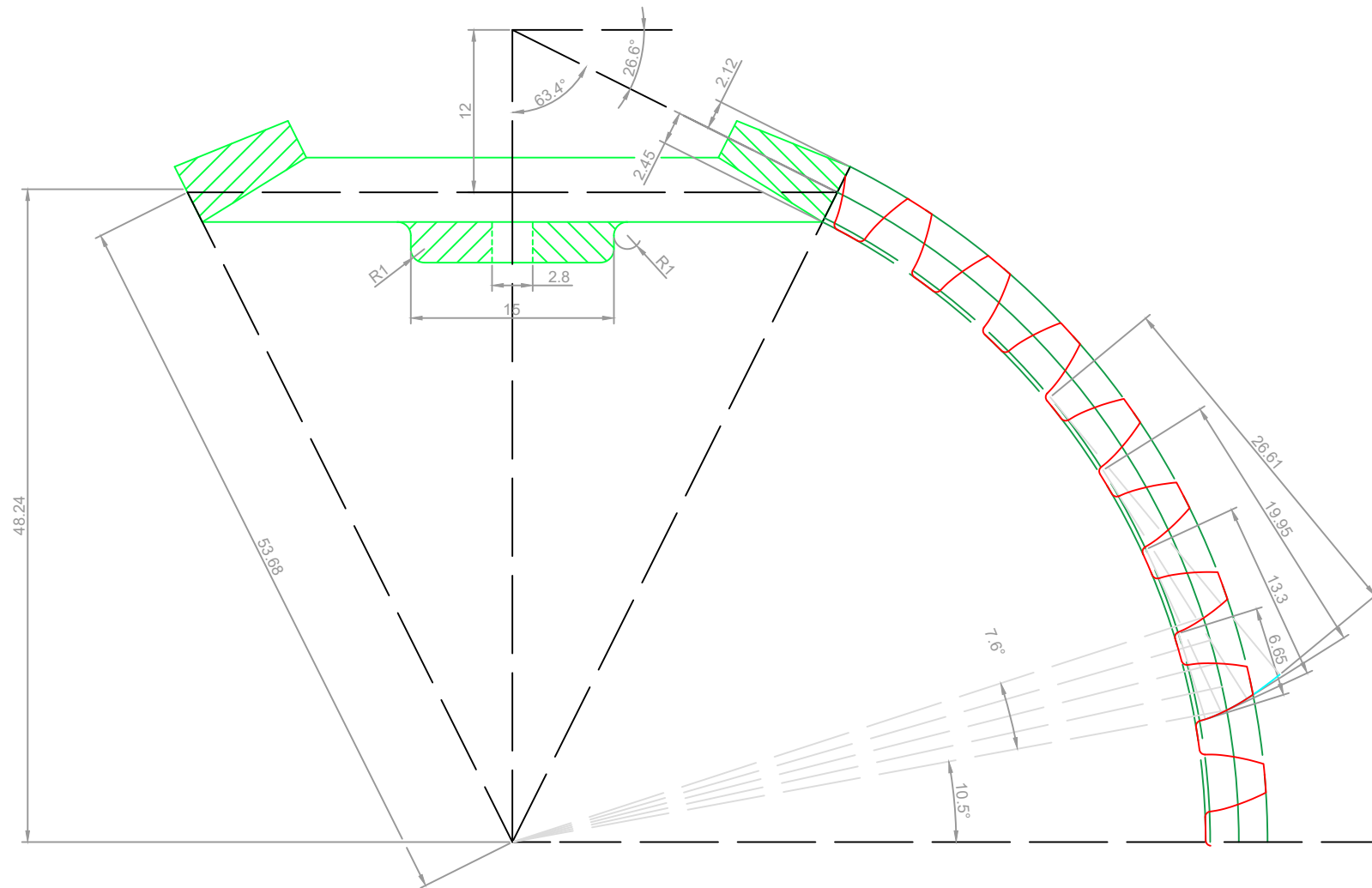
1. RELACIÓN=2
2. MÓDULO (m)=2
3. DIÁMETRO DE PASO=24mm
4. PASO DIAMETRAL (P)=12 dientes/plg
5. PASO CIRCUNF. (p)=6.65mm
6. ADDENDUM=2.116mm
7. ALTURA DEL DIENTE=4.565mm
8. DIÁMETRO EXT. (O)=28.234mm
9. DIÁMETRO RAÍZ (R)=19.1034mm
10. DIÁMETRO BASE (Db)=11.3mm

ENGRANE CONDUCTOR (TREGOLD)

1. RELACIÓN=2
2. MÓDULO (m)=2
3. DIÁMETRO DE PASO=48mm
4. PASO DIAMETRAL (P)=12 dientes/plg
5. PASO CIRCUNF. (p)=6.65mm
6. ADDENDUM=2.116mm
7. ALTURA DEL DIENTE=4.565mm
8. DIÁMETRO EXT. (O)=52.234mm
9. DIÁMETRO RAÍZ (R)=43.1034mm
10. DIÁMETRO BASE (Db)=51.55mm

UNAM		Doc.: 01		PERFIL DE ENGRANES CÓNICOS RECTOS	
		Ejecutó: E. J. G. V	Escala: 3:1	Acot.: mm	Fecha: 01/06/21

PERFIL DE TREGOLD POR CONO POSTERIOR



ENGRANE CONDUCTOR (TREGOLD)

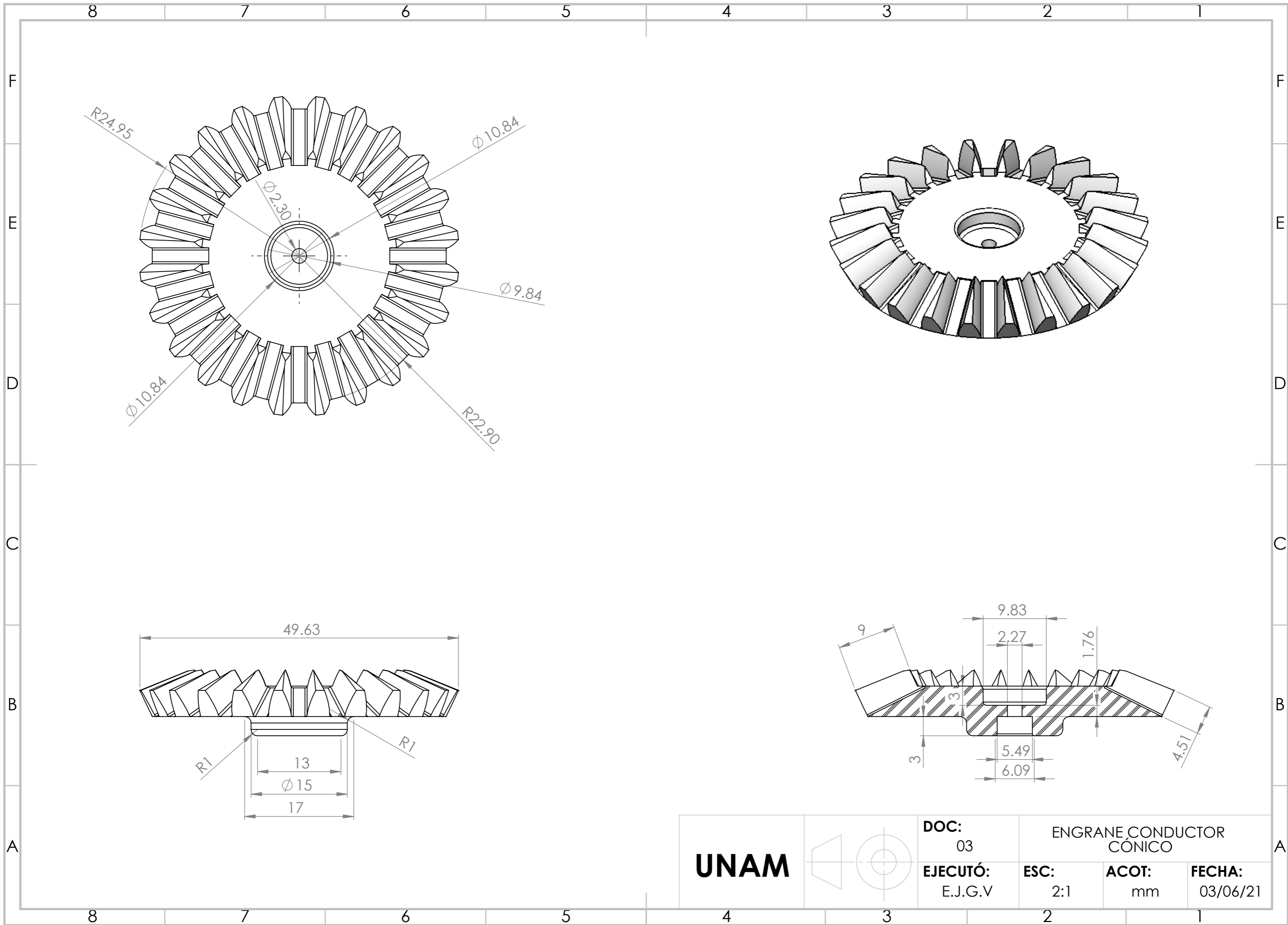
Para dientes virtuales de aproximación

$$Z_p' = 2 * \pi * r_b' / p$$

$$Z_p' = 2 * \pi (53.68) / 6.67$$

$$Z_p' = 50.56 \approx 50 \text{ dientes}$$

UNAM		Doc.: 02	PERFIL DE CONDUCTOR POR APROX. DE TREGOLD		
		Ejecut6: E.J.G.V	Escala: 3:1	Acot.: mm	Fecha 01/06/21



8

7

6

5

4

3

2

1

F

E

D

C

B

A

8

7

6

5

4

3

2

1

F

E

D

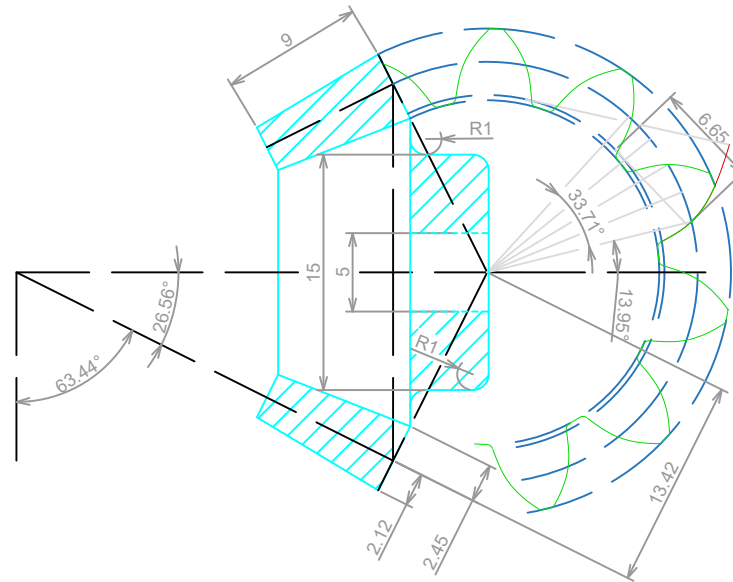
C

B

A

UNAM		DOC: 03		ENGRANE CONDUCTOR CÓNICO	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 2:1	ACOT: mm	FECHA: 03/06/21

PERFIL DE TREGOLD POR CONO POSTERIOR



ENGRANE CONDUCTOR (TREGOLD)

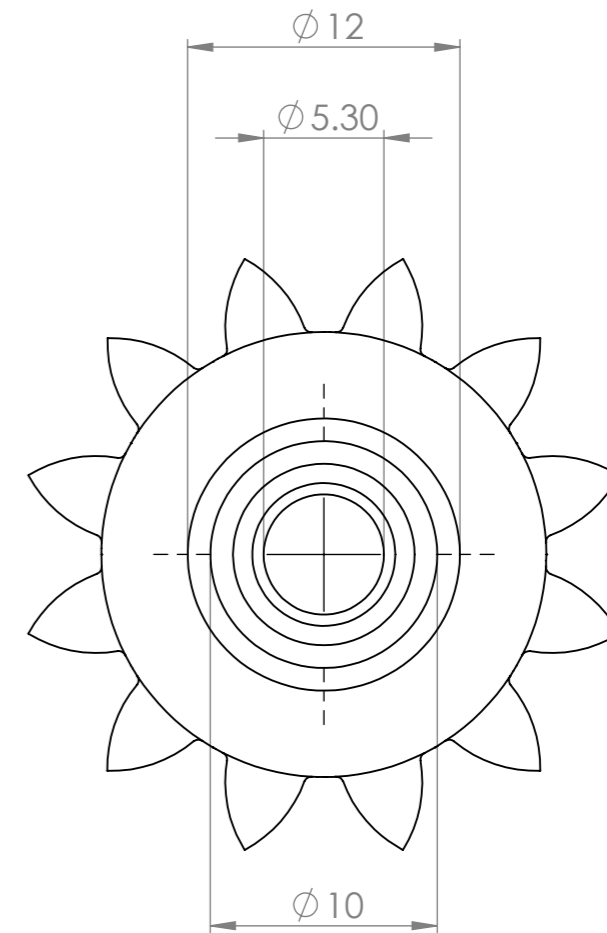
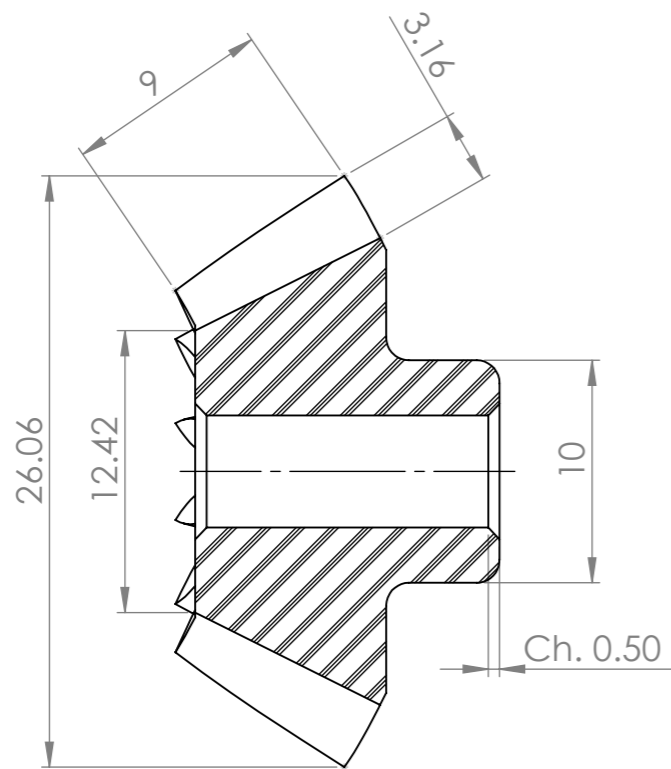
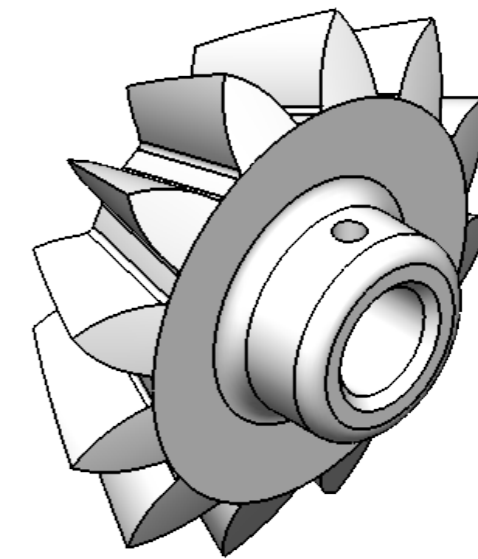
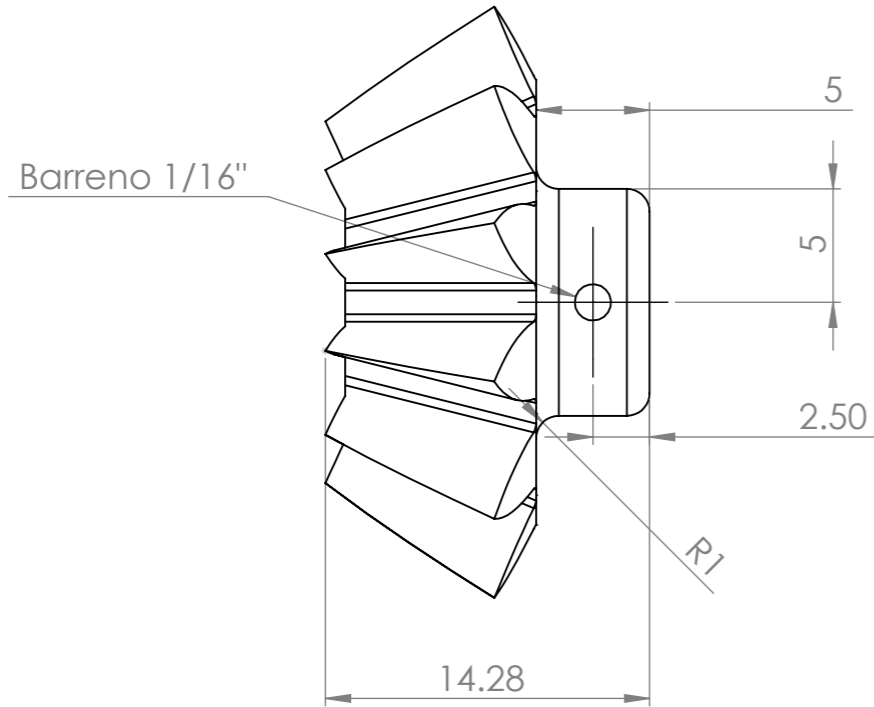
Para dientes virtuales de aproximación

$$Z_p' = 2 * \pi * r_b' / p$$

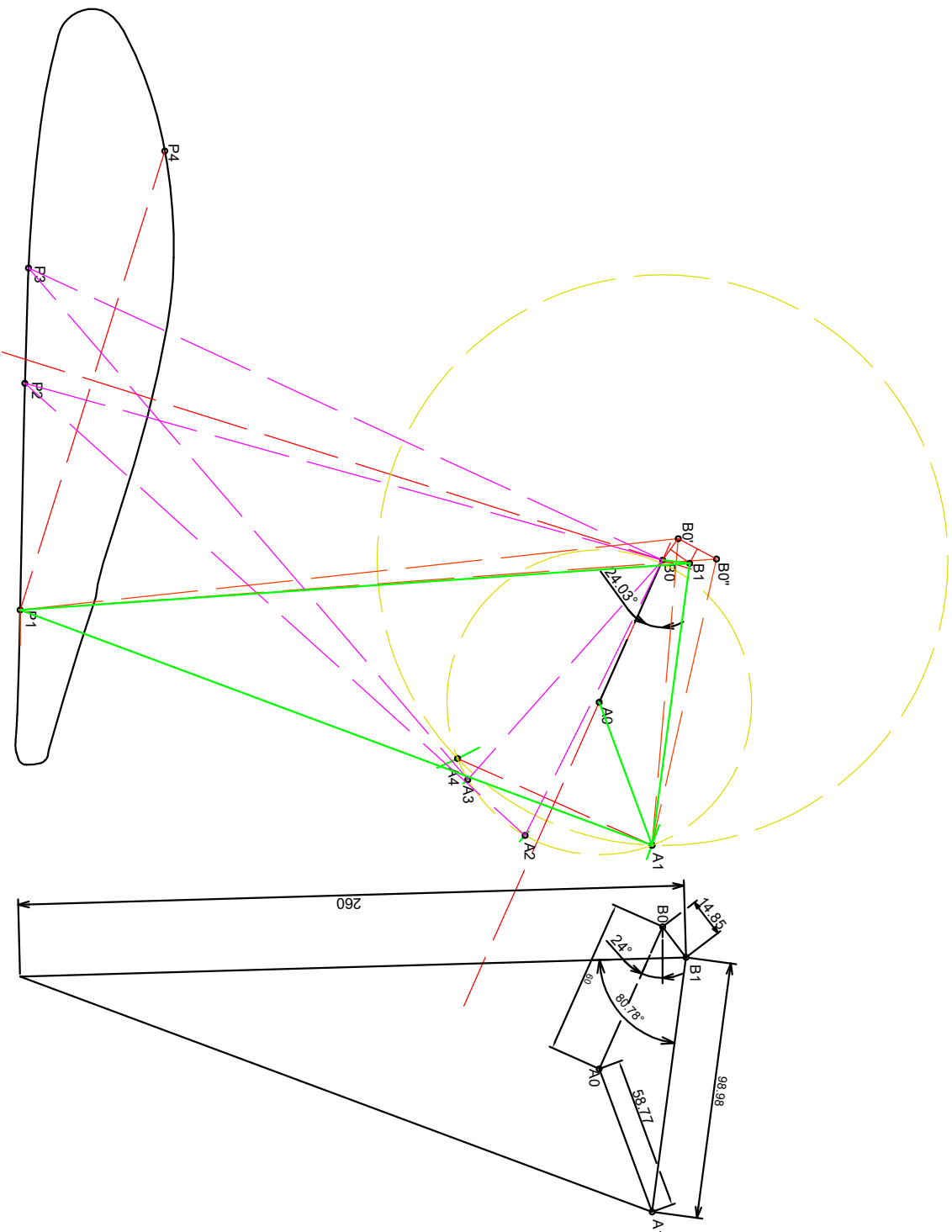
$$Z_p' = 2 * \pi (13.42) / 6.67$$

$$Z_p' = 12.64 \approx 12 \text{ dientes}$$

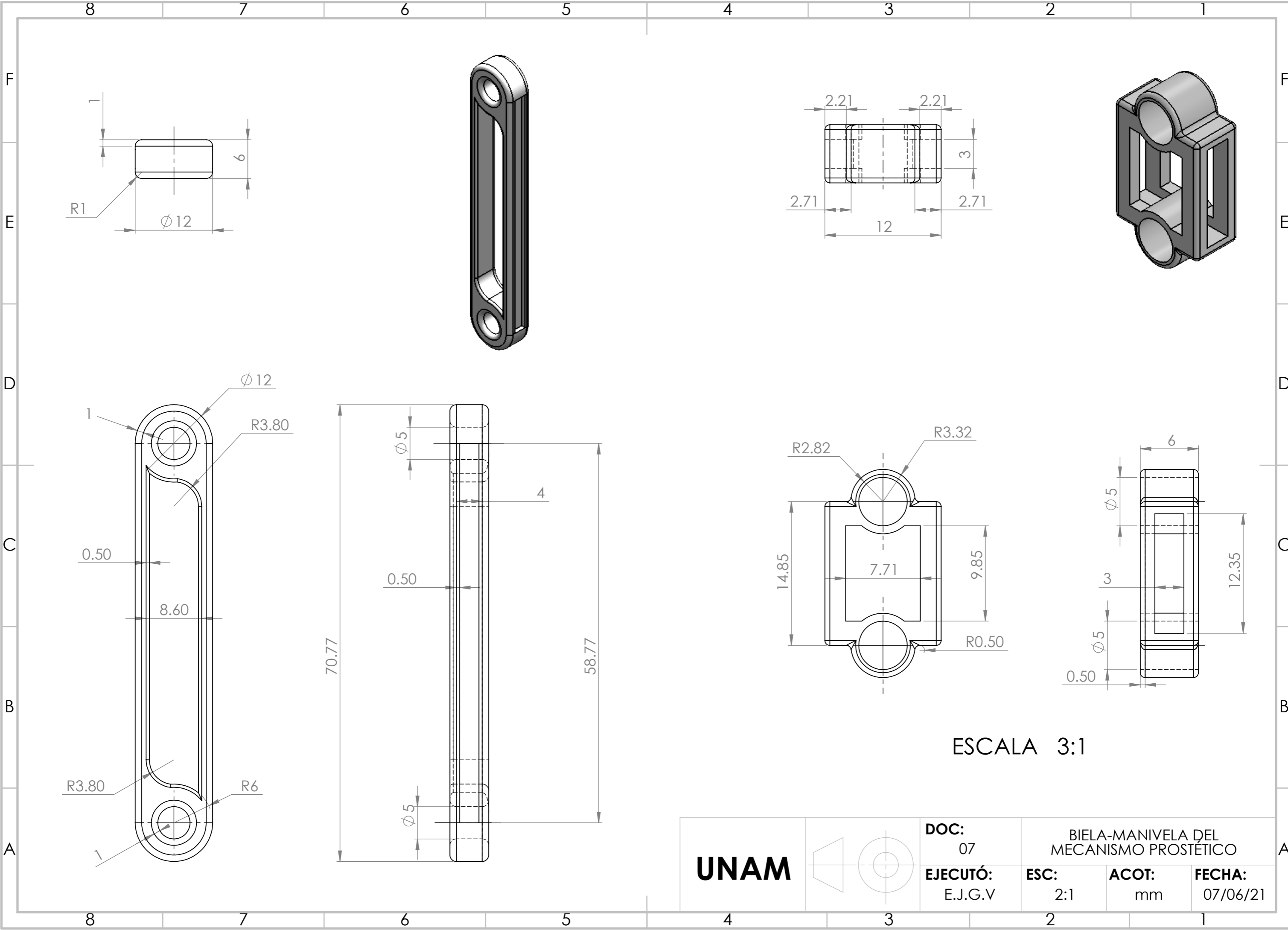
UNAM		Doc.: 04	PERFIL DE CONDUCTO POR APROX. DE TREGOLD		
		Ejecutó: E.J.G.V	Escala: 3:1	Acot.: mm	Fecha 01/06/21



UNAM		DOC: 05				ENGRANE CONDUcido CÓNICO	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 3:1	ACOT: mm	FECHA: 03/06/21		

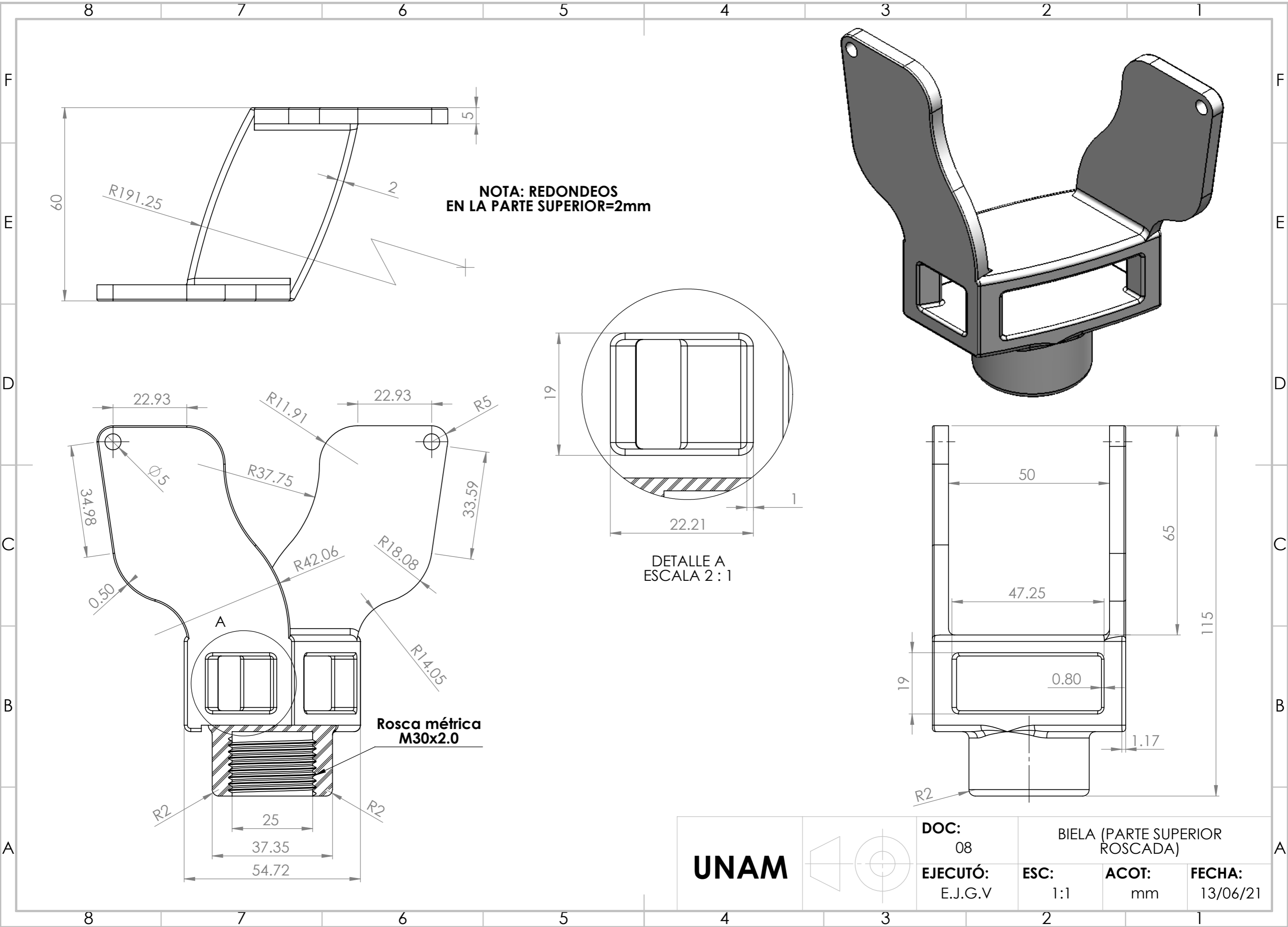


UNAM		Doc.:	06	SINTESIS CINEMATICA	
		Ejecutó:	E. J.G.V	GRAFICA DEL MECANISMO	
		Escal:	1:2.5	Acot.:	mm
		Fecha	01/06/21		

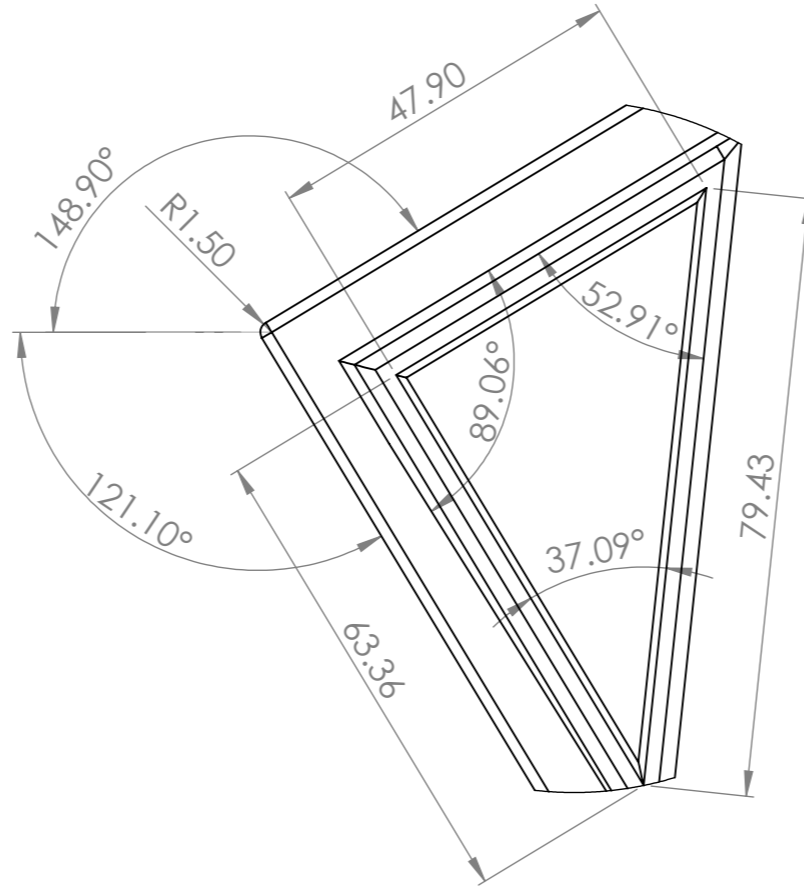
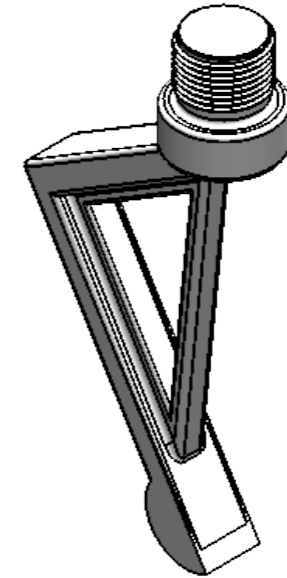
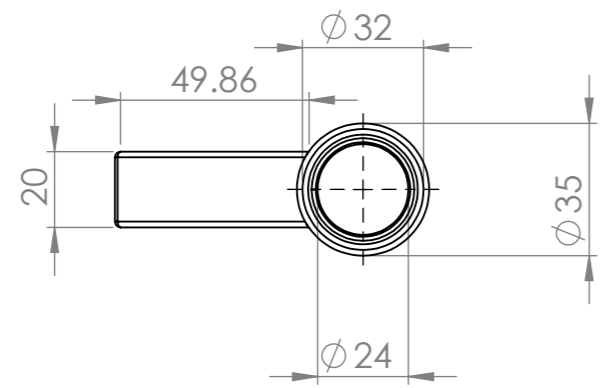


ESCALA 3:1

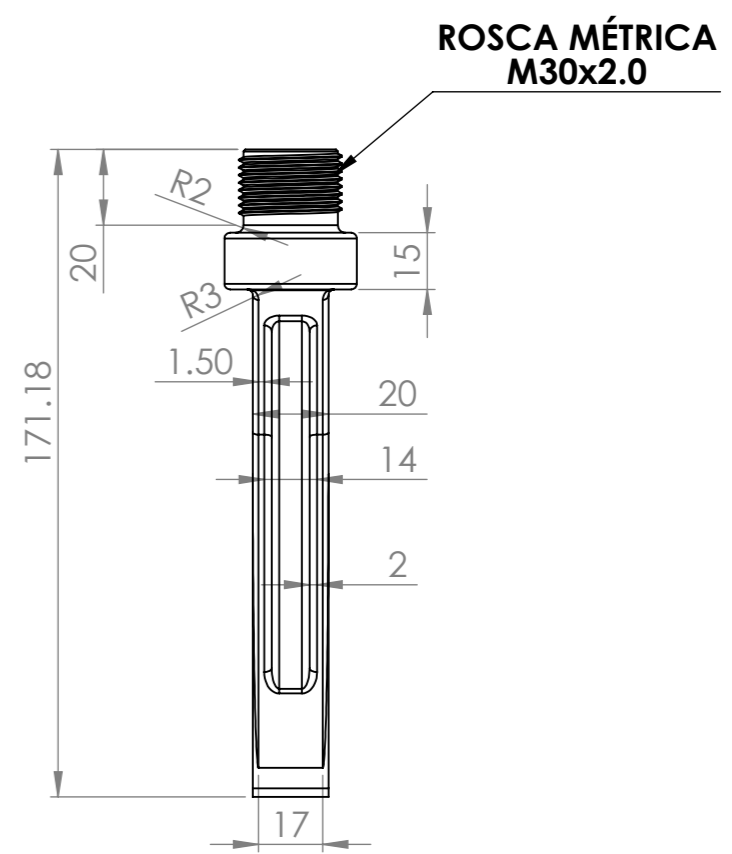
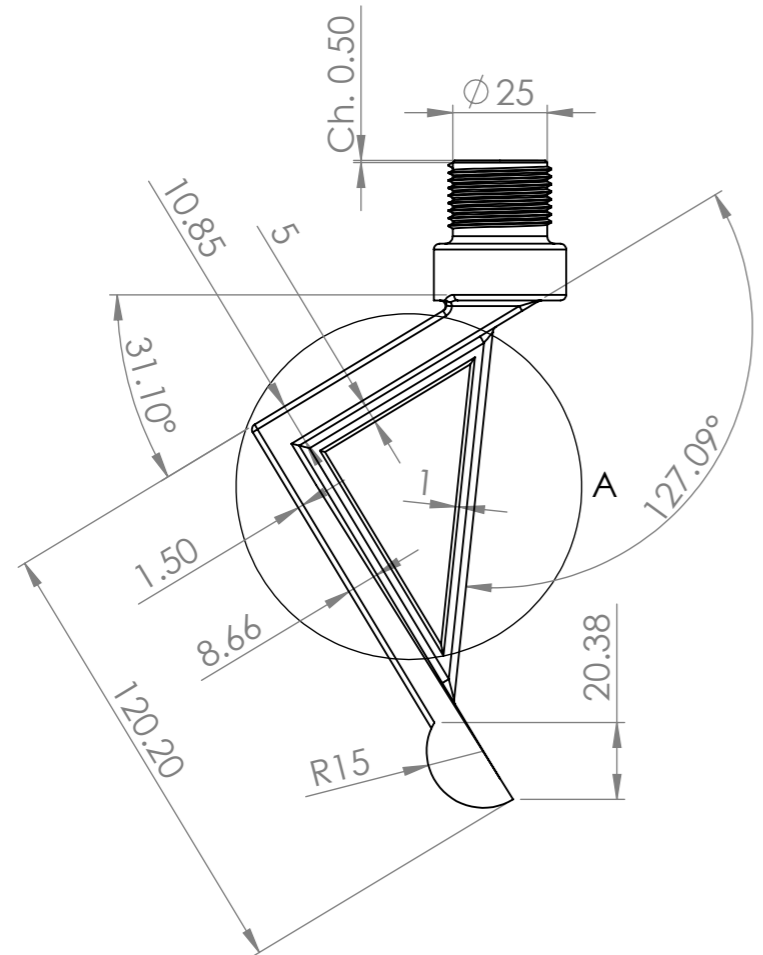
UNAM		DOC:	BIELA-MANIVELA DEL MECANISMO PROSTETICO		
		07	ESC:	ACOT:	FECHA:
		EJECUTÓ:	2:1	mm	07/06/21
		E.J.G.V			



UNAM		DOC: 08	BIELA (PARTE SUPERIOR ROSCADA)		
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1:1	ACOT: mm	FECHA: 13/06/21

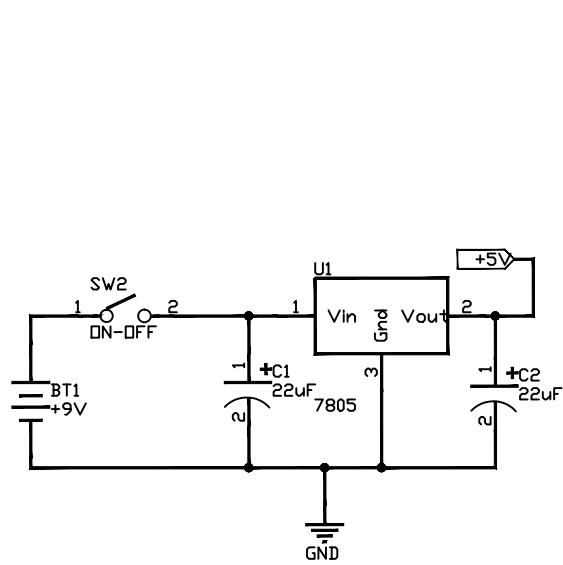


DETALLE A
ESCALA 1 : 1

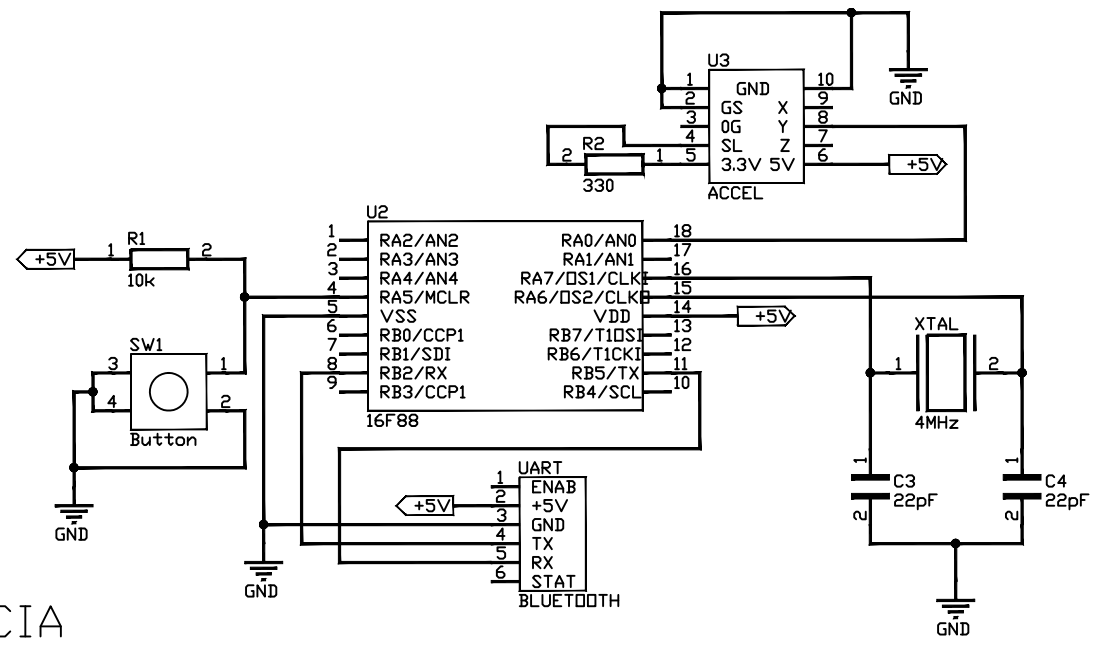


ROSCA MÉTRICA
M30x2.0

UNAM		DOC: 09		BIELA (PARTE INFERIOR ROSCADA)	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1:2	ACOT: mm	FECHA: 15/06/21

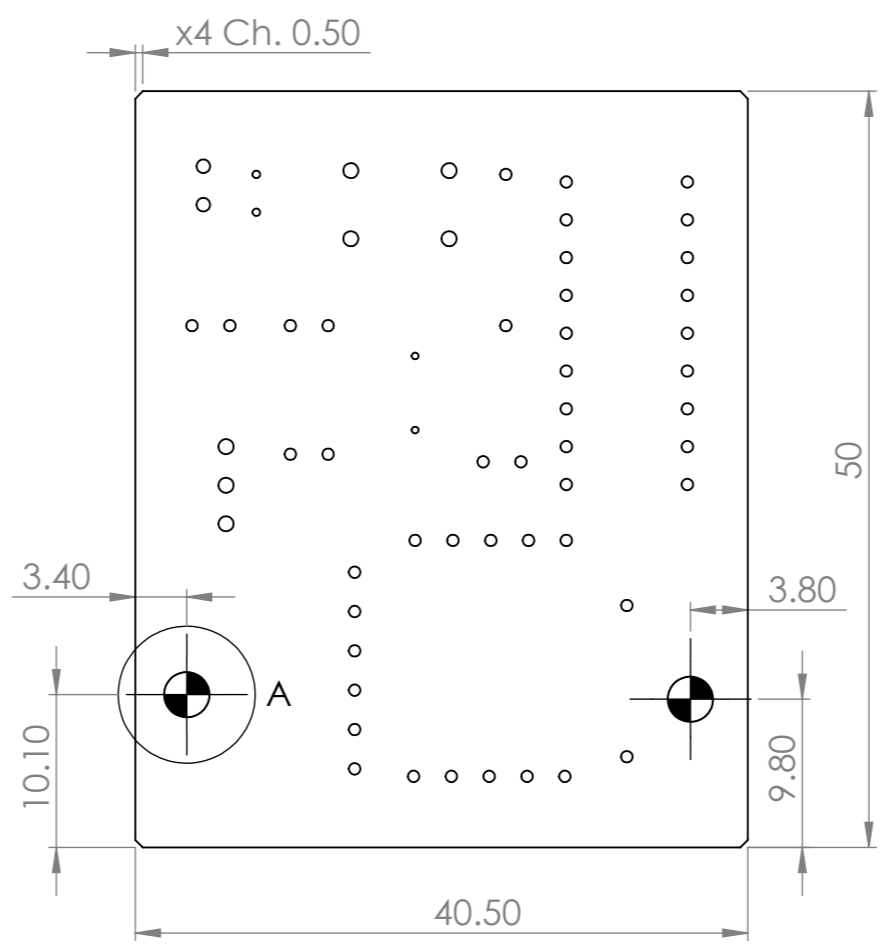
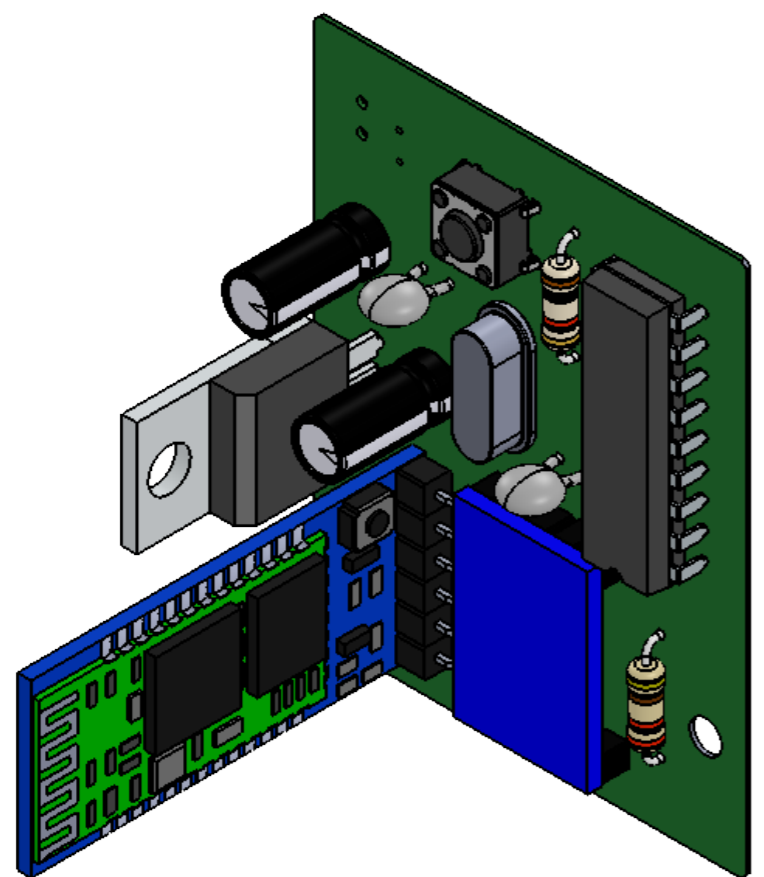


SISTEMA DE POTENCIA

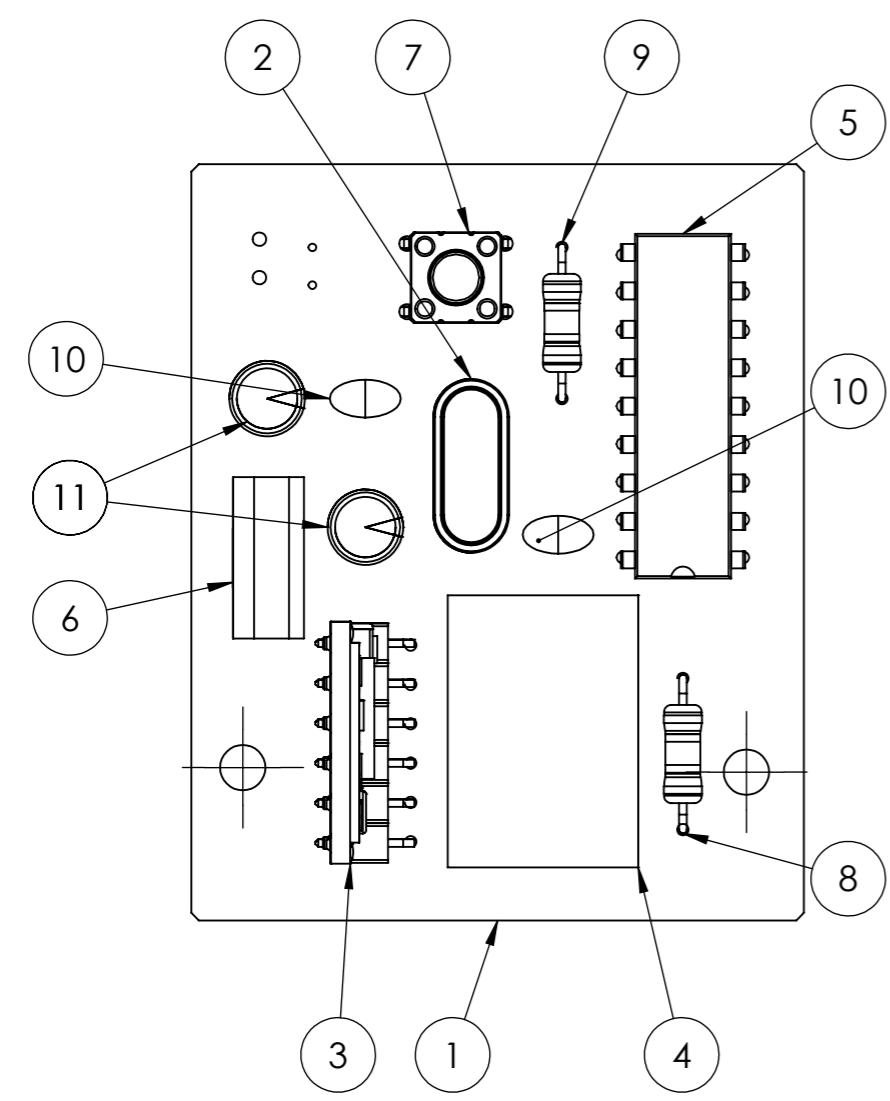


SISTEMA DE CONTROL

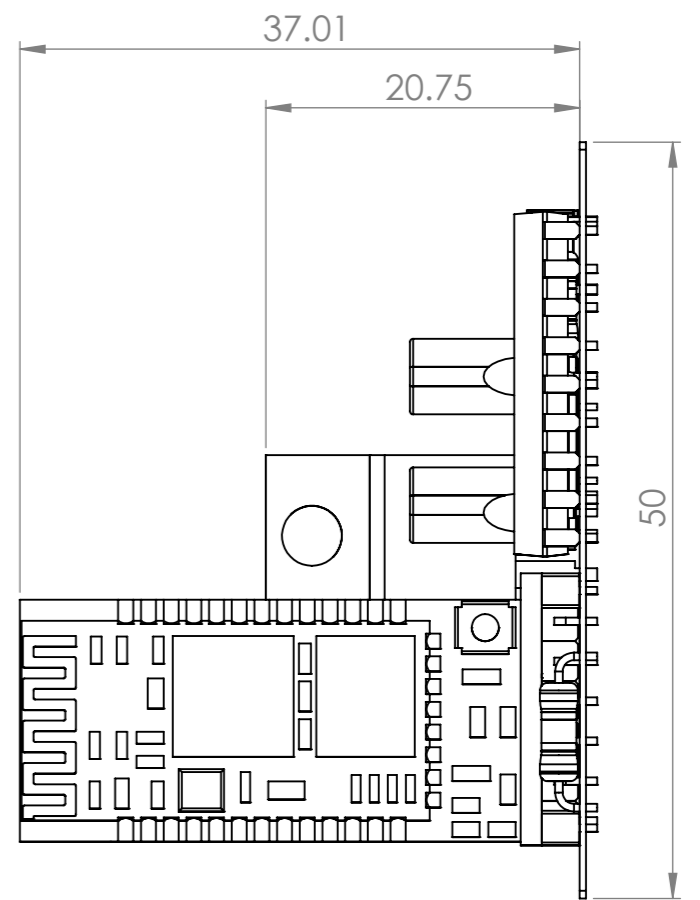
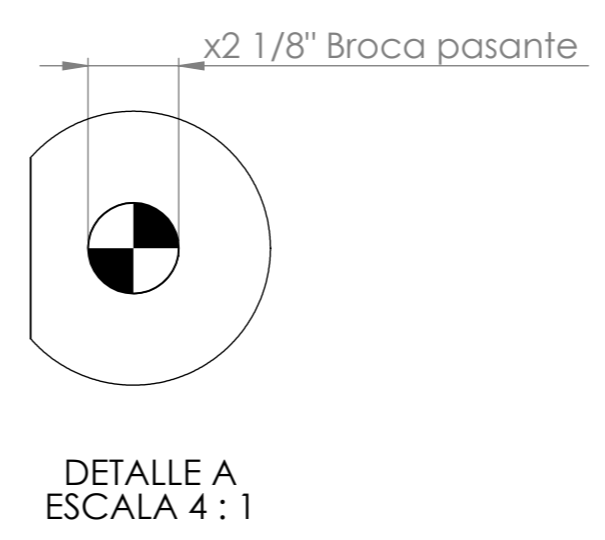
UNAM		Doc.: 10	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SISTEMA SENSOR ACEL.		
		Ejecutó: E.J.G.V	Escala: 1:1	Acot.: mm	Fecha 01/10/21



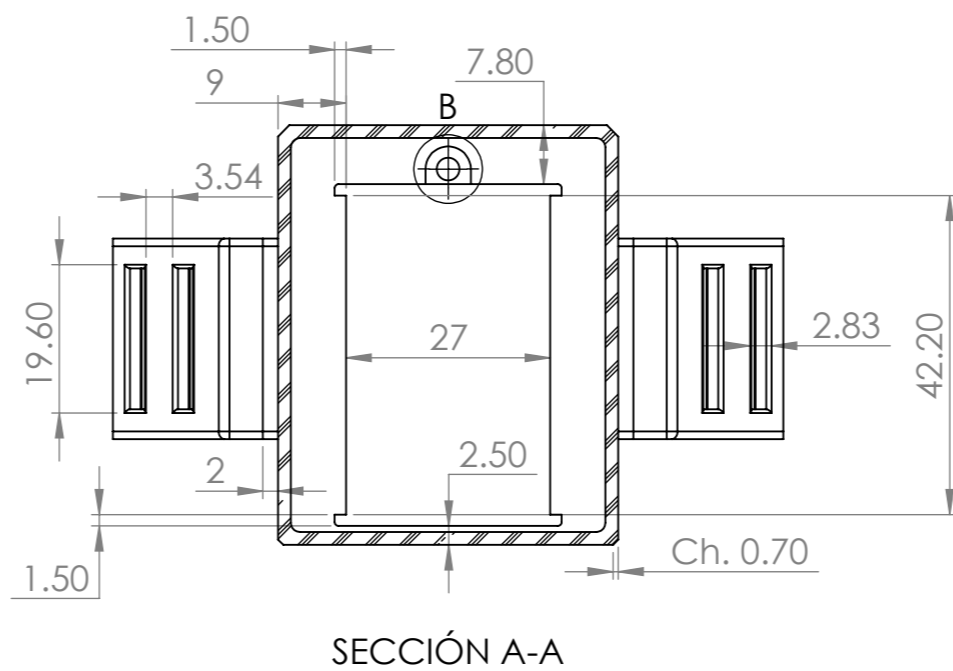
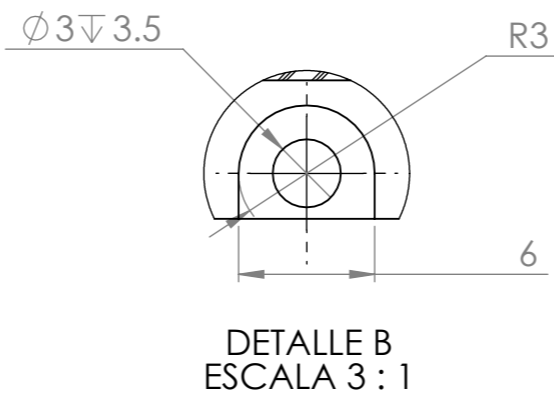
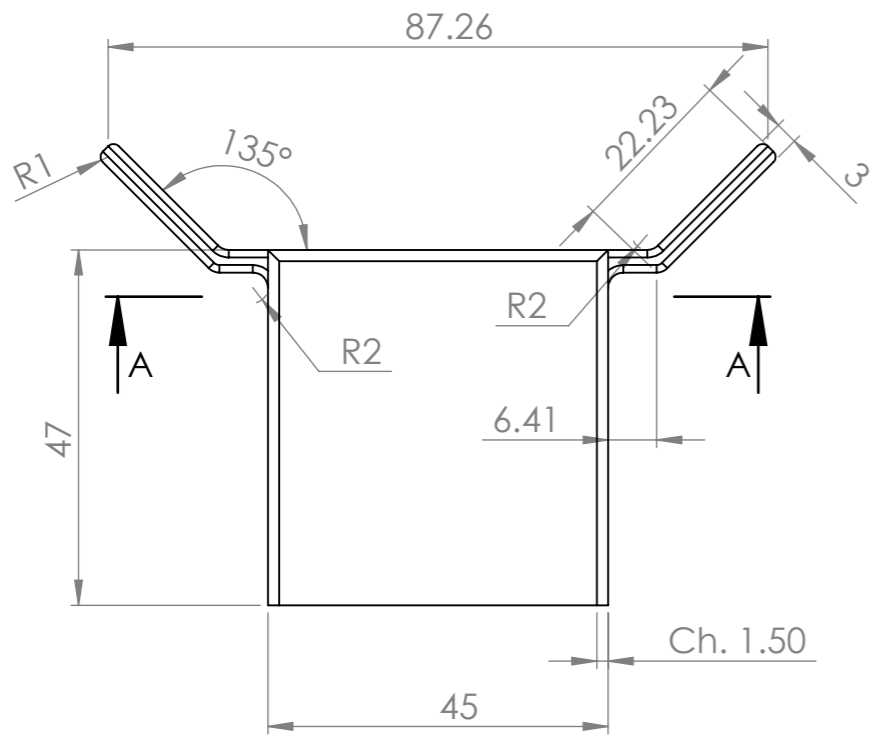
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	PLACA FENÓLICA	1
2	CRISTAL DE 4MHz	1
3	BLUETOOTH HC05	1
4	ACEL MM7361L	1
5	PIC16F88	1
6	REGULADOR L7805	1
7	BOTÓN RESET	1
8	RES 330 OHMS	1
9	RES 10K OHMS	1
10	CAP 22pF	1
11	CAP 20uF	1



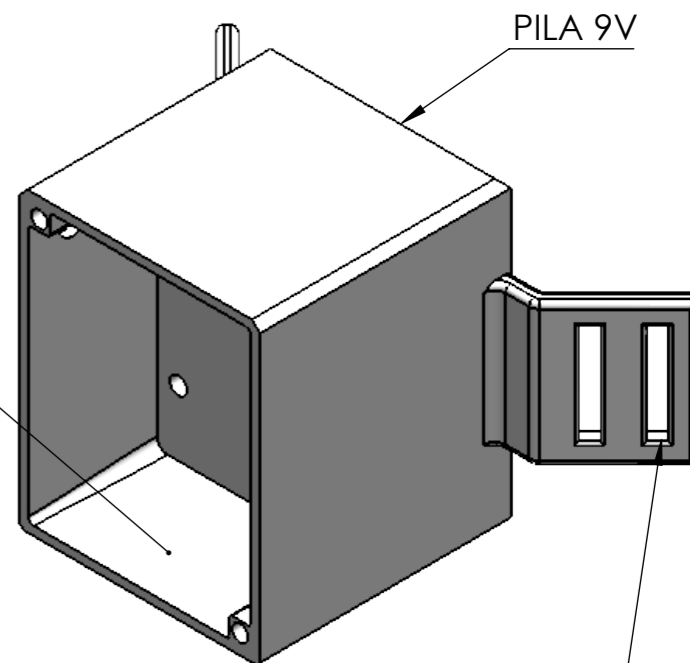
DIMENSIONES PLACA FENÓLICA



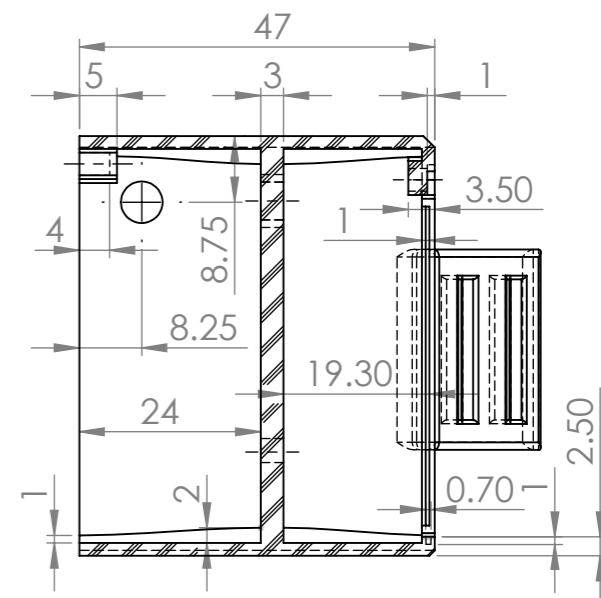
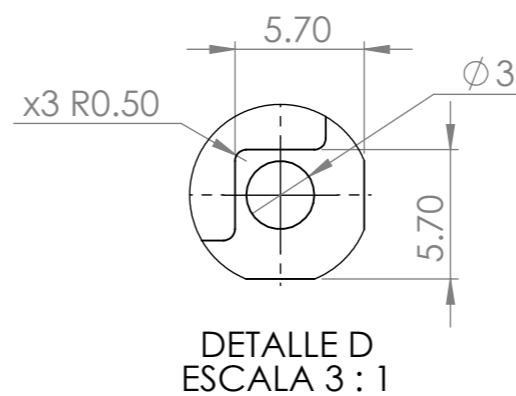
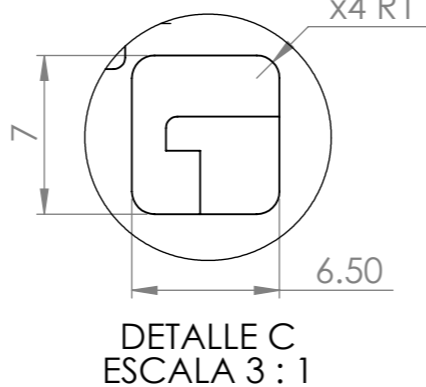
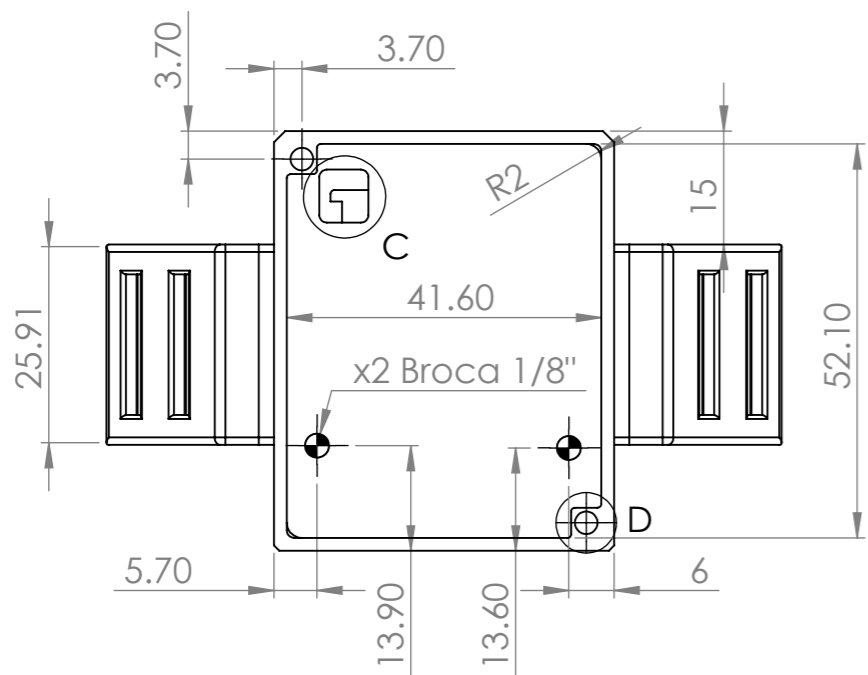
UNAM		DOC: 11	CIRCUITO DE SENSOR ACCELERÓMETRO (MECÁNICO)		
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1:1	ACOT: mm	FECHA: 03/10/21



PCB Y
TAPA



HACIA CORREA
O RESORTE



UNAM



DOC:
12

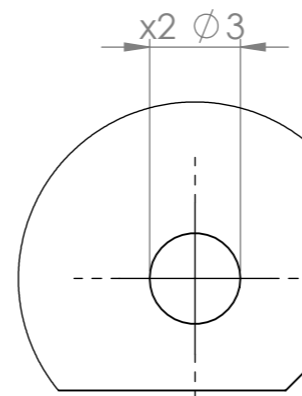
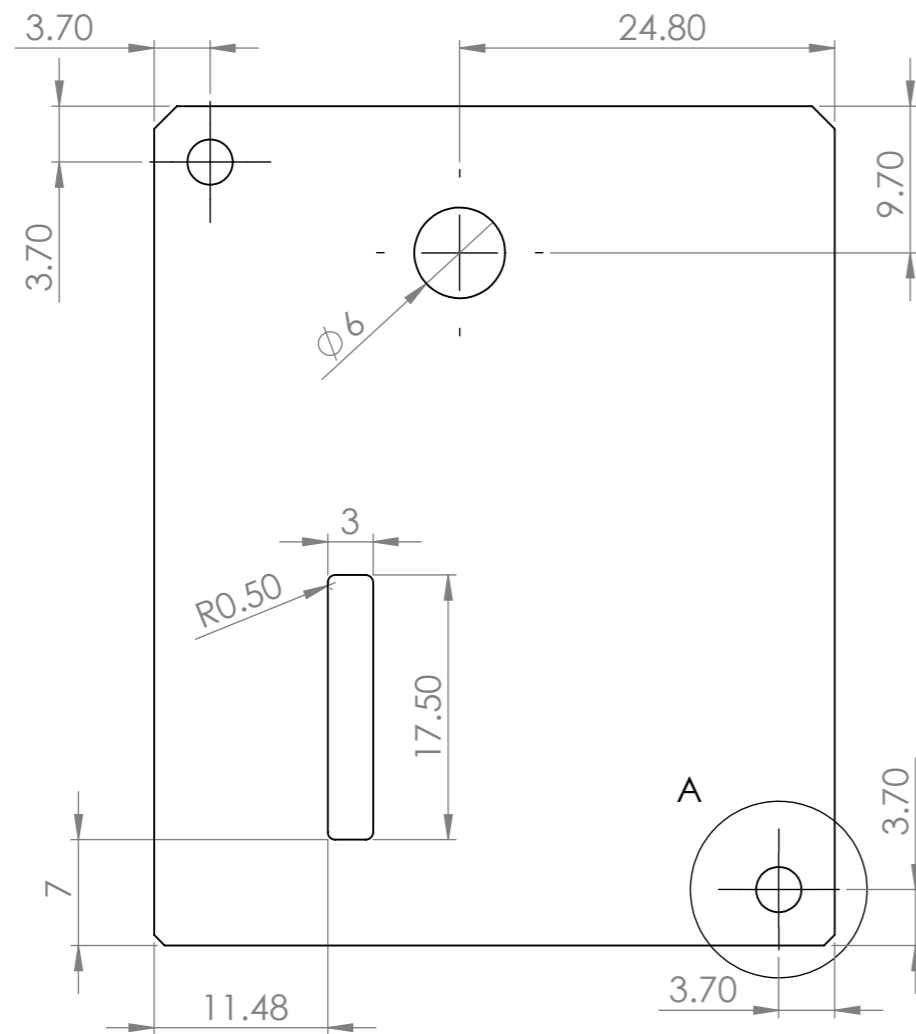
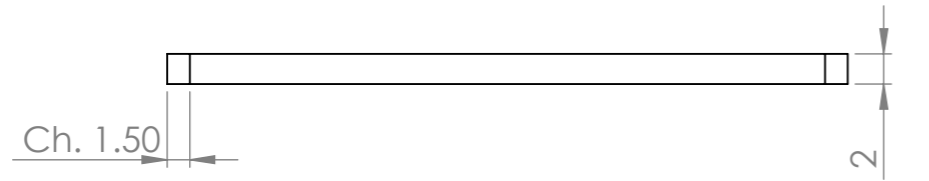
EJECUTÓ:
E.J.G.V

CAJA CONTENEDOR PARA
CIRCUITO SENSOR

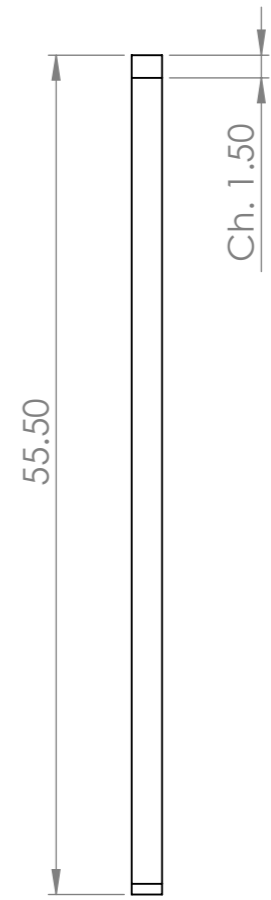
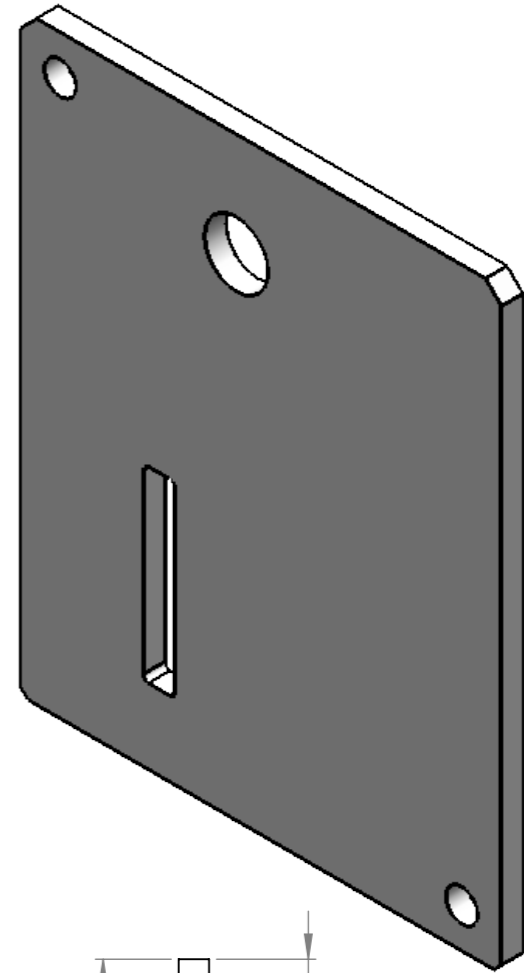
ESC:
1:1

ACOT:
mm

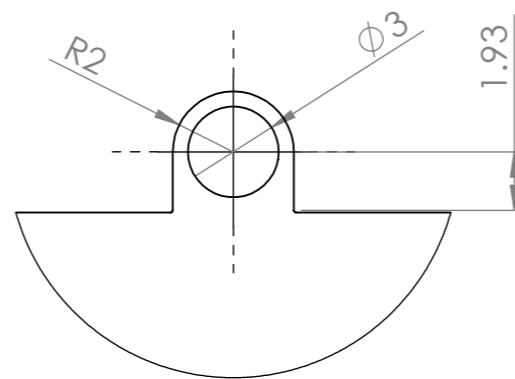
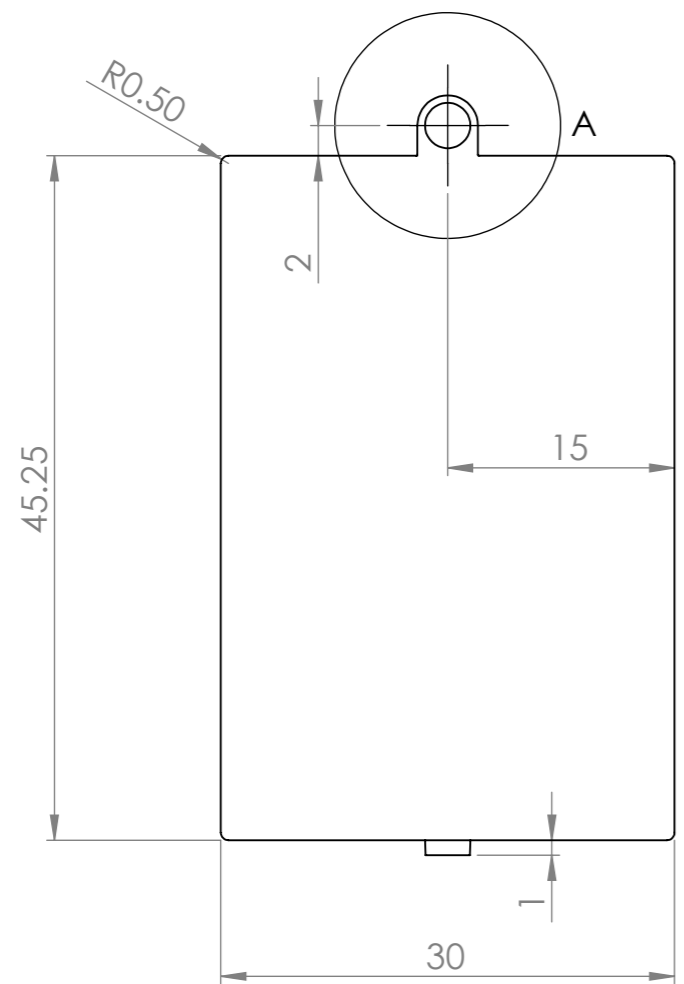
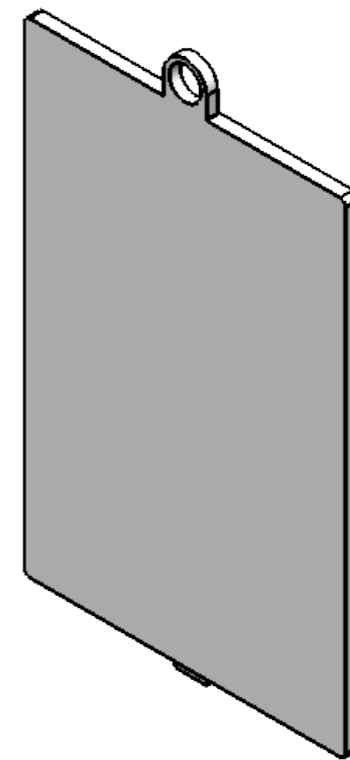
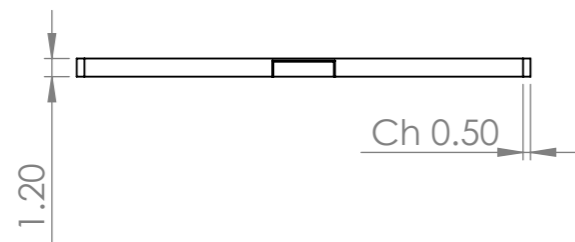
FECHA:
27/09/21



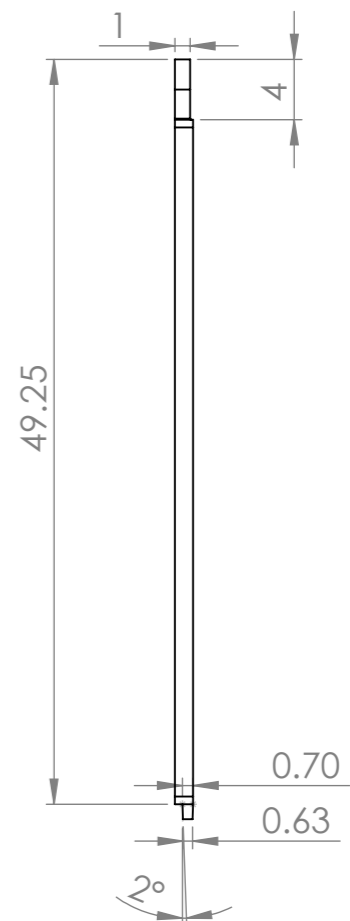
DETALLE A
ESCALA 4 : 1



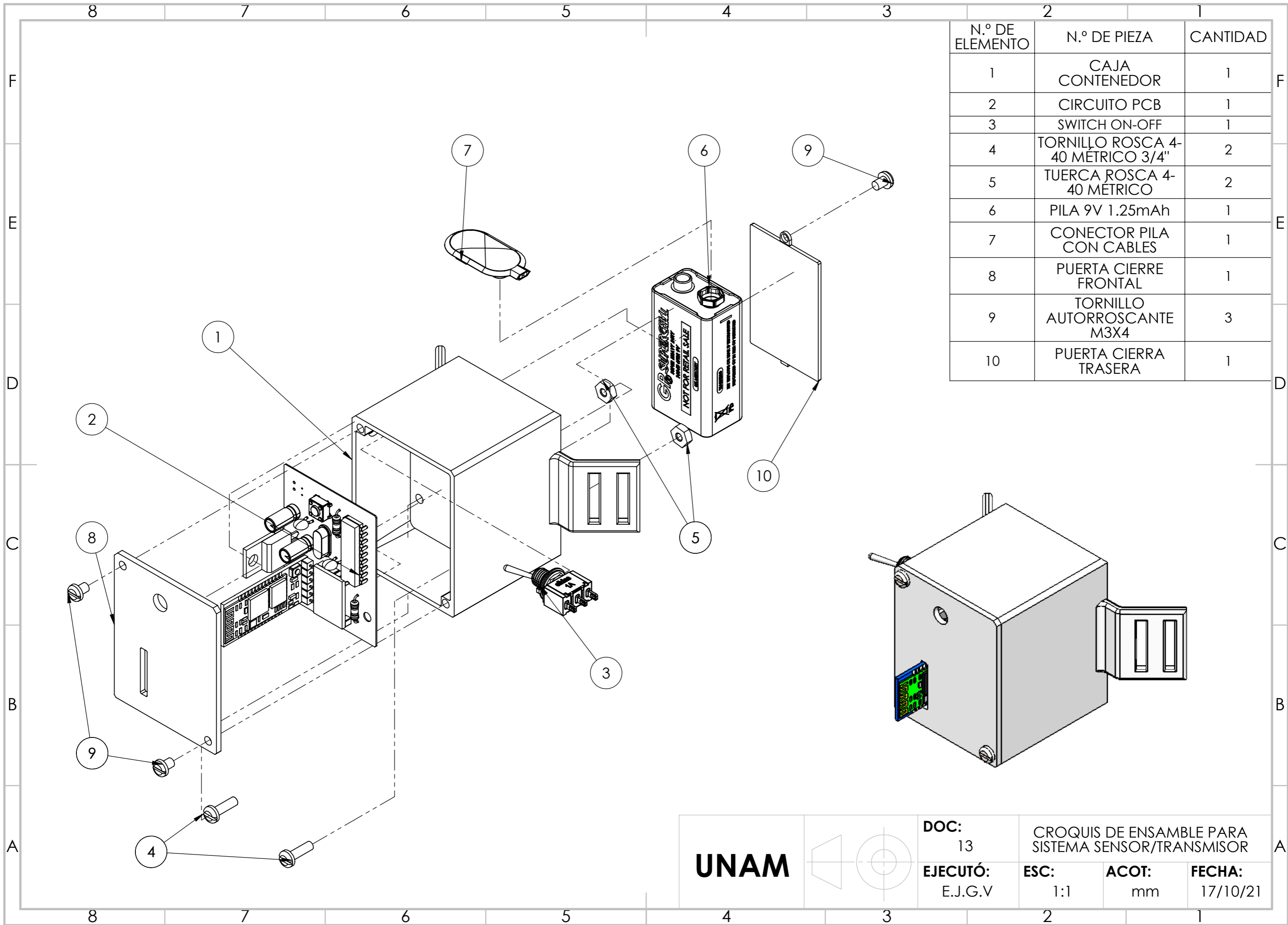
UNAM		DOC: 13				PUERTA FRONTAL DE CAJA PARA SENSOR ACCELERÓMETRO	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 2:1	ACOT: mm	FECHA: 27/09/21		



DETALLE A
ESCALA 4 : 1

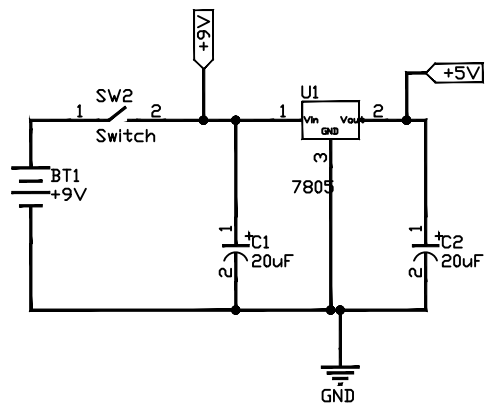


UNAM		DOC: 14		PUERTA TRASERA DE CAJA PARA SENSOR ACELERÓMETRO	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 2:1	ACOT: mm	FECHA: 27/09/21

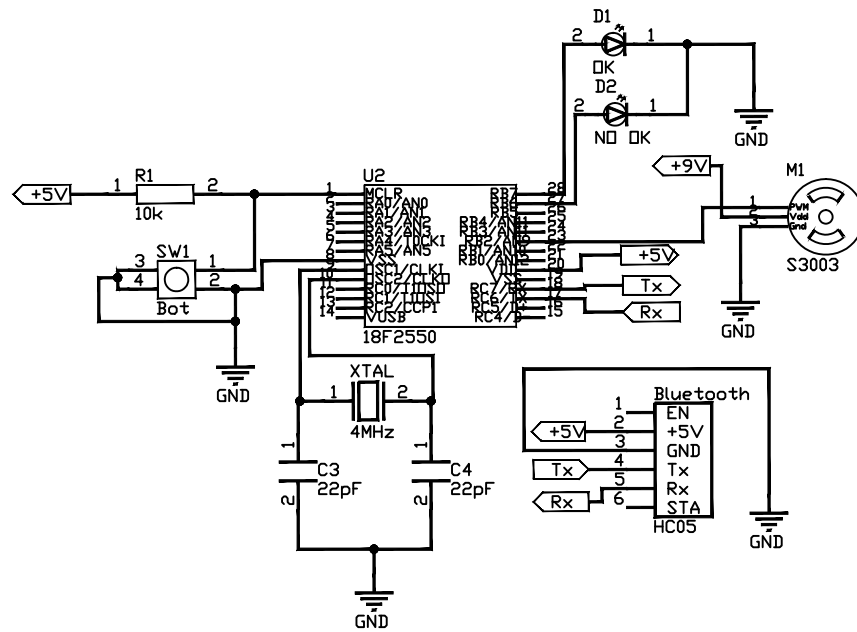


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	CAJA CONTENEDOR	1
2	CIRCUITO PCB	1
3	SWITCH ON-OFF	1
4	TORNILLO ROSCA 4-40 METRICO 3/4"	2
5	TUERCA ROSCA 4-40 METRICO	2
6	PILA 9V 1.25mAh	1
7	CONECTOR PILA CON CABLES	1
8	PUERTA CIERRE FRONTAL	1
9	TORNILLO AUTORROSCANTE M3X4	3
10	PUERTA CIERRA TRASERA	1

UNAM		DOC: 13		CROQUIS DE ENSAMBLE PARA SISTEMA SENSOR/TRANSMISOR	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1:1		

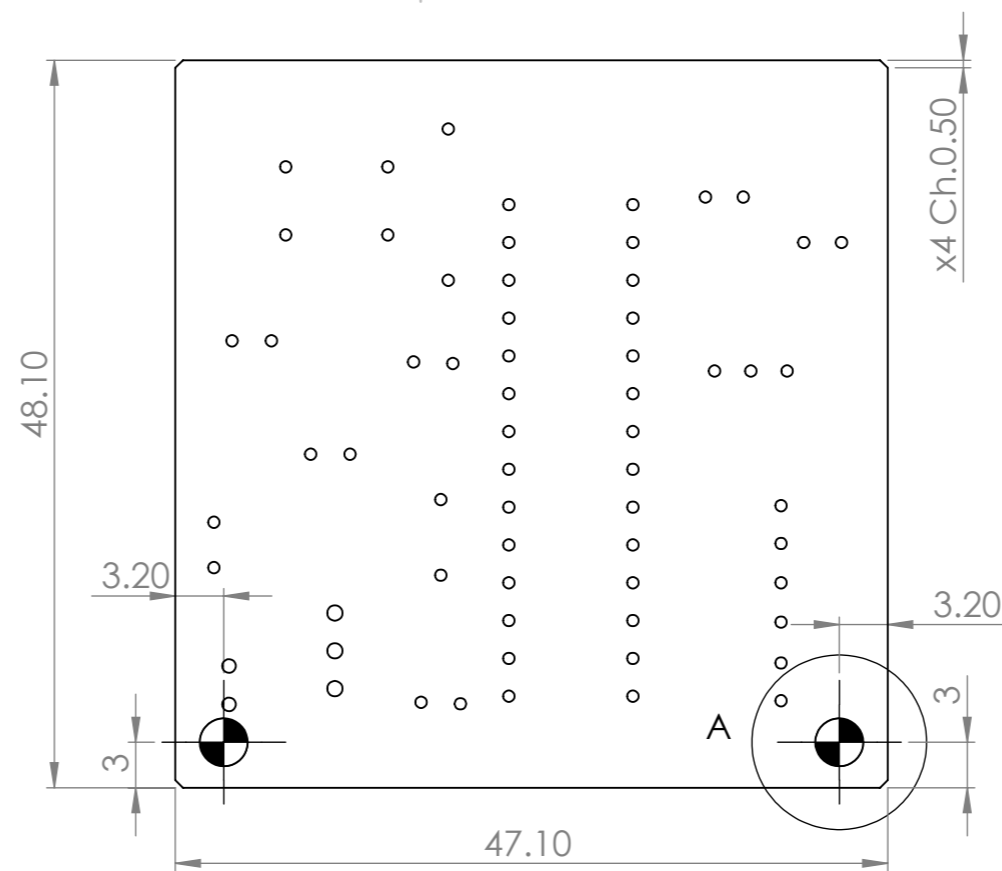
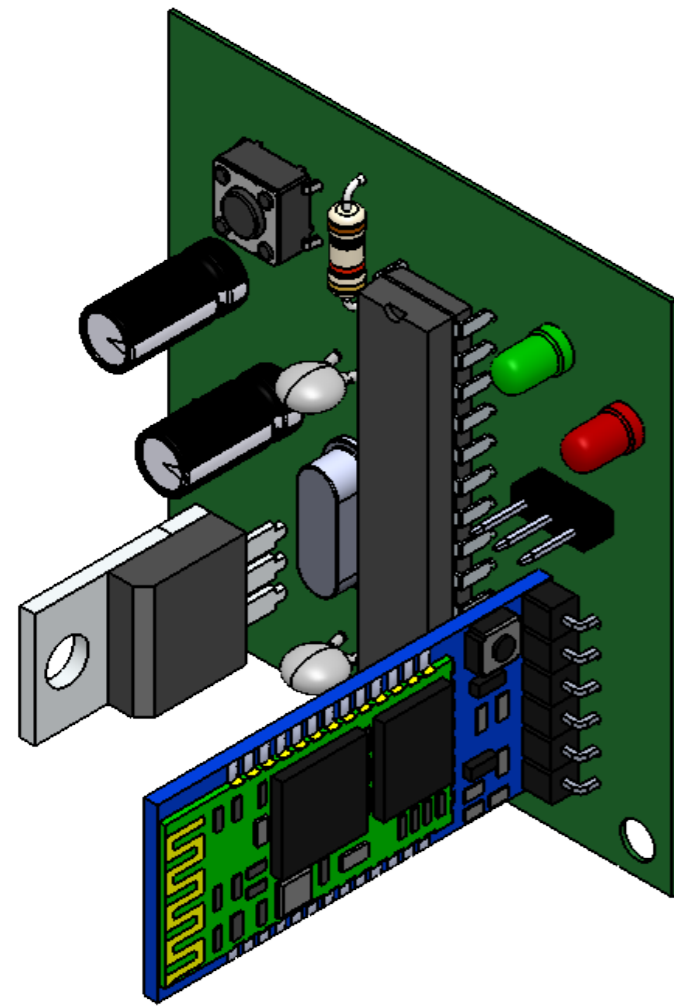


SISTEMA DE POTENCIA



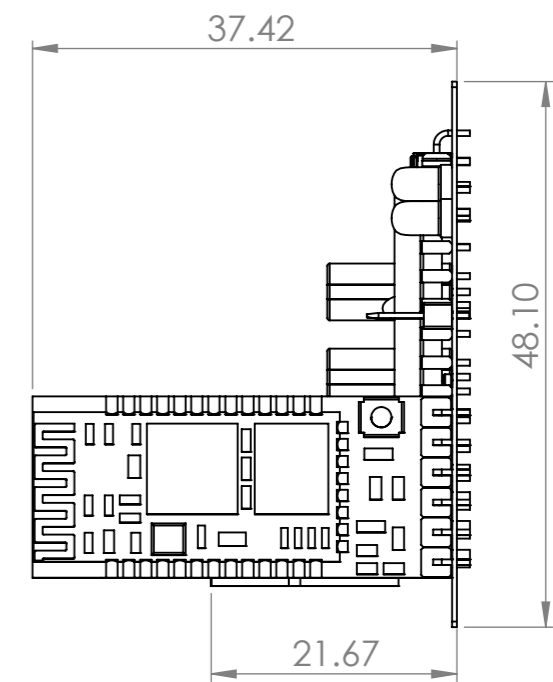
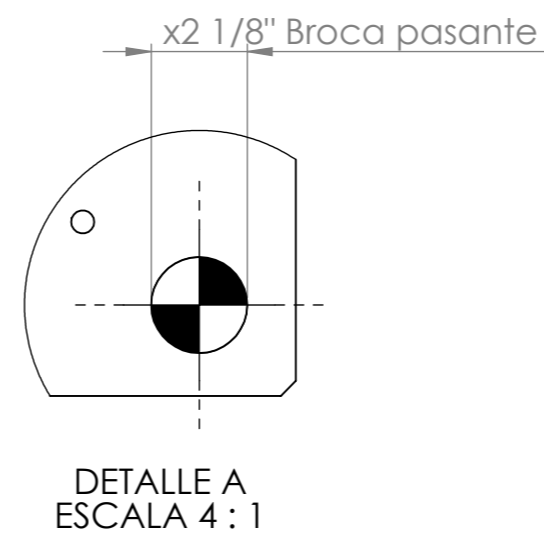
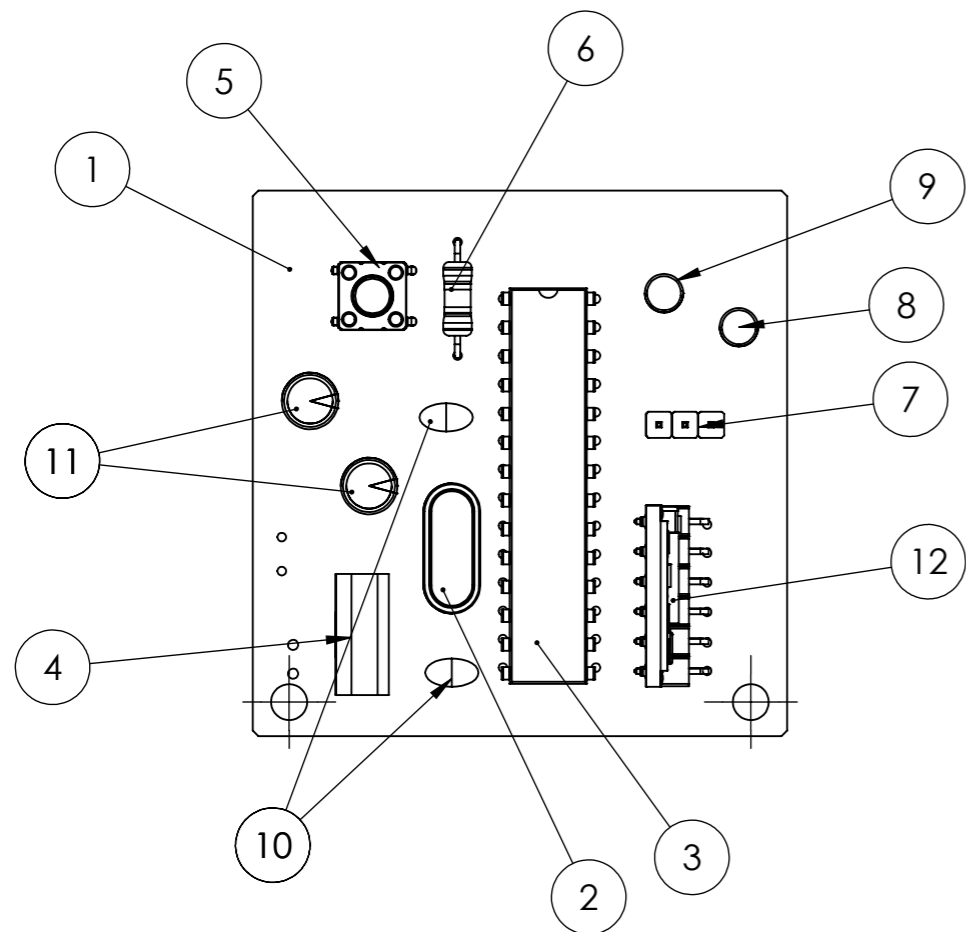
SISTEMA DE CONTROL

UNAM		Doc.: 16	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO SISTEMA MOTRIZ SERVO		
		Ejecutó: E.J.G.V	Escala: 1:1	Acot.: mm	Fecha: 25/10/21

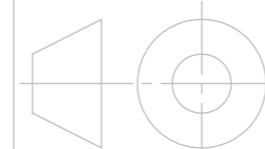


**DIMENSIONES
PLACA FENÓLICA**

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	PLACA FENÓLICA	1
2	CRISTAL DE 4MHz	1
3	PIC18F2550	1
4	REGULADOR L7805	1
5	BOTÓN RESET	1
6	RES 10K OHMS	1
7	PINES SERVOMOTOR	1
8	LED VERDE OK	1
9	LED ROJO NOK	1
10	CAP 22pF	2
11	CAP 20uF	2
12	BLUETOOTH HC05	1



UNAM



DOC:
17

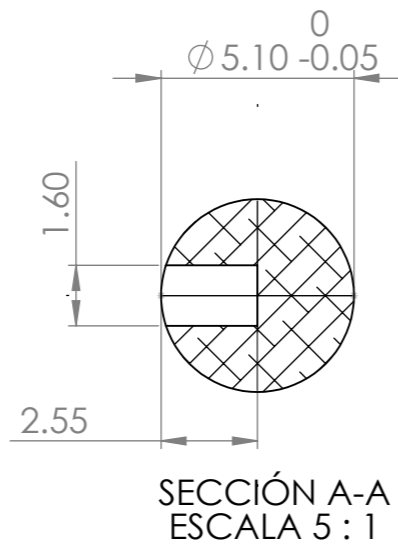
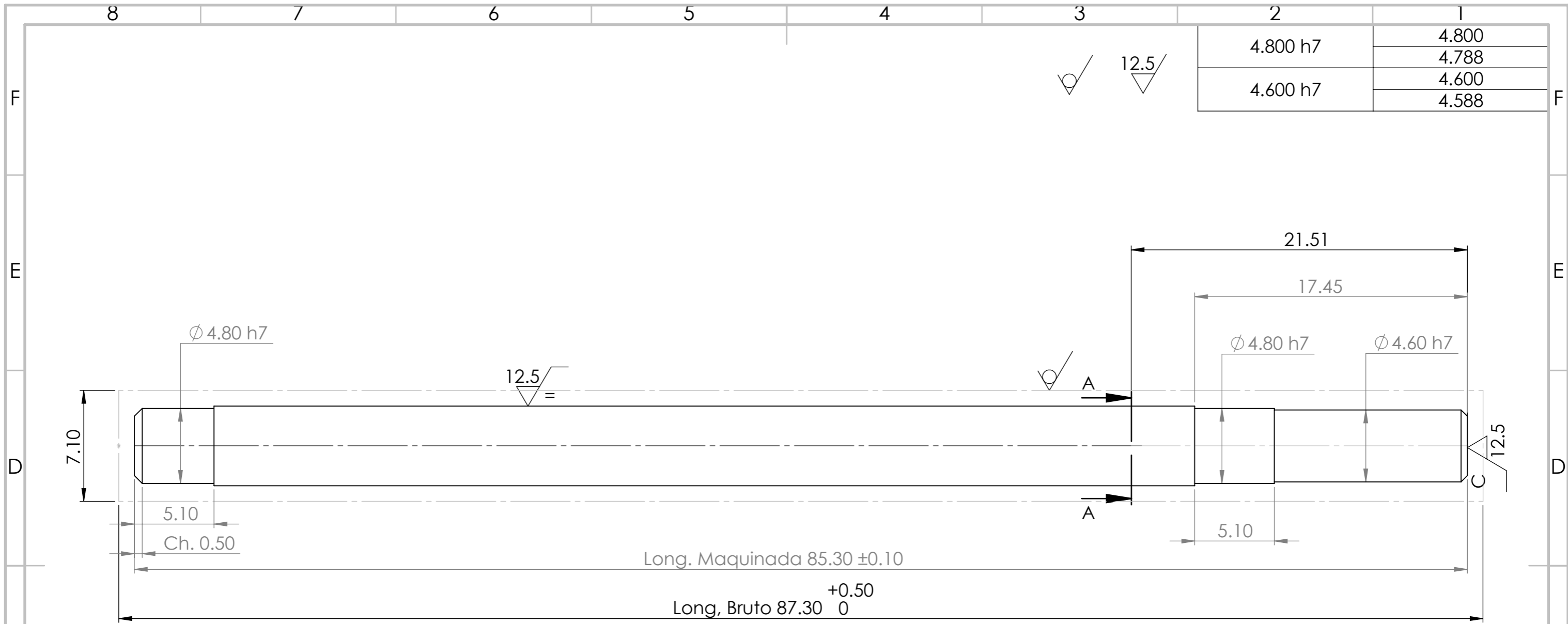
EJECUTÓ:
E.J.G.V

CIRCUITO DE ACTUADOR
SERVOMOTOR (MECÁNICO)

ESC:
2:1

ACOT:
mm

FECHA:
01/11/21

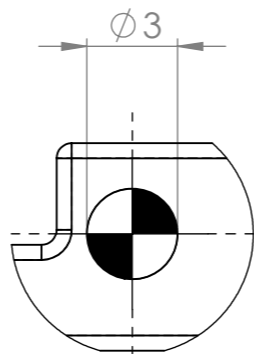
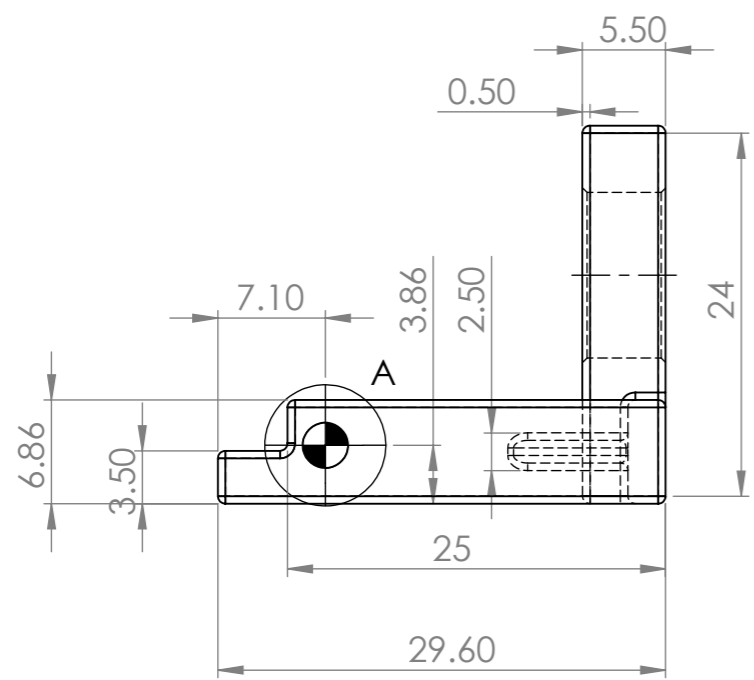


PARÁMETROS DE MECANIZADO

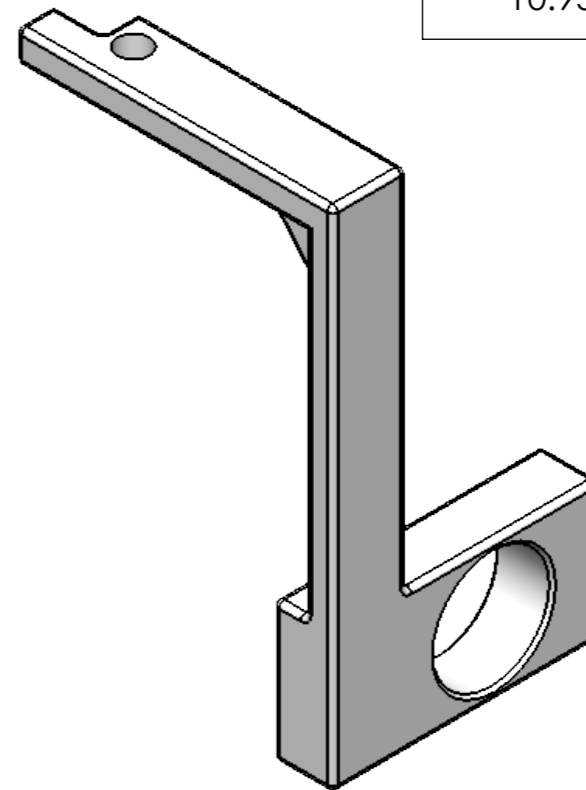
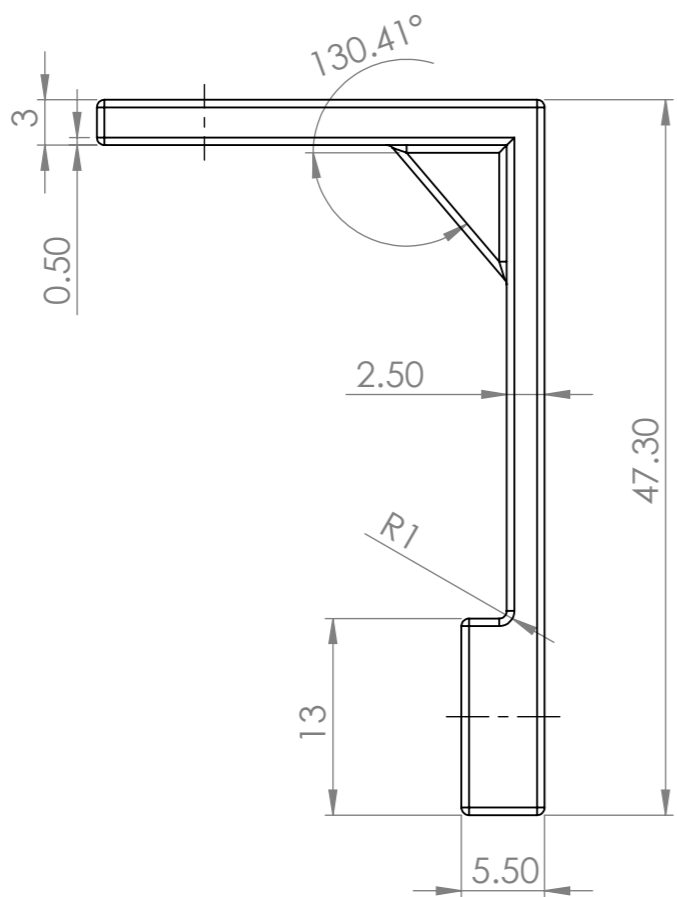
Material: Aluminio 2014-O
 Velocidad de corte= 61 m/min
 Avance= 0.40-0.75 mm

4.800 h7	4.800
	4.788
4.600 h7	4.600
	4.588

UNAM		DOC: 18	EJE DE POTENCIA MECÁNICO		
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 4:1	ACOT: mm	FECHA: 02/11/21

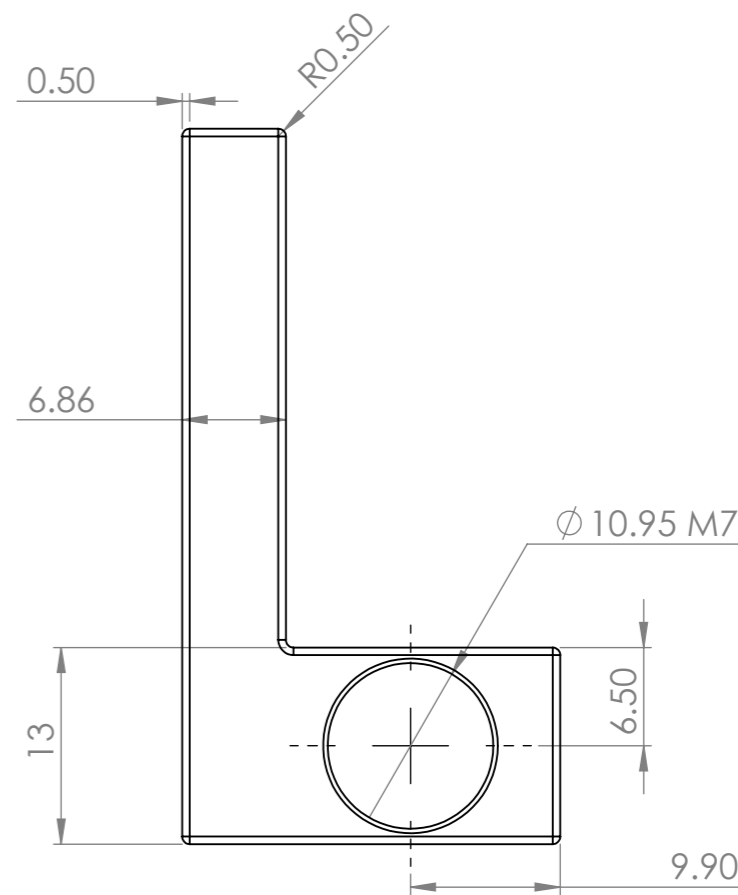


DETALLE A
ESCALA 4 : 1



10.950 M7

10.950
10.932



UNAM



DOC:
19

EJECUTÓ:
E.J.G.V

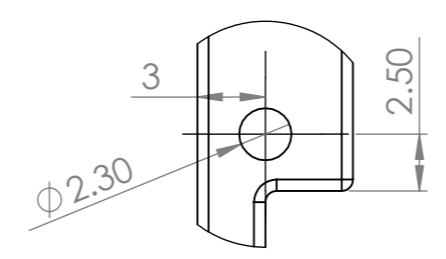
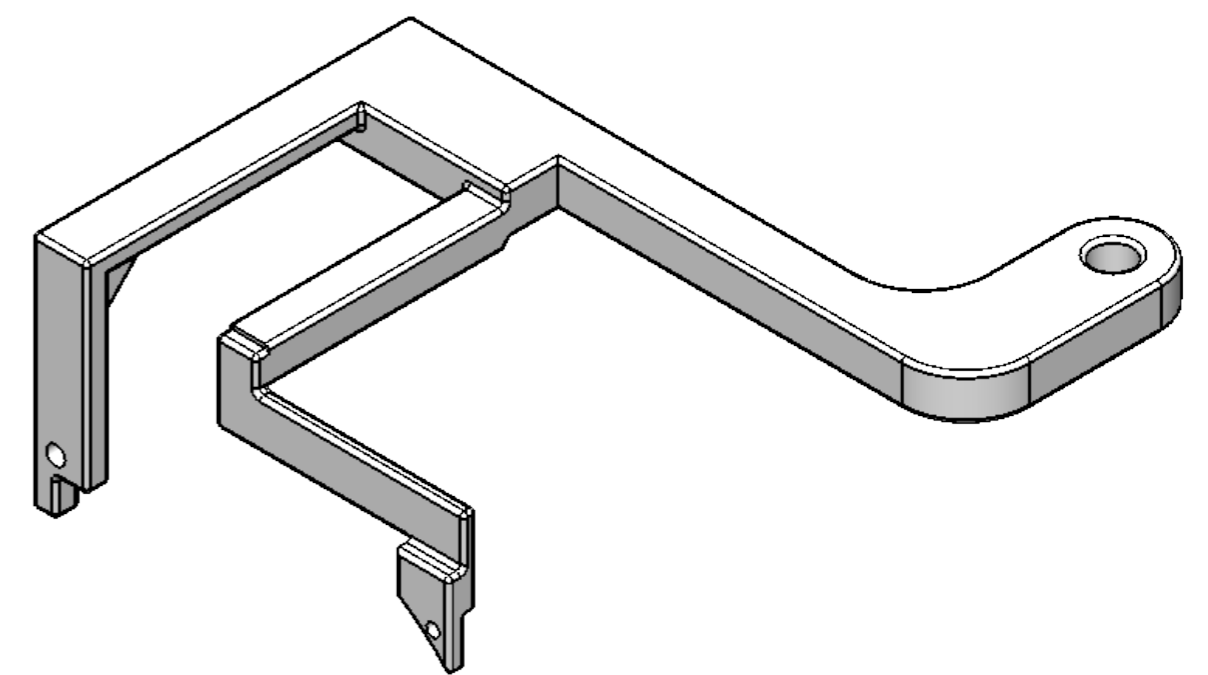
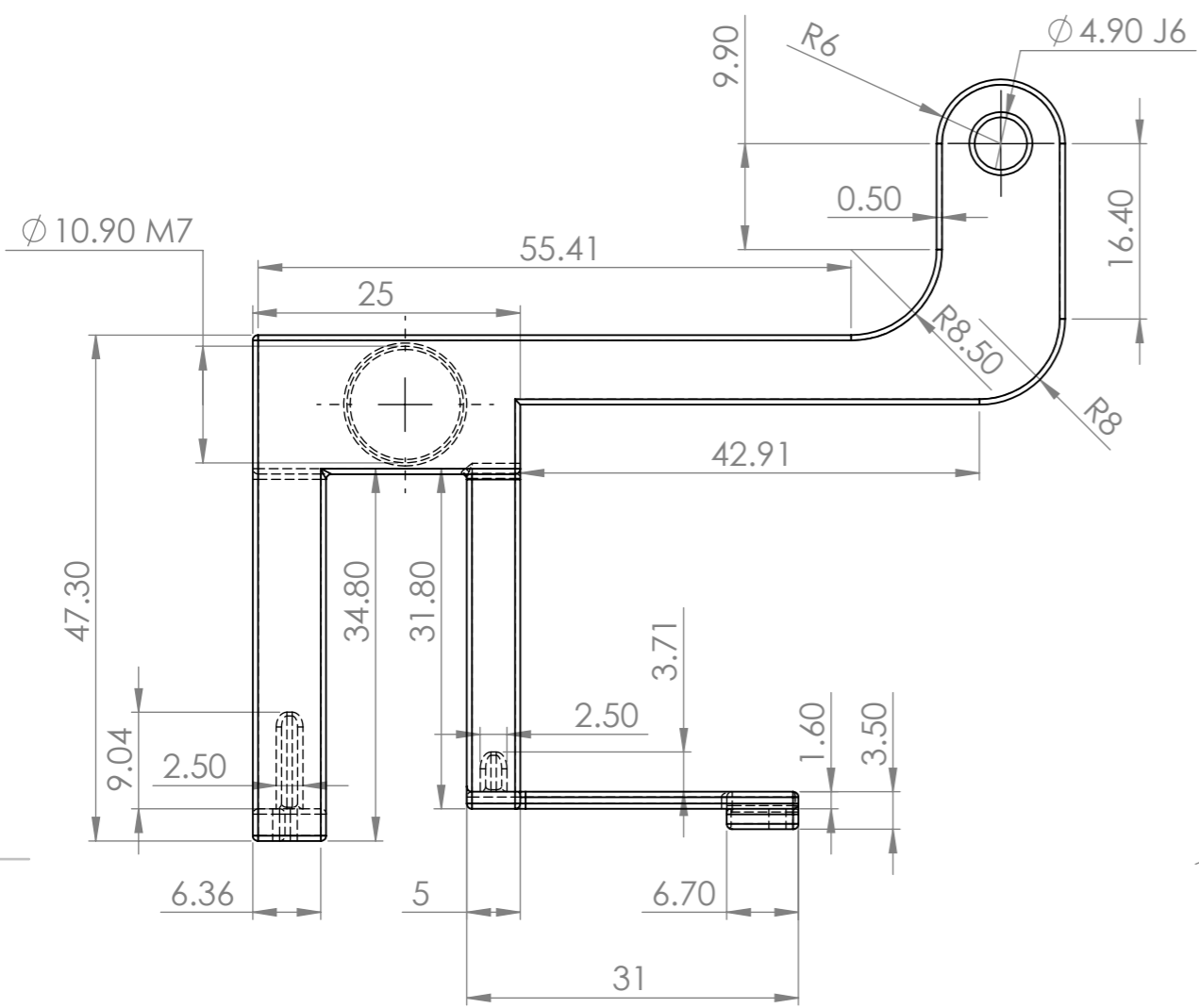
ESC:
2:1

ACOT:
mm

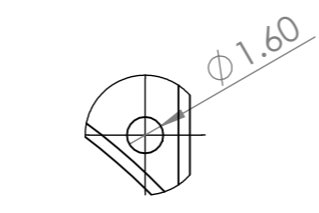
FECHA:
02/11/21

SOPORTE IZQUIERDO PARA
RODAMIENTO

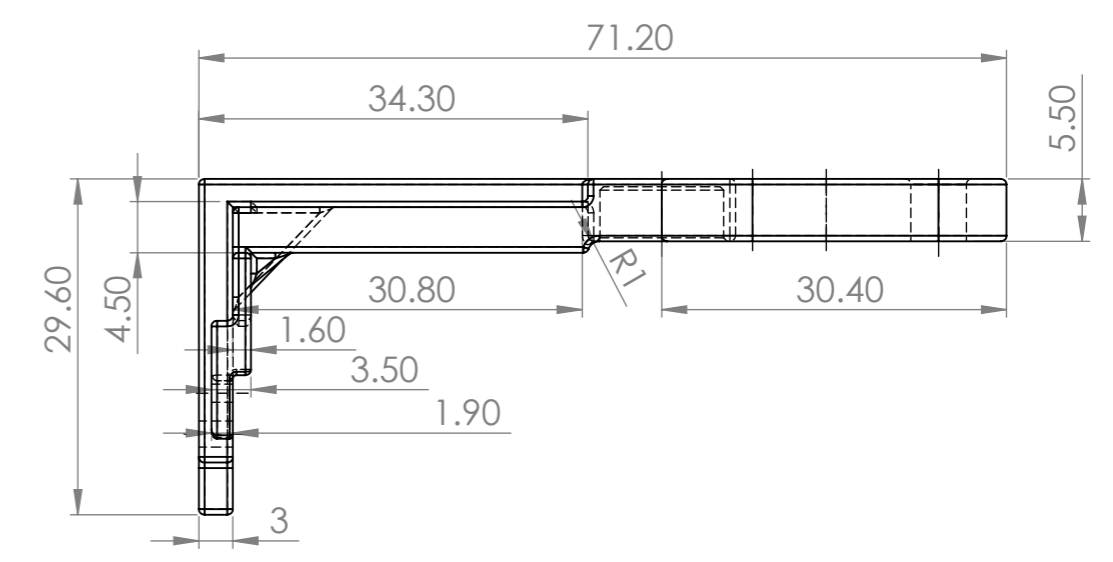
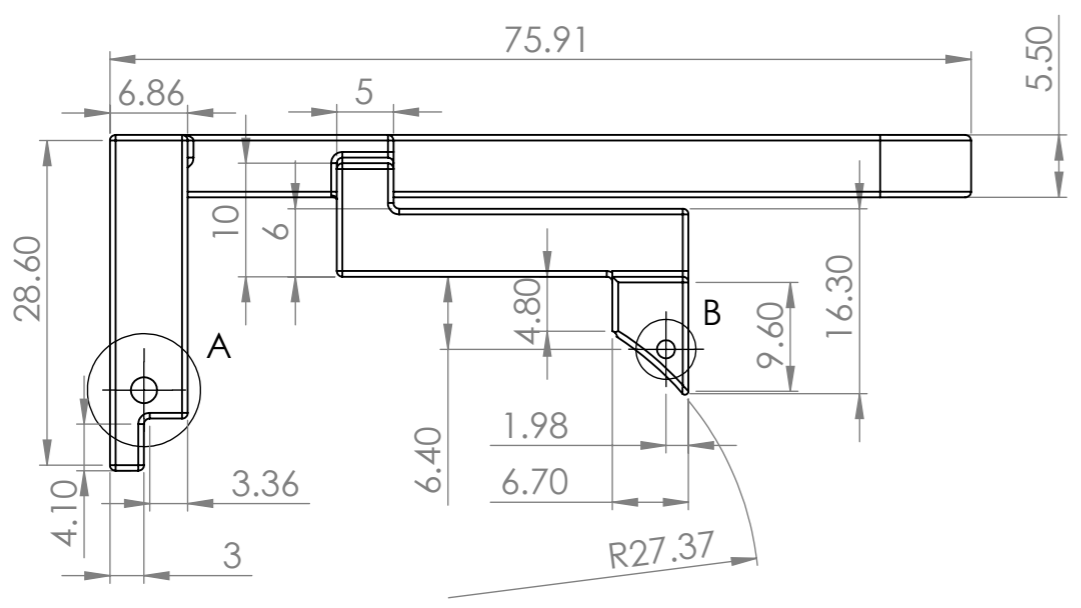
4.900 J6	4.905
	4.897
10.900 M7	10.900
	11.882



DETALLE A
ESCALA 3 : 1

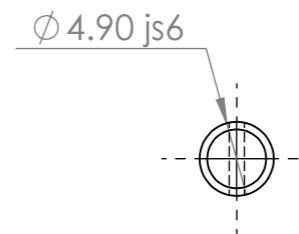
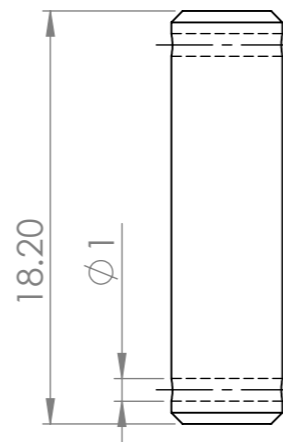
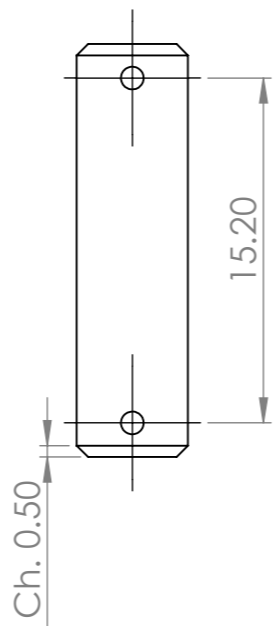
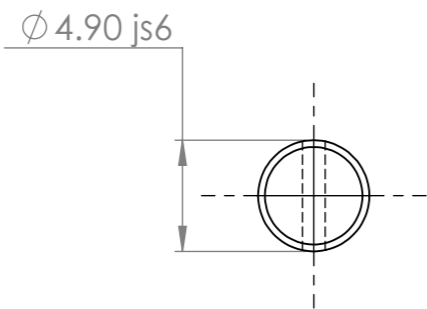
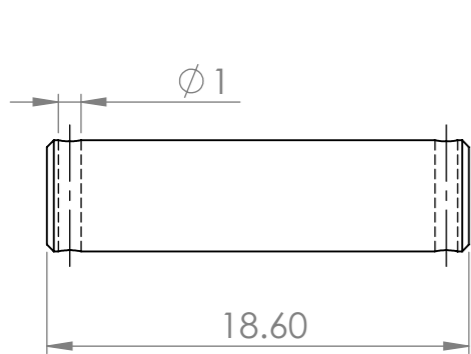
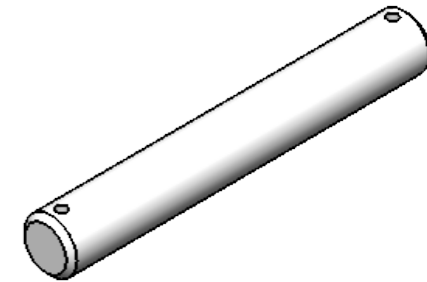
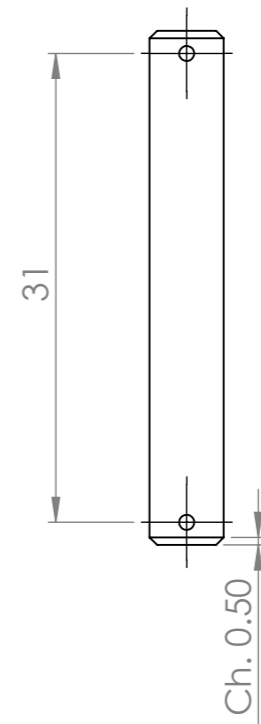
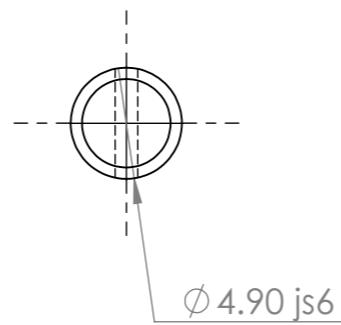
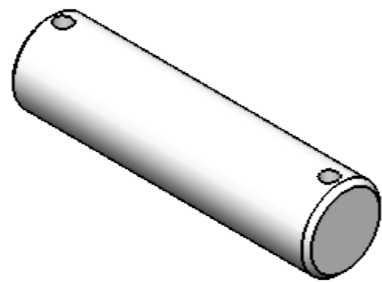
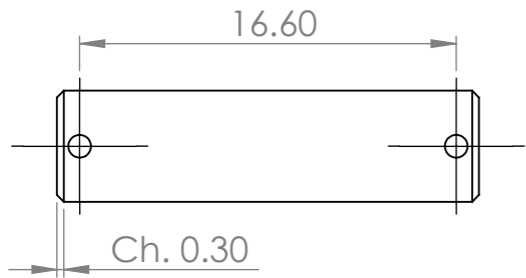


DETALLE B
ESCALA 3 : 1



UNAM		DOC: 20		SOPORTE DERECHO PARA RODAMIENTO Y JUNTA	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1.5:1	ACOT: mm	FECHA: 04/11/21

4.900 js6	4.904
	4.895

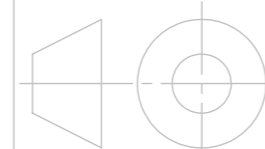


JUNTA MANIVELA

JUNTA OSCILADOR

**JUNTA BIELA-OSCILADOR
ESC 2:1**

UNAM



DOC:
21

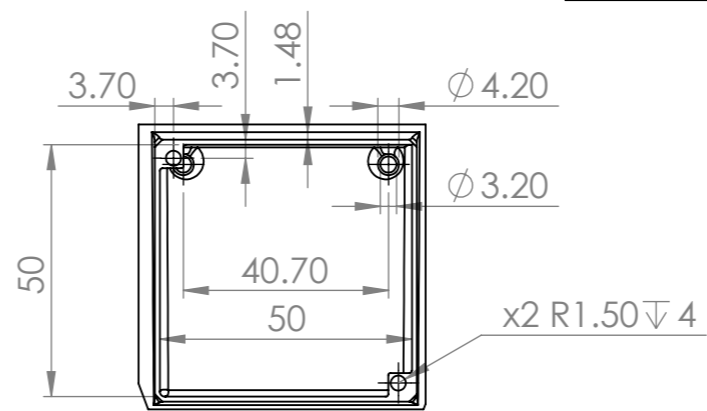
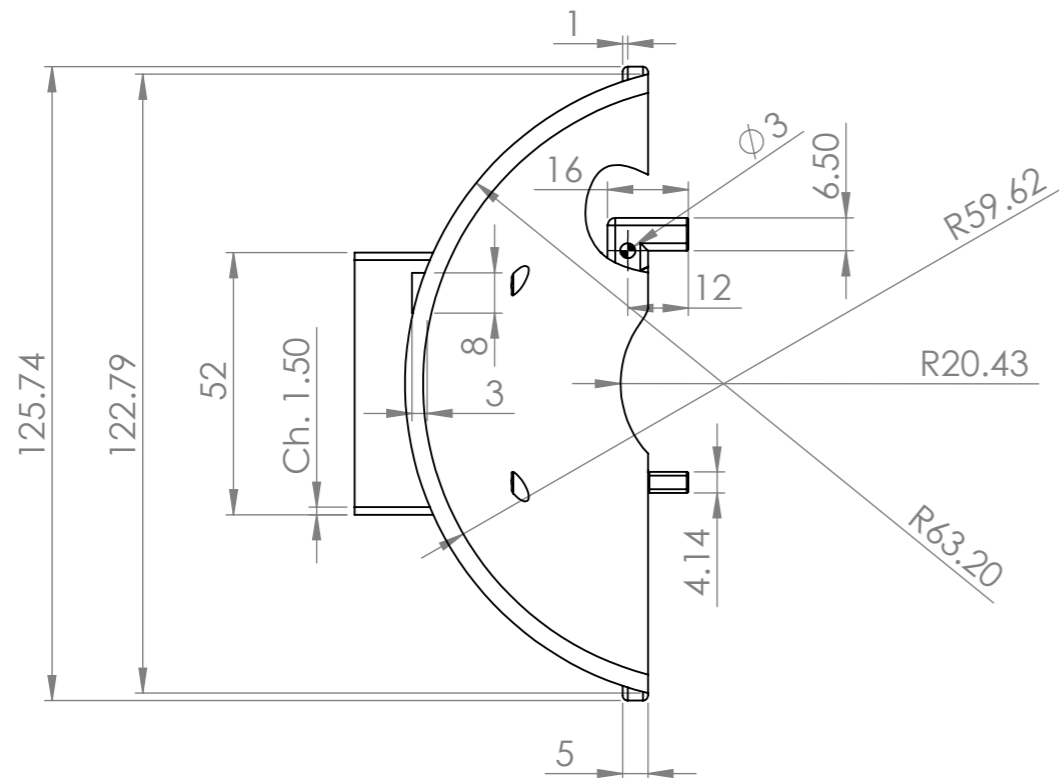
JUNTAS DE ROTACIÓN: MANIVELA,
BIELA-OSCILADOR Y OSCILADOR

EJECUTÓ:
E.J.G.V

ESC:
3:1

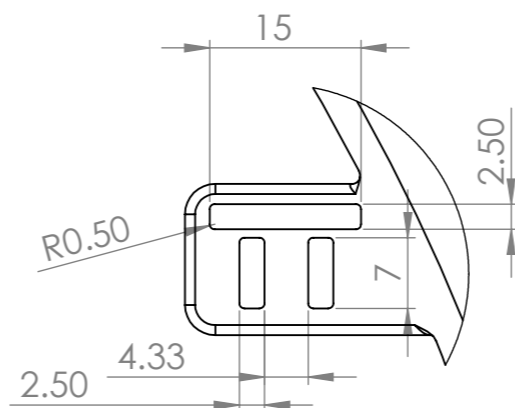
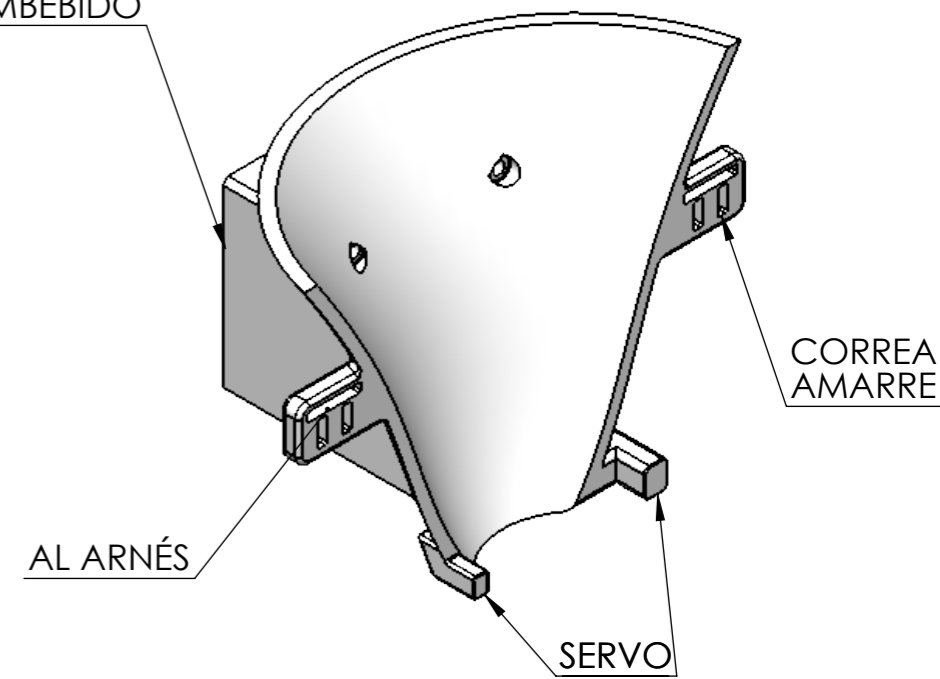
ACOT:
mm

FECHA:
06/11/21

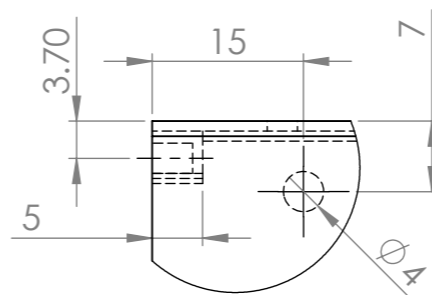
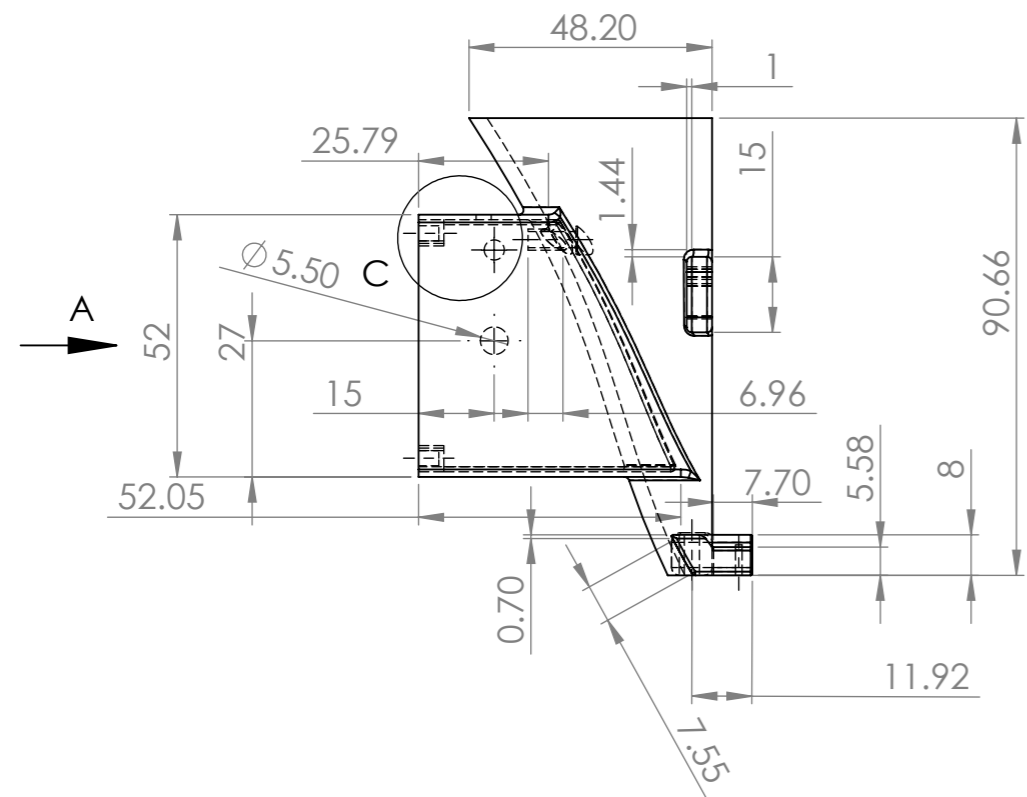


VISTA A
ESCALA 1 : 1.5

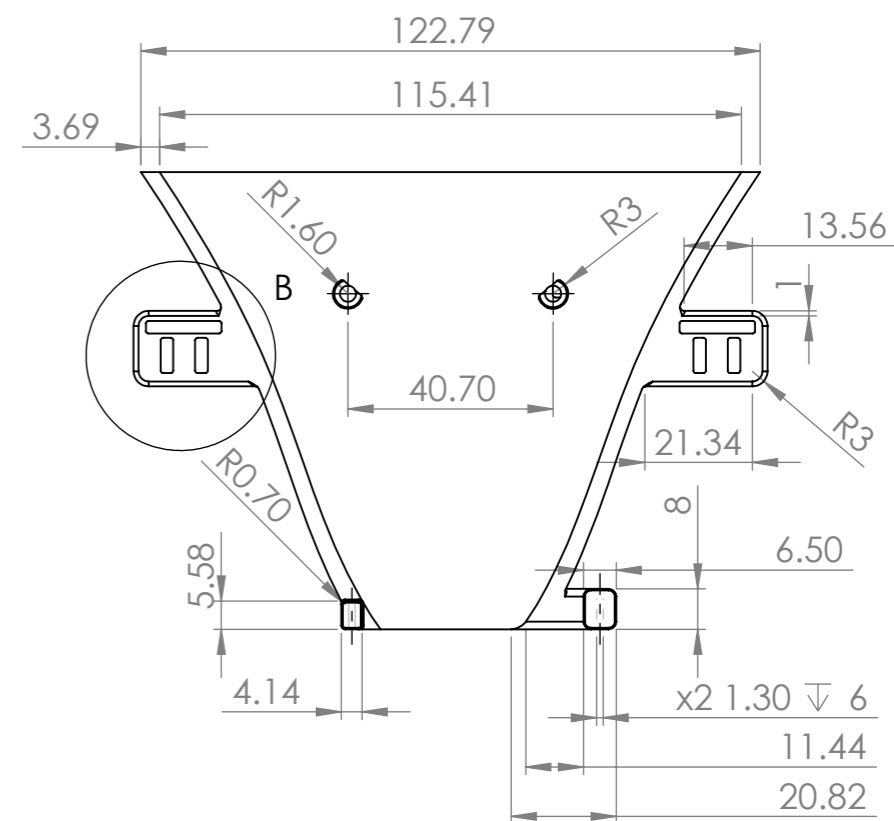
CIRC. EMBEBIDO



DETALLE B
ESCALA 2 : 1.5



DETALLE C
ESCALA 2 : 1.5



A

UNAM



DOC:
22

EJECUTÓ:
E.J.G.V

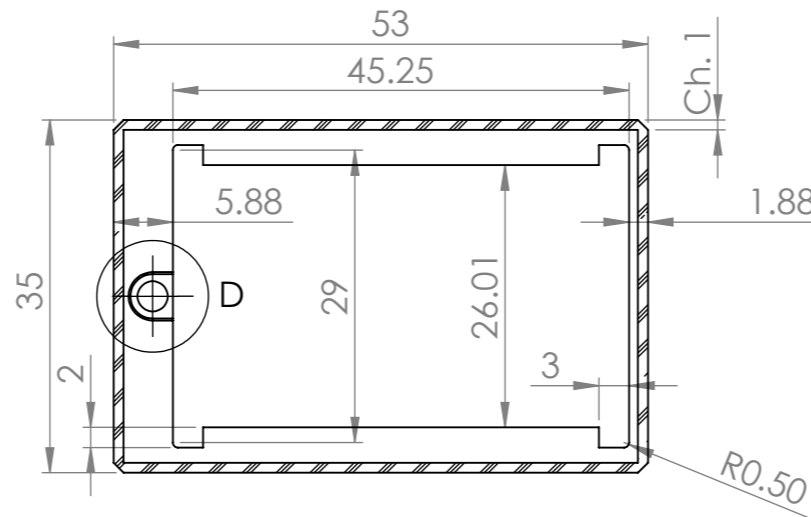
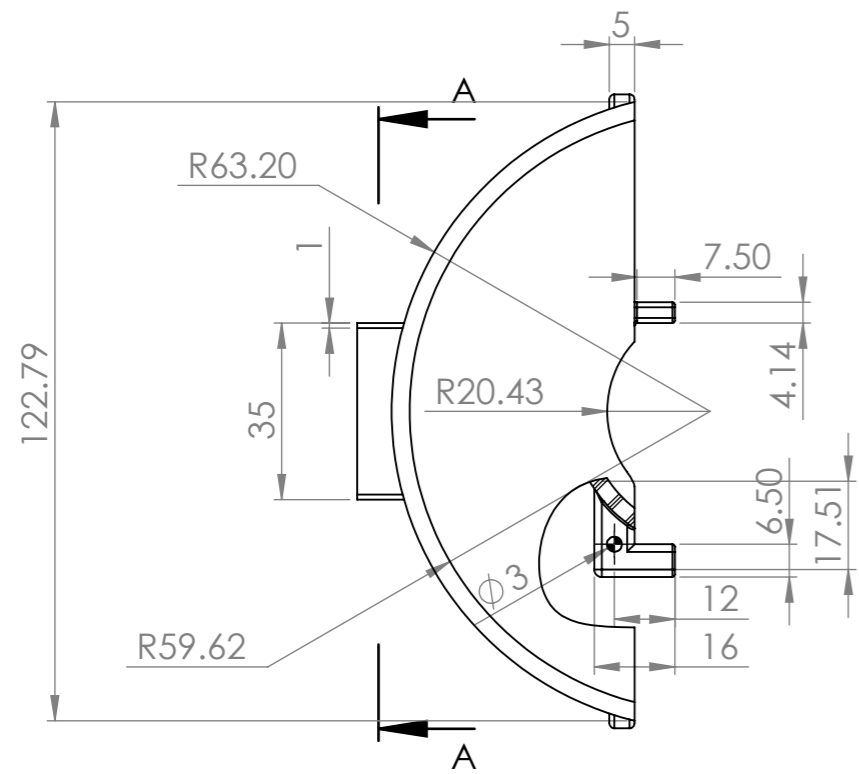
ADAPTADOR DE MECANISMO
(PARA CIRC. EMBEBIDO)

ESC:
1:1.5

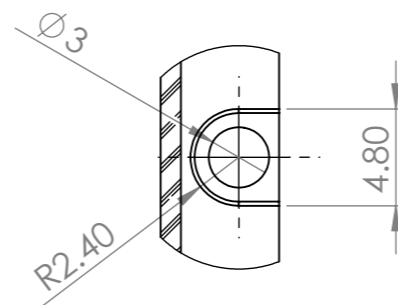
ACOT:
mm

FECHA:
10/11/21

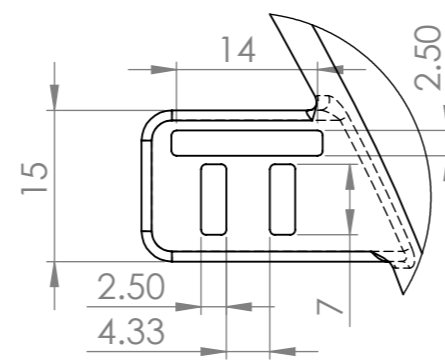
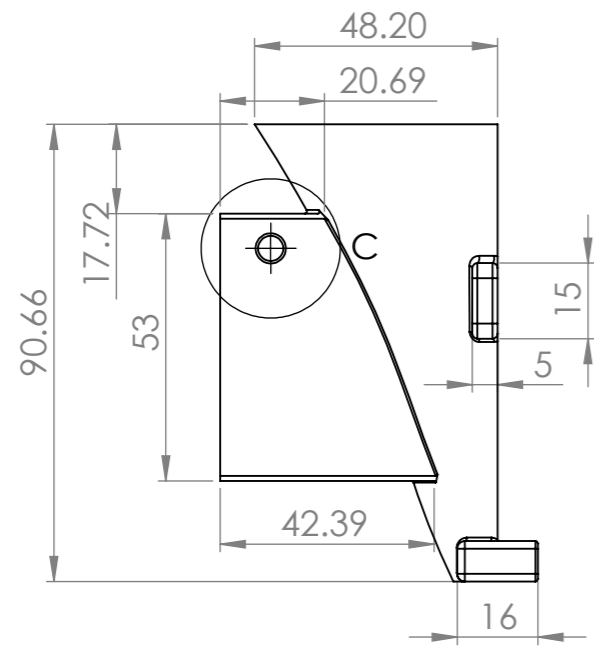
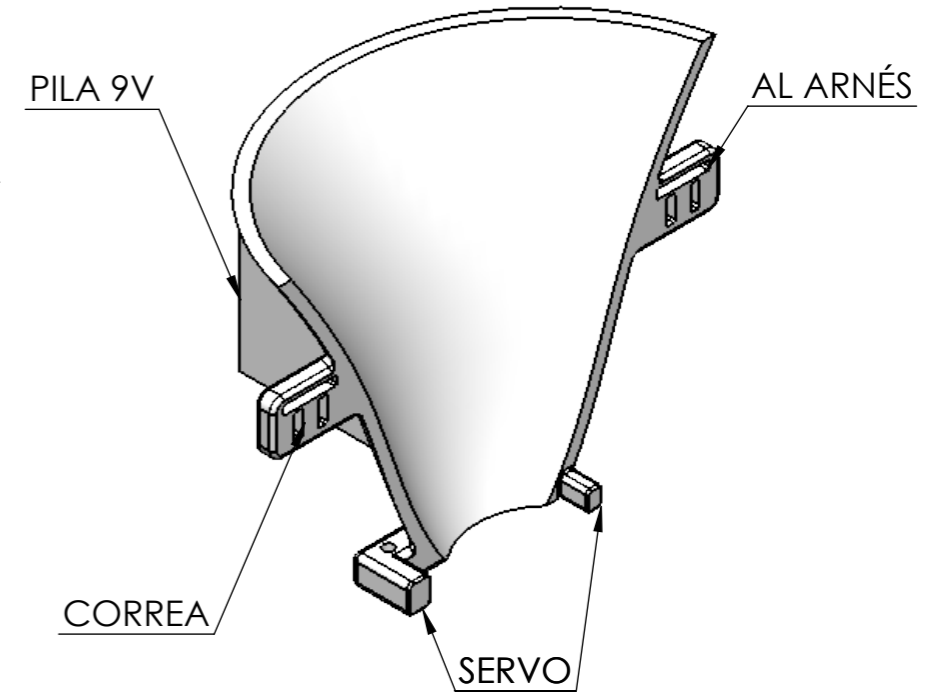
A



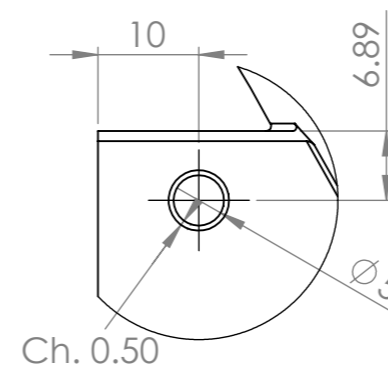
SECCIÓN A-A
ESCALA 2 : 1.5



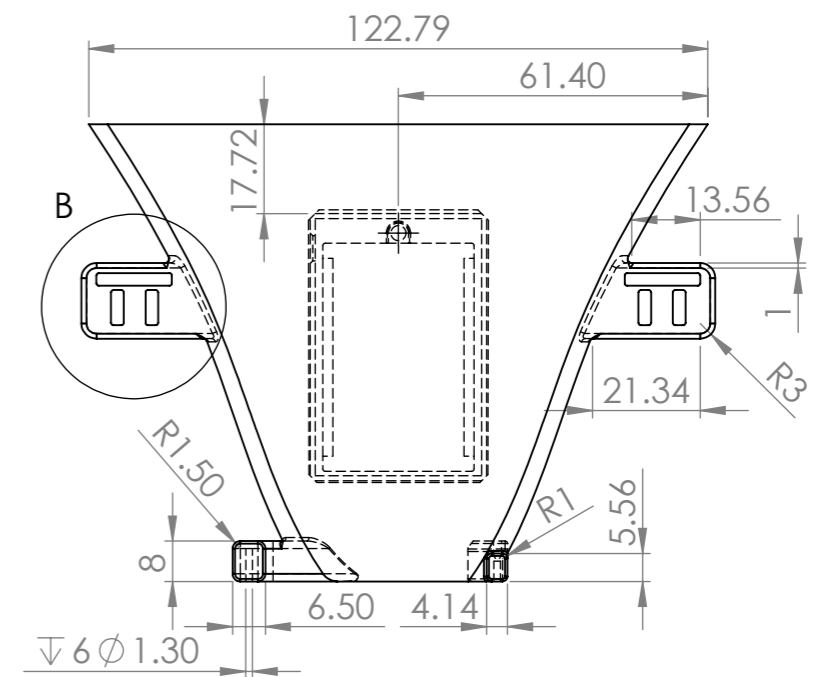
DETALLE D
ESCALA 4 : 1.5



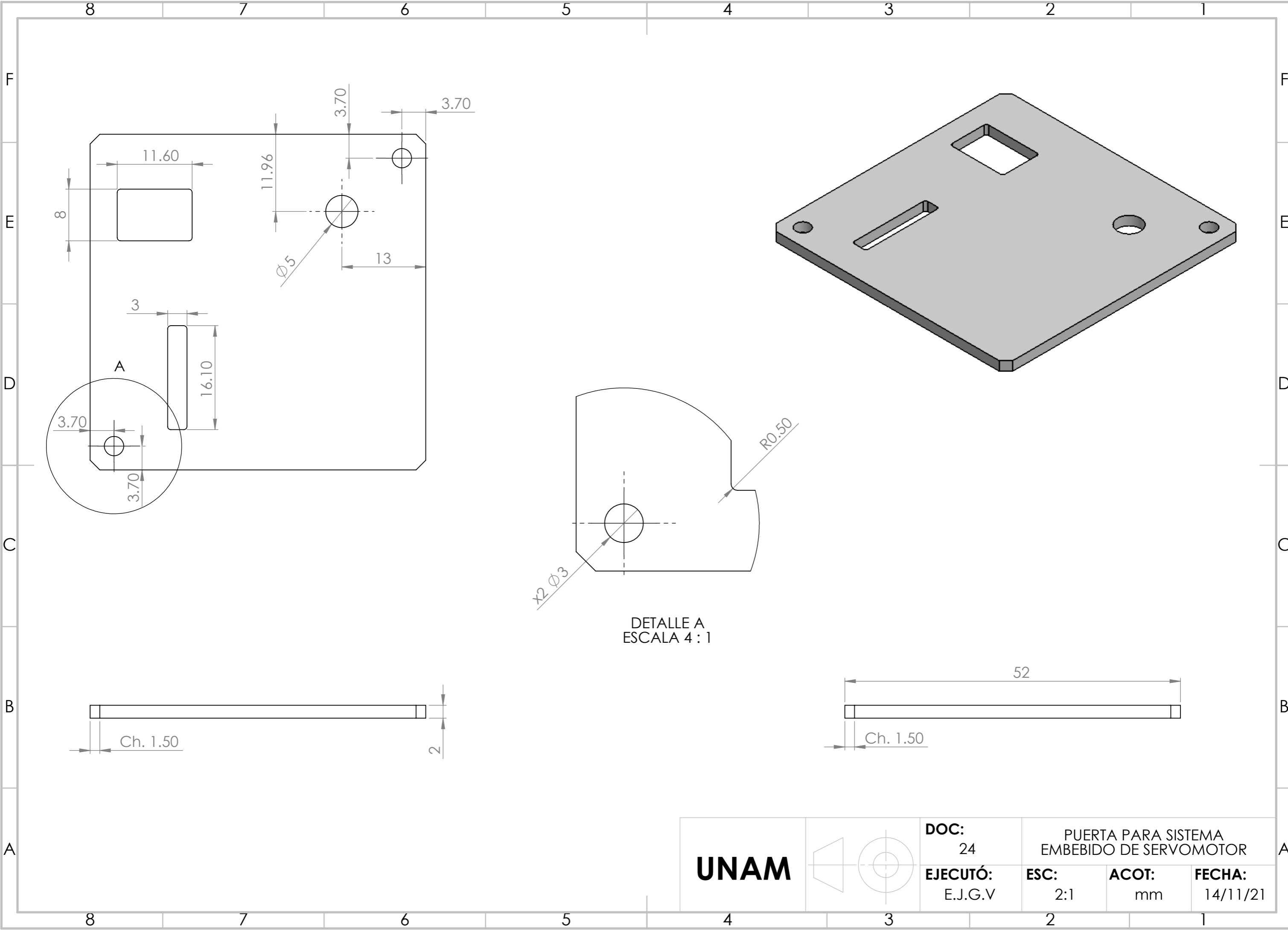
DETALLE B
ESCALA 2 : 1.5



DETALLE C
ESCALA 2 : 1.5

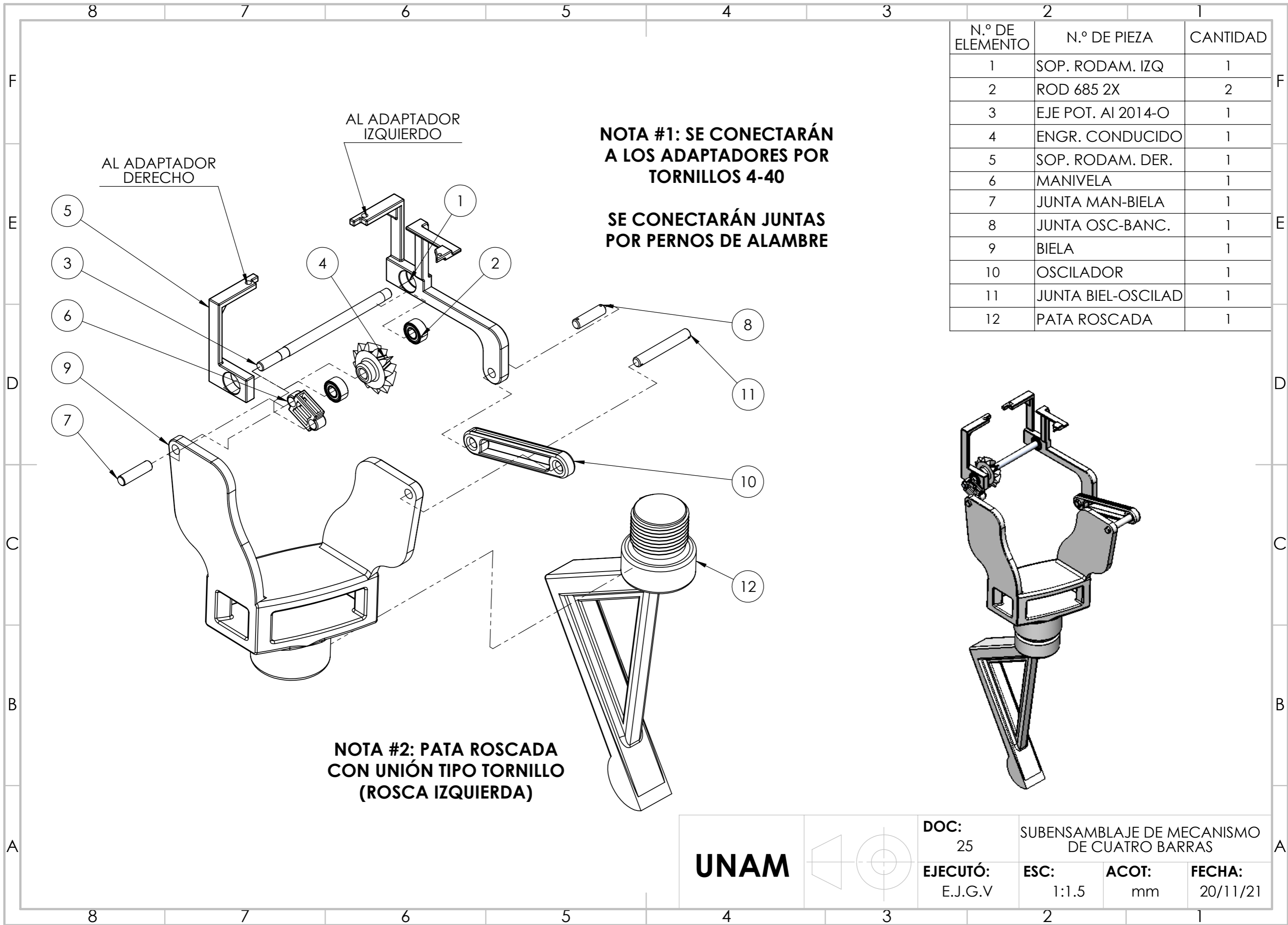


UNAM		DOC: 23		ADAPTADOR DE MECANISMO (PARA BATERÍA)	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1:1.5	ACOT: mm	FECHA: 12/11/21



DETALLE A
ESCALA 4 : 1

UNAM		DOC: 24				PUERTA PARA SISTEMA EMBEBIDO DE SERVOMOTOR	
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 2:1	ACOT: mm	FECHA: 14/11/21		

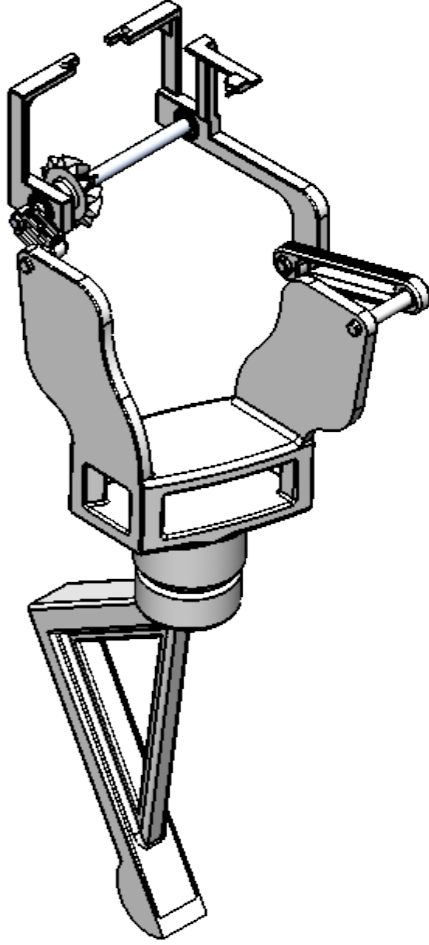


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	SOP. RODAM. IZQ	1
2	ROD 685 2X	2
3	EJE POT. AI 2014-O	1
4	ENGR. CONDUCTIDO	1
5	SOP. RODAM. DER.	1
6	MANIVELA	1
7	JUNTA MAN-BIELA	1
8	JUNTA OSC-BANC.	1
9	BIELA	1
10	OSCILADOR	1
11	JUNTA BIEL-OSCILAD	1
12	PATA ROSCADA	1

NOTA #1: SE CONECTARÁN A LOS ADAPTADORES POR TORNILLOS 4-40

SE CONECTARÁN JUNTAS POR PERNOS DE ALAMBRE

NOTA #2: PATA ROSCADA CON UNIÓN TIPO TORNILLO (ROSCA IZQUIERDA)



UNAM



DOC:
25

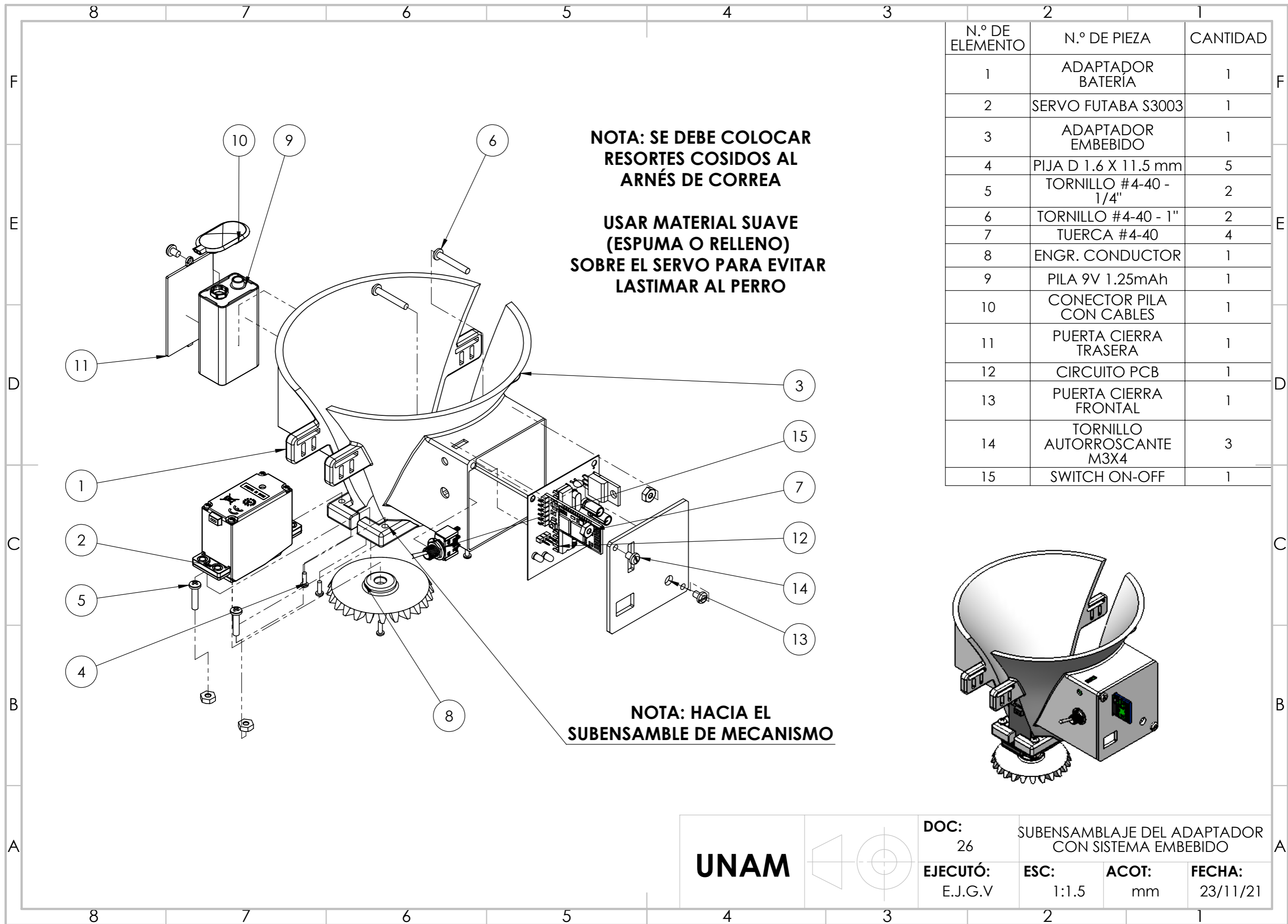
EJECUTÓ:
E.J.G.V

SUBENSAMBLAJE DE MECANISMO DE CUATRO BARRAS

ESC:
1:1.5

ACOT:
mm

FECHA:
20/11/21

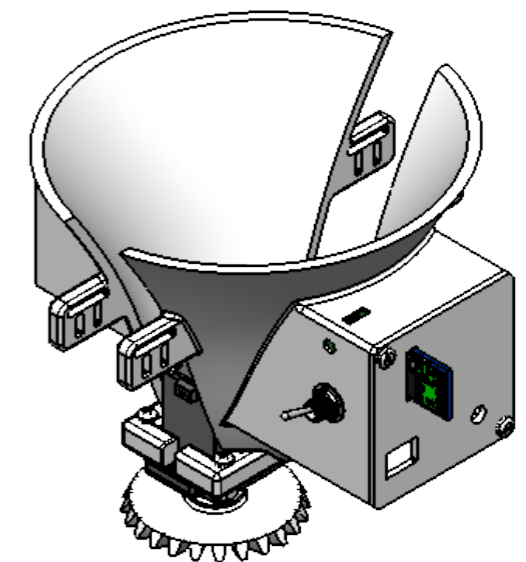


NOTA: SE DEBE COLOCAR RESORTES COSIDOS AL ARNÉS DE CORREA

USAR MATERIAL SUAVE (ESPUMA O RELLENO) SOBRE EL SERVO PARA EVITAR LASTIMAR AL PERRO

NOTA: HACIA EL SUBENSAMBLE DE MECANISMO

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	ADAPTADOR BATERÍA	1
2	SERVO FUTABA S3003	1
3	ADAPTADOR EMBEBIDO	1
4	PIJA D 1.6 X 11.5 mm	5
5	TORNILLO #4-40 - 1/4"	2
6	TORNILLO #4-40 - 1"	2
7	TUERCA #4-40	4
8	ENGR. CONDUCTOR	1
9	PILA 9V 1.25mAh	1
10	CONECTOR PILA CON CABLES	1
11	PUERTA CIERRA TRASERA	1
12	CIRCUITO PCB	1
13	PUERTA CIERRA FRONTAL	1
14	TORNILLO AUTORROSCANTE M3X4	3
15	SWITCH ON-OFF	1



UNAM		DOC: 26	SUBENSAMBLAJE DEL ADAPTADOR CON SISTEMA EMBEBIDO		
		EJECUTÓ: E.J.G.V	ESC: 1:1.5	ACOT: mm	FECHA: 23/11/21

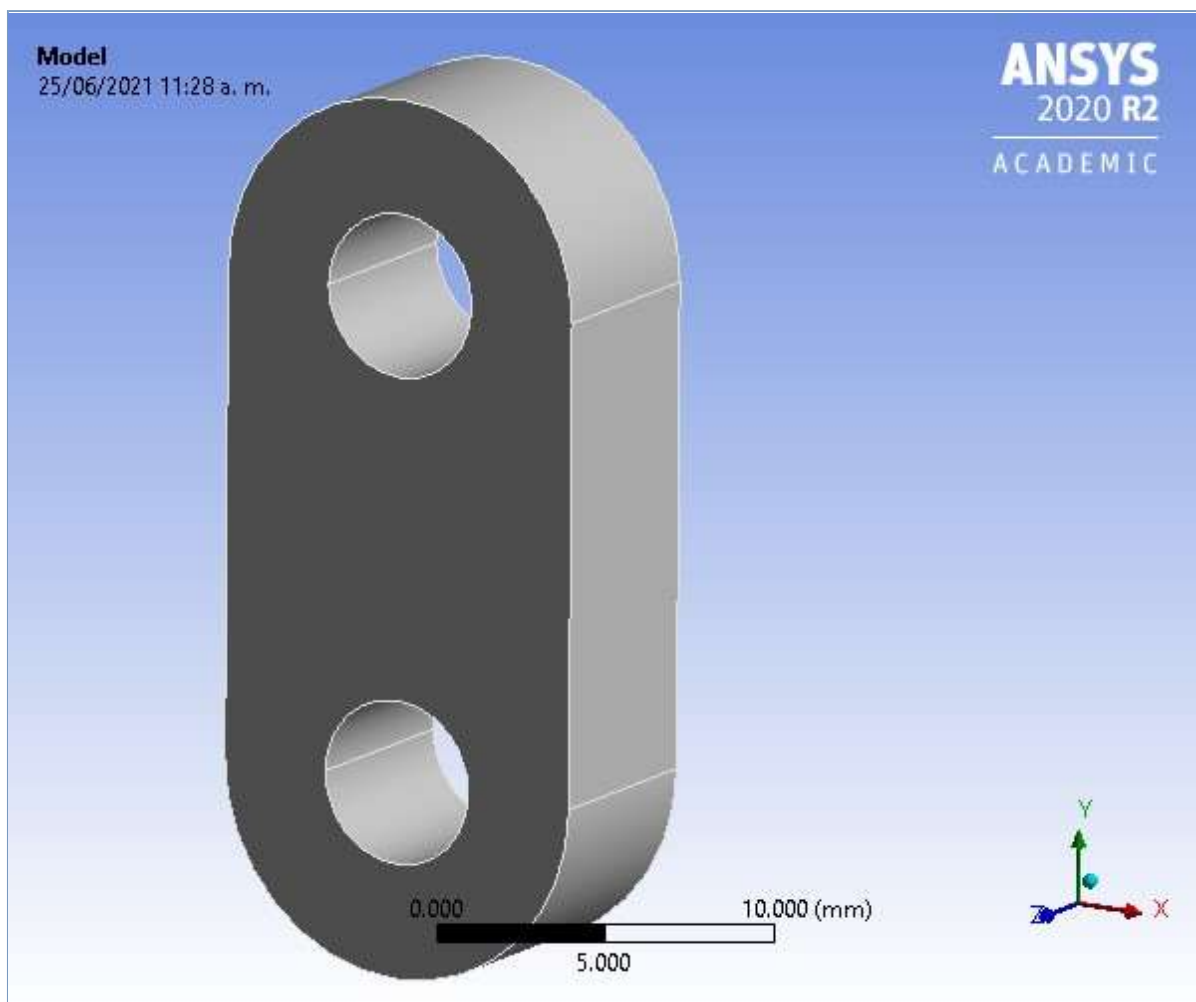
ANEXO 4

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE MECANISMO



Project

First Saved	Friday, June 25, 2021
Last Saved	Friday, June 25, 2021
Product Version	2020 R2
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



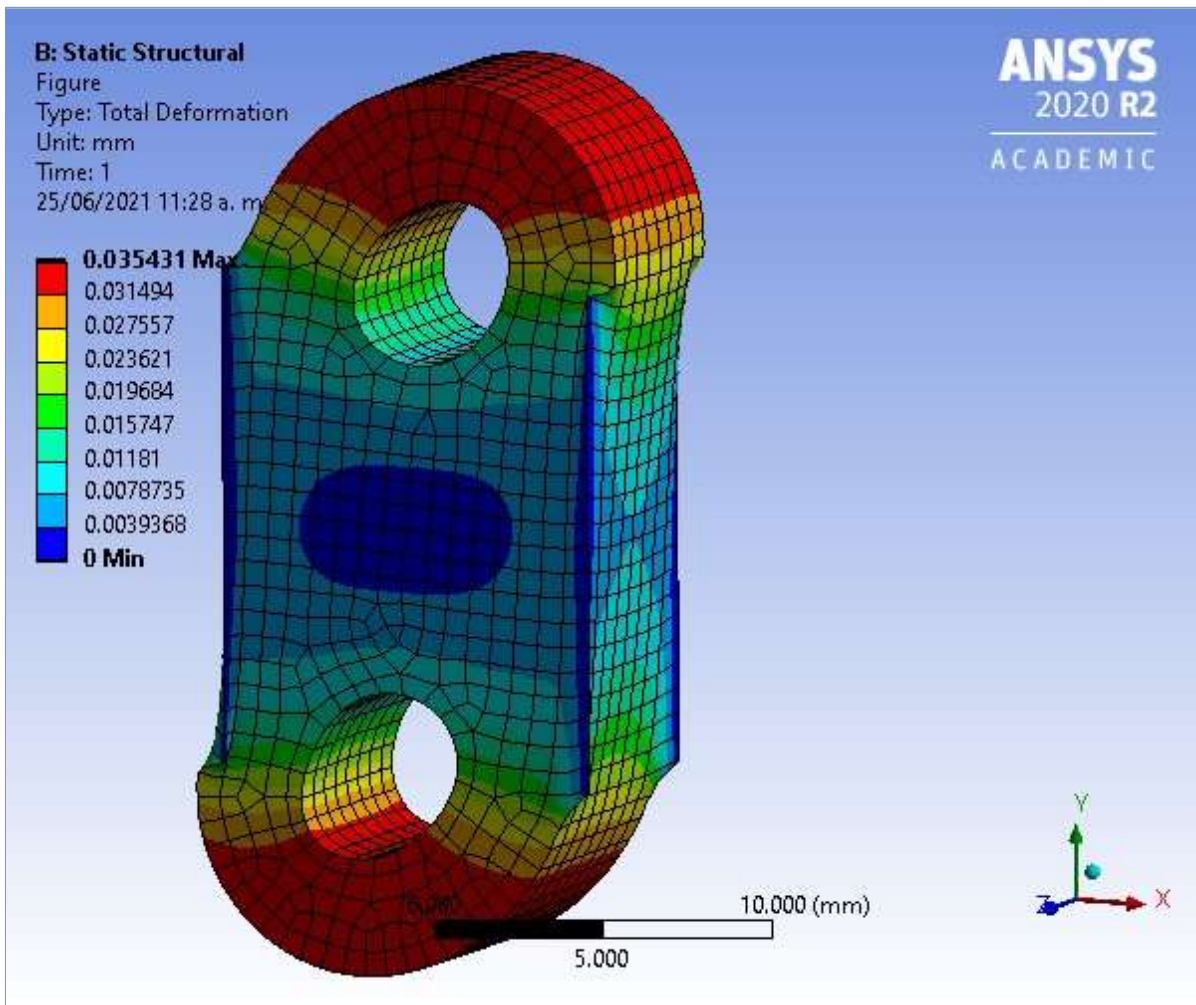


FIGURE 5
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Normal Stress

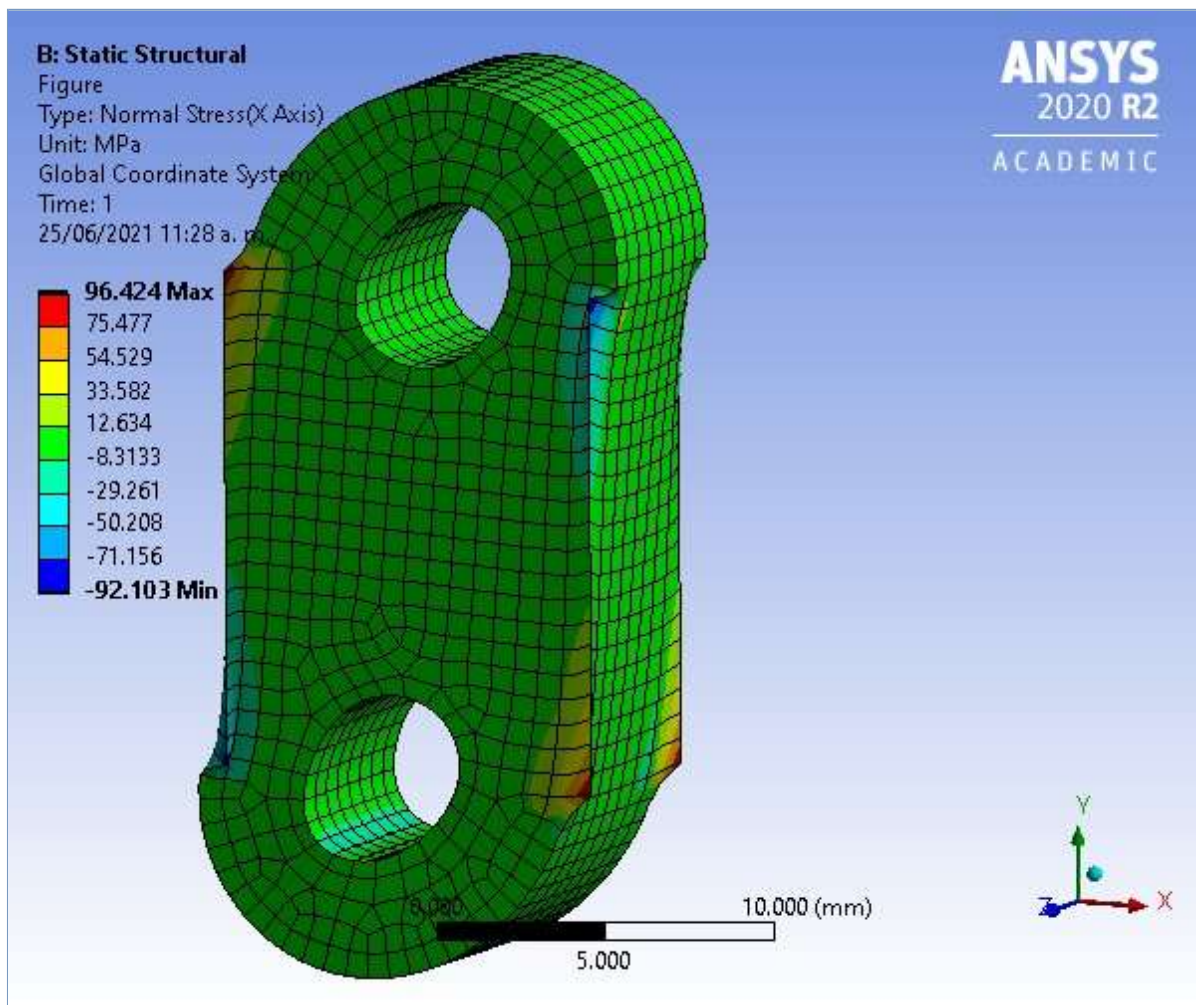
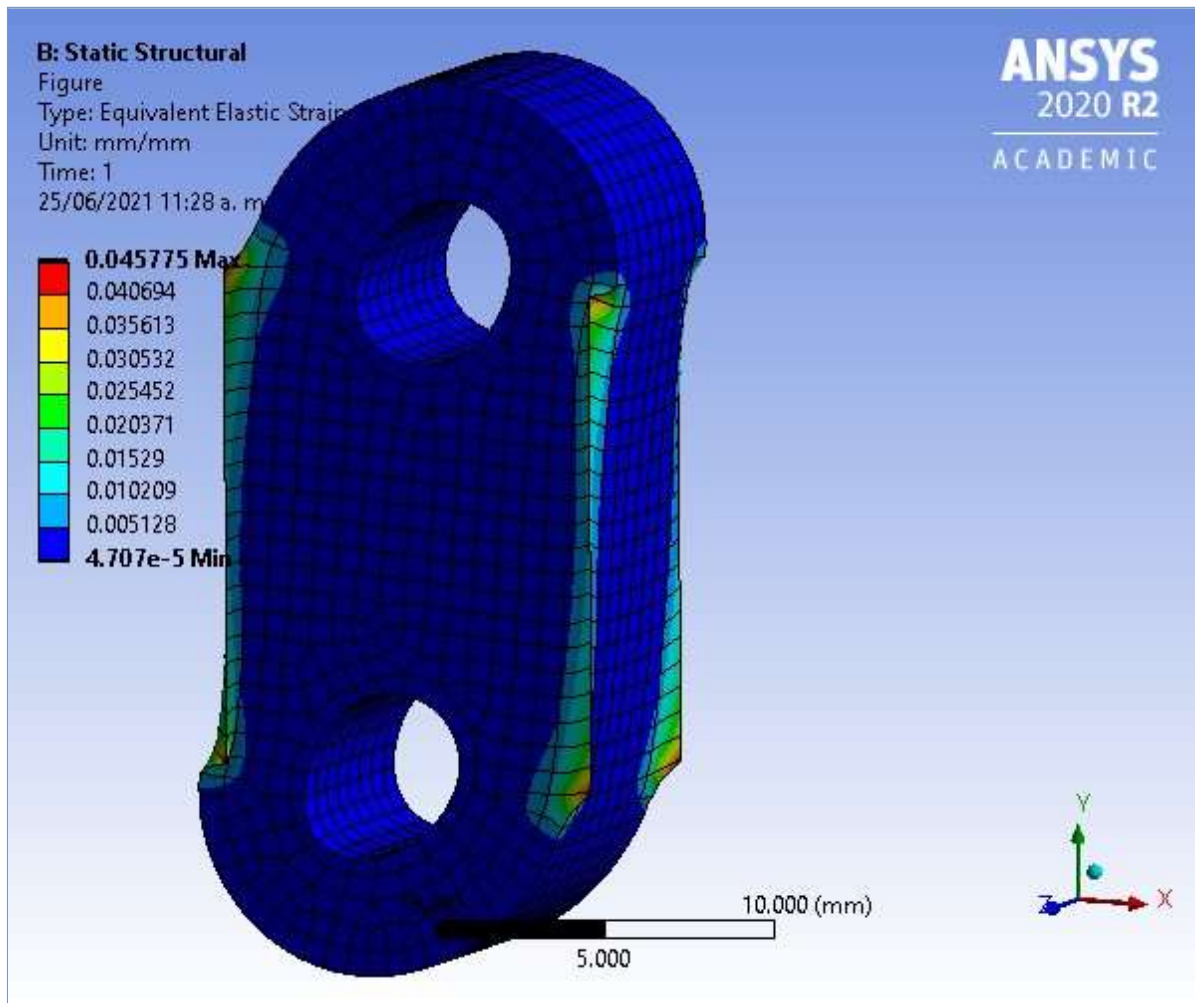


FIGURE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Elastic Strain



Material Data

PLA

TABLE 18
PLA > Constants

Density	1.24e-006 kg mm ⁻³
Thermal Conductivity	1.3e-004 W mm ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 19
PLA > Color

Red	Green	Blue
181	194	156

TABLE 20
PLA > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
3500	0.3	2916.7	1346.2	50

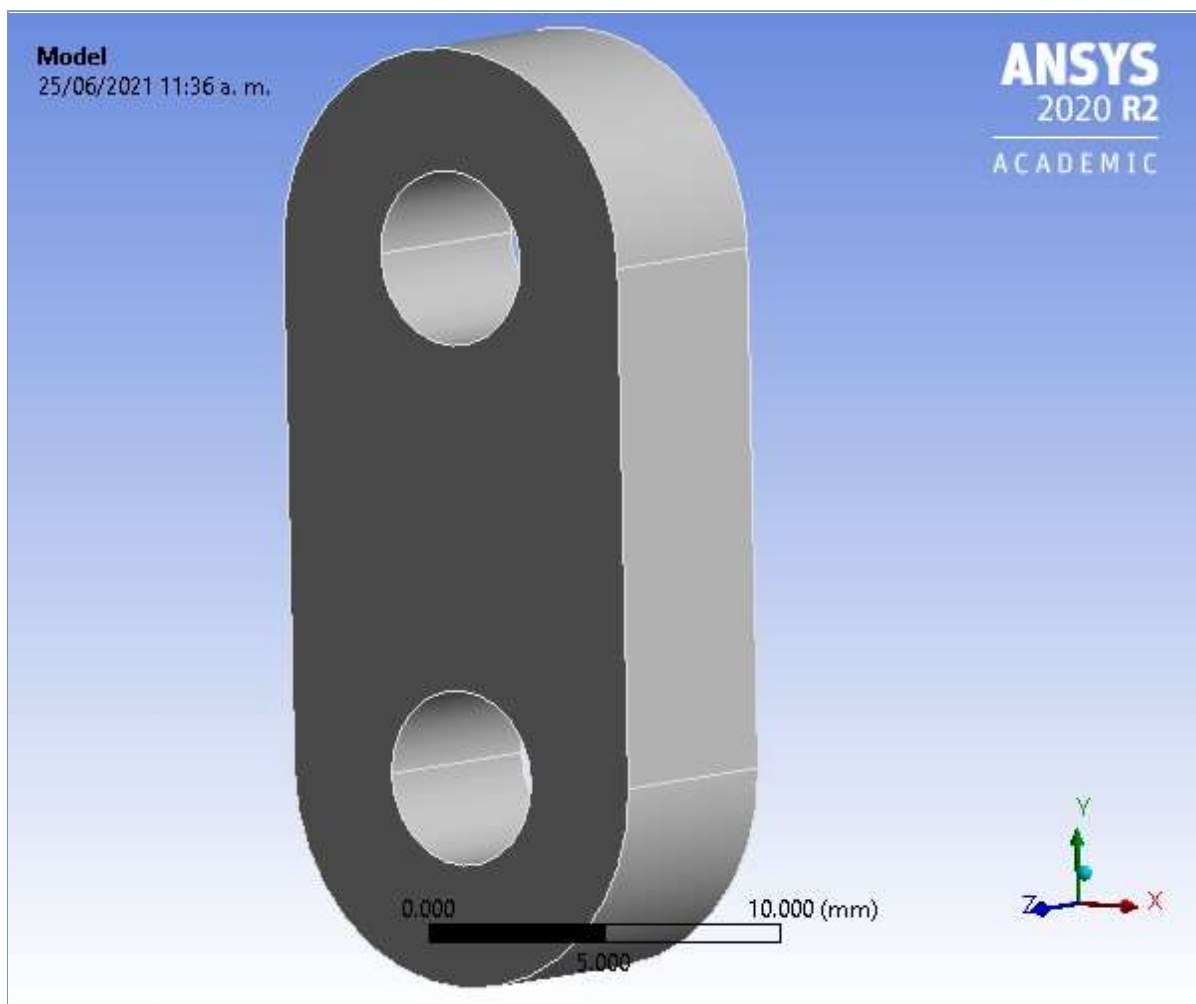
TABLE 21
PLA > Melting Temperature

Melting Temperature C



Project

First Saved	Friday, June 25, 2021
Last Saved	Friday, June 25, 2021
Product Version	2020 R2
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



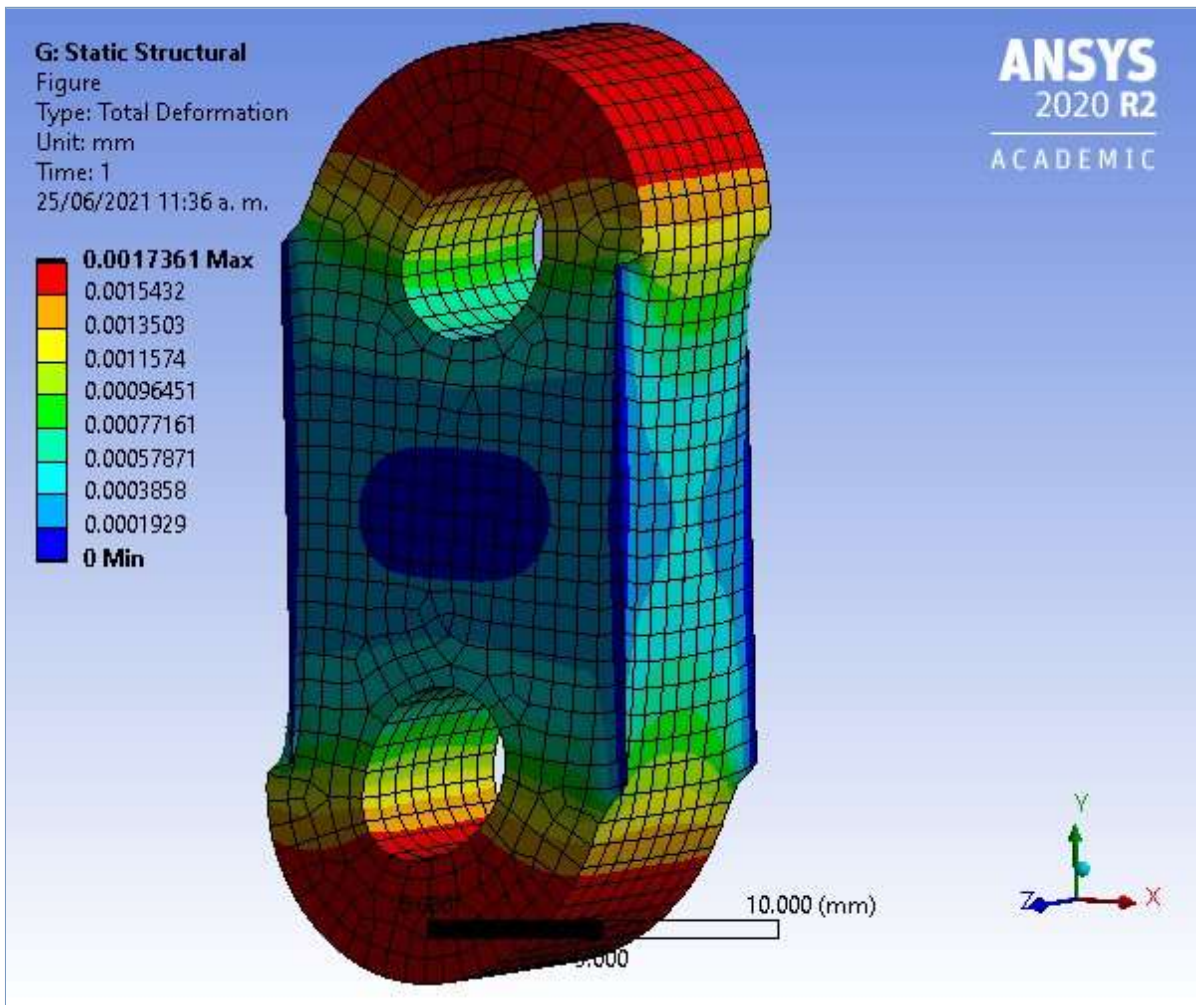


FIGURE 5
Model (G4) > Static Structural (G5) > Solution (G6) > Equivalent Stress

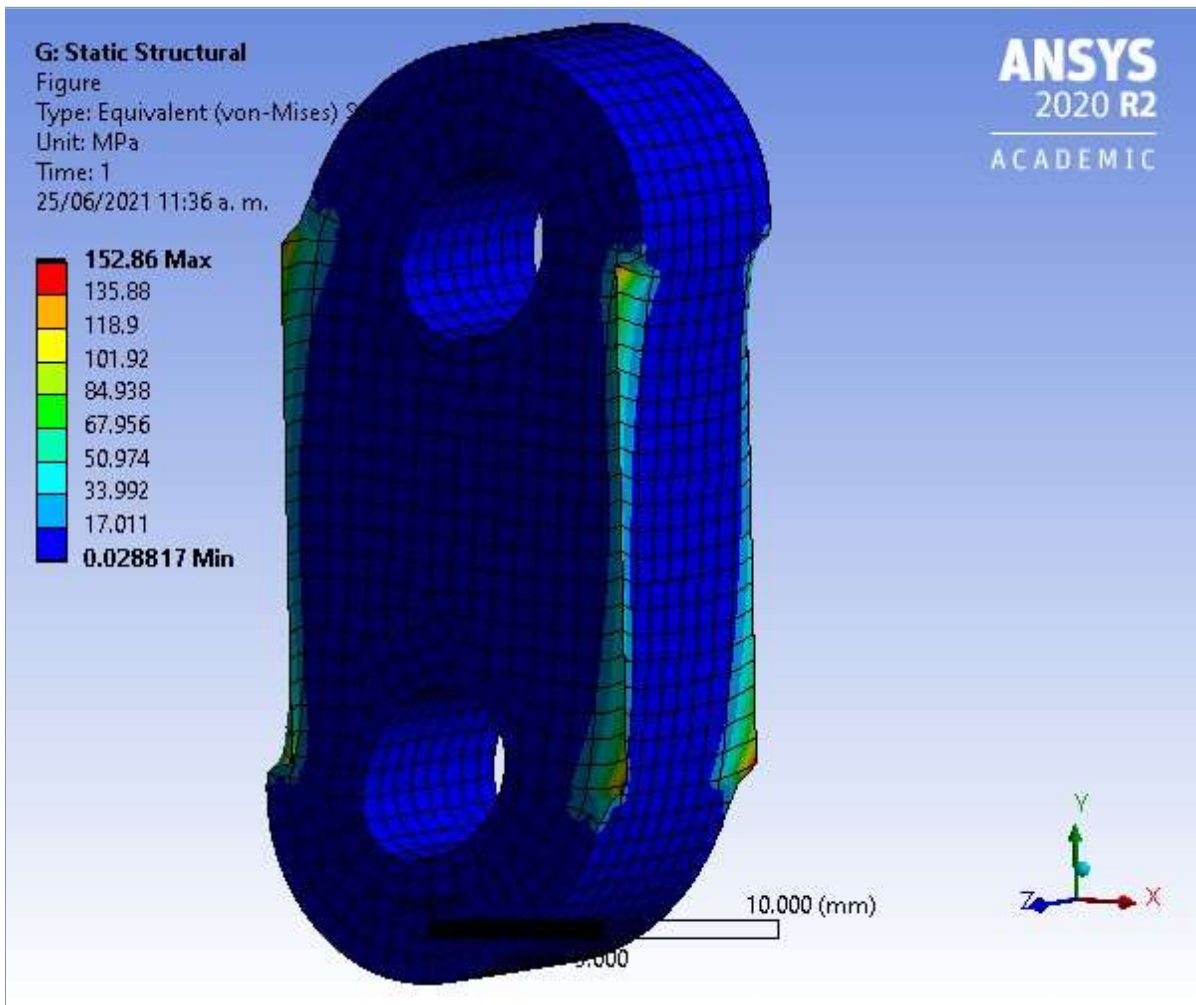
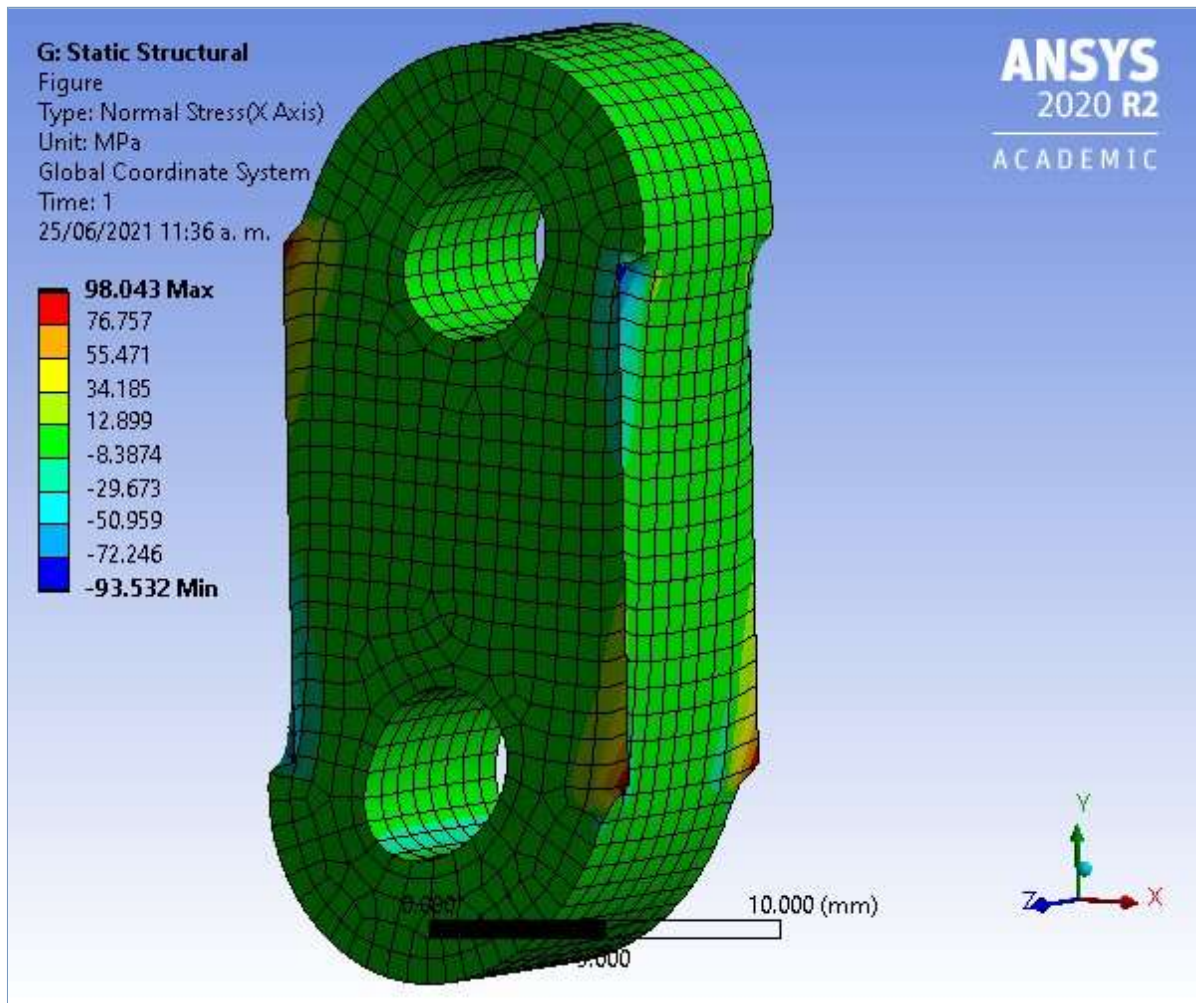


FIGURE 7
Model (G4) > Static Structural (G5) > Solution (G6) > Normal Stress



Material Data

Aluminum Alloy NL

TABLE 18
Aluminum Alloy NL > Constants

Density	2.77e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat	8.75e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 19
Aluminum Alloy NL > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
71000	0.33	69608	26692	

TABLE 20
Aluminum Alloy NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
280	500	

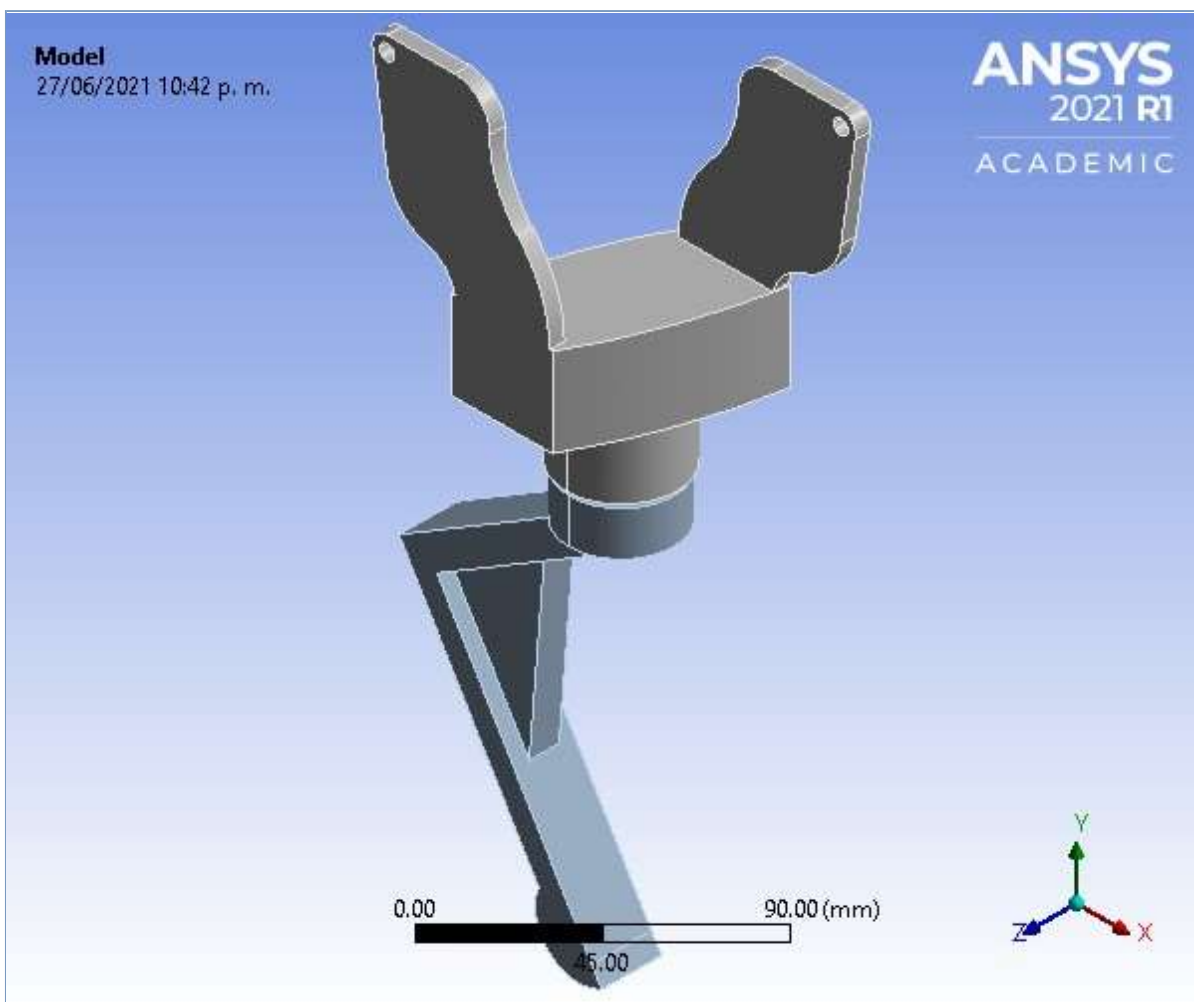
TABLE 21
Aluminum Alloy NL > Color

Red	Green	Blue
-----	-------	------



Project*

First Saved	Saturday, June 26, 2021
Last Saved	Saturday, June 26, 2021
Product Version	2021 R1
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



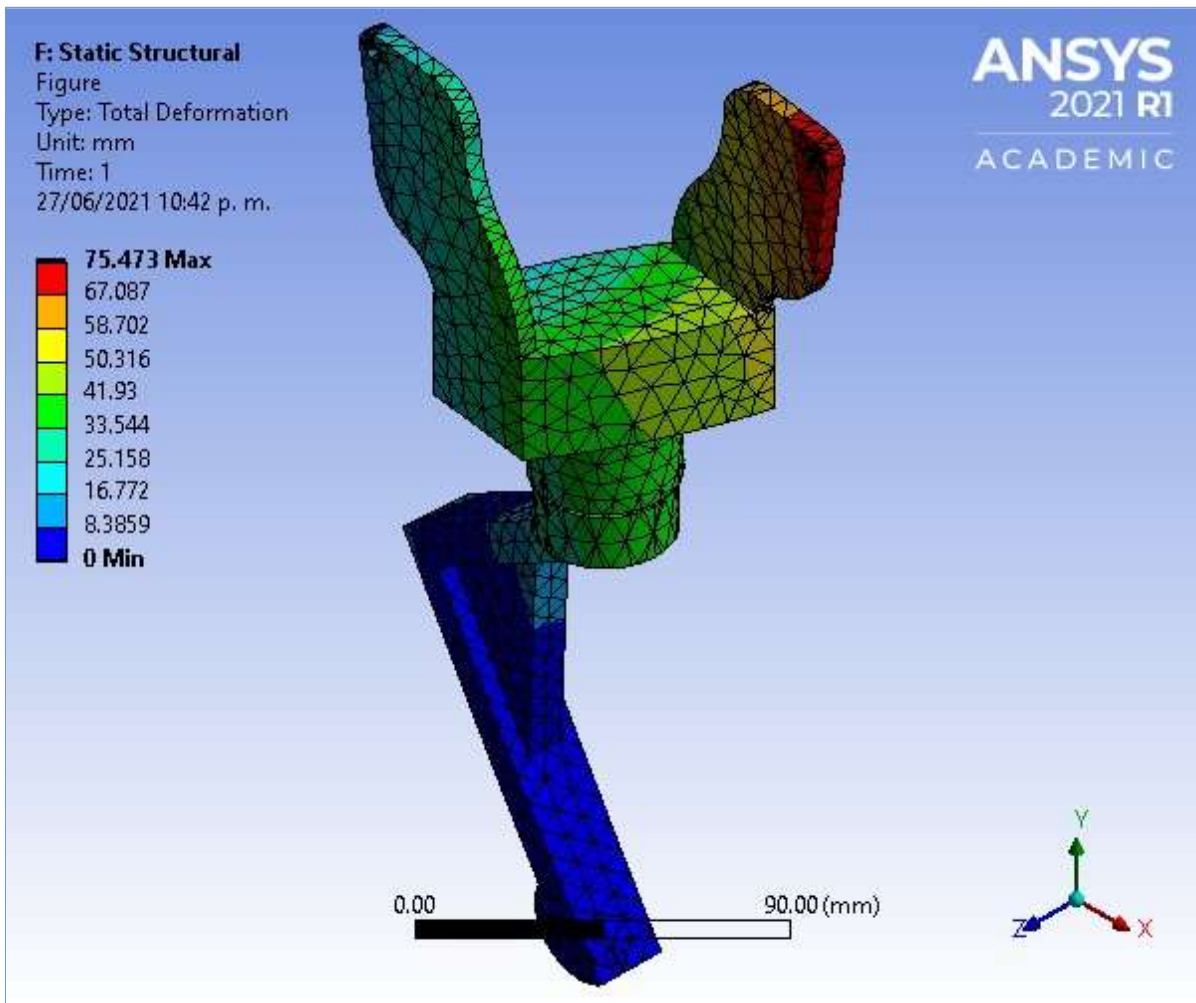


FIGURE 6
Model (F4) > Static Structural (F5) > Solution (F6) > Equivalent Stress

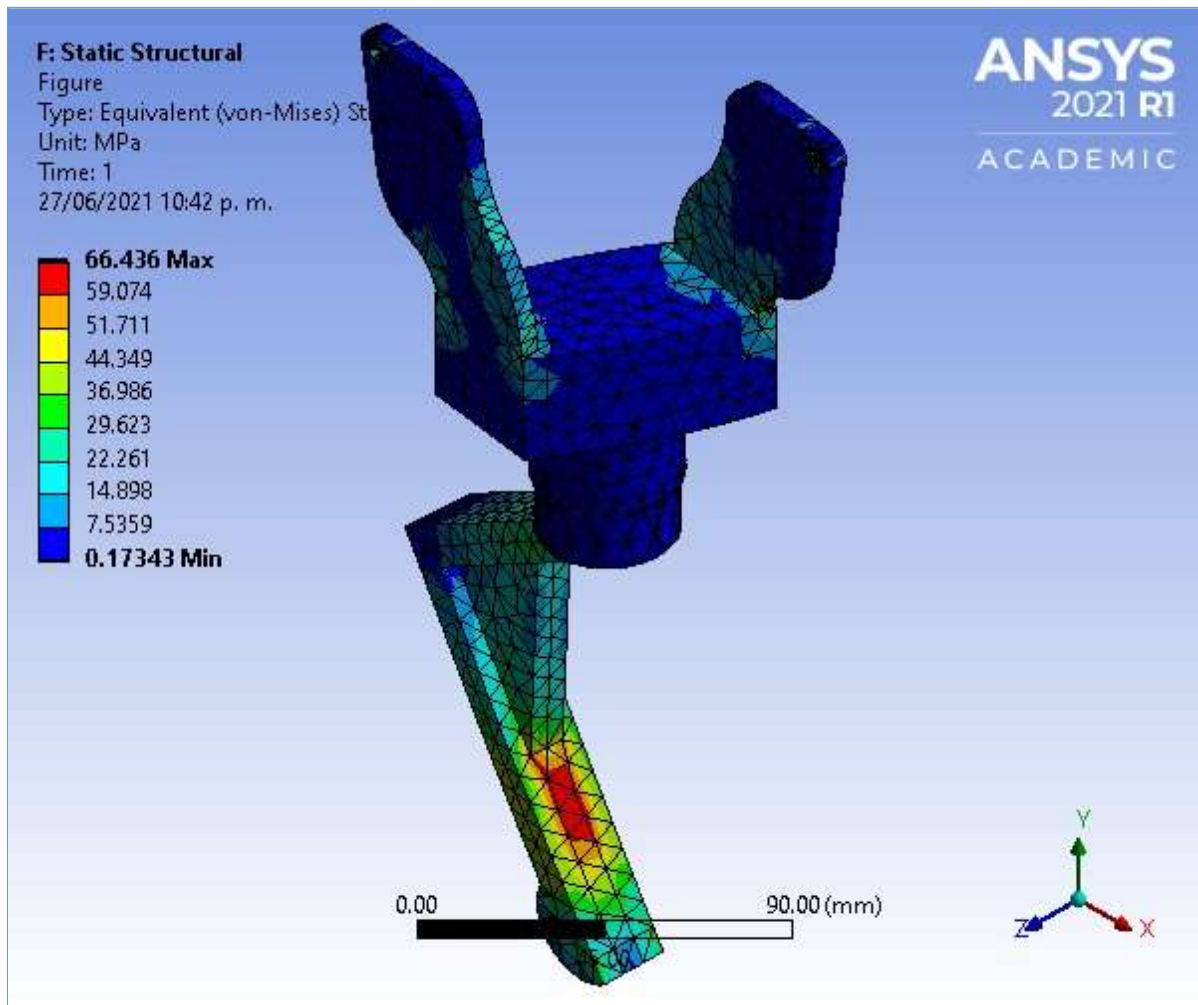
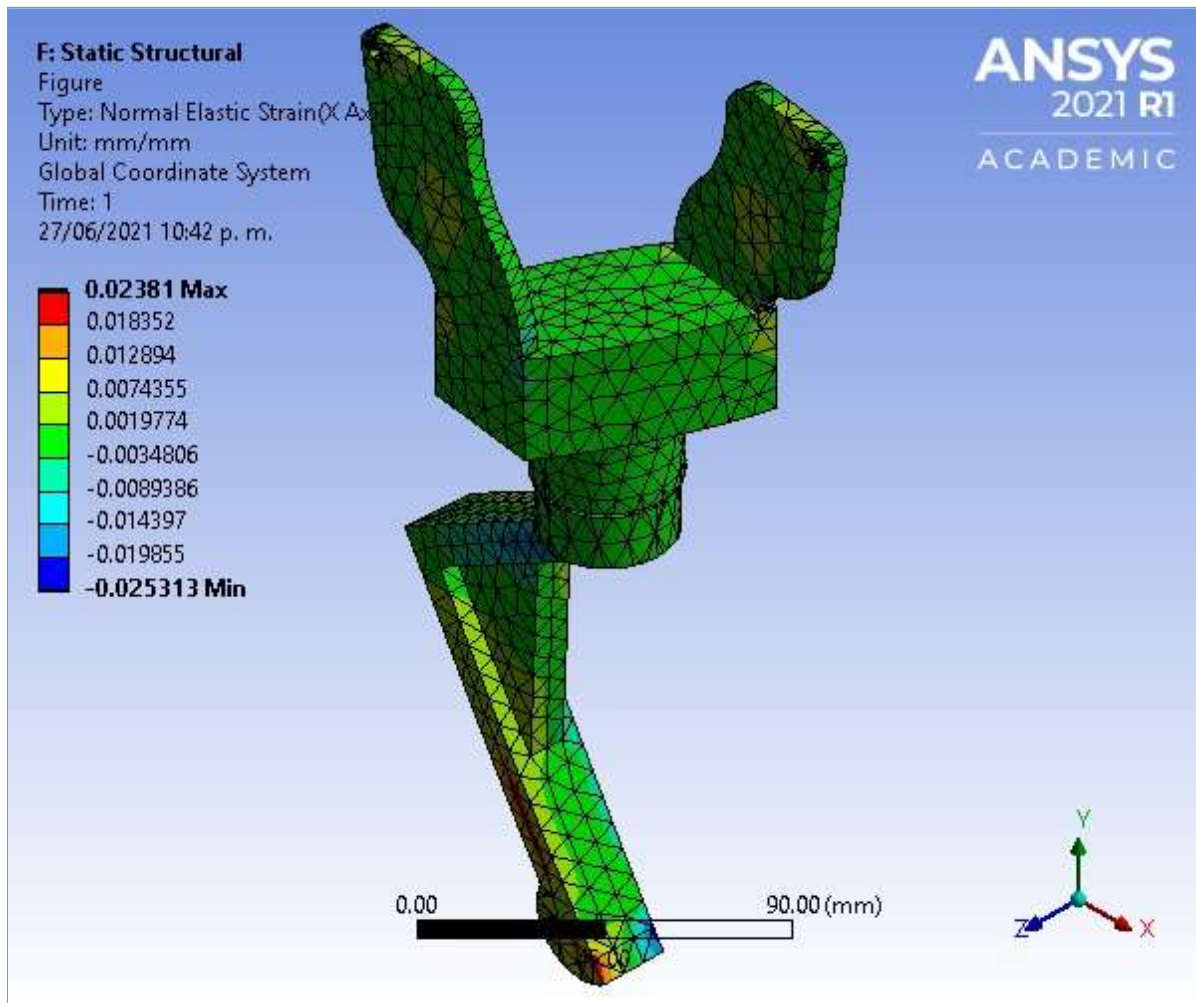


FIGURE 8
Model (F4) > Static Structural (F5) > Solution (F6) > Normal Elastic Strain



Material Data

Plastic, ABS (high-impact)

TABLE 21
Plastic, ABS (high-impact) > Constants

Density	1.03e-006 kg mm ⁻³
Tensile Yield Strength	27.44 MPa
Tensile Ultimate Strength	36.26 MPa
Coefficient of Thermal Expansion	1.84e-004 C ⁻¹
Thermal Conductivity	1.997e-004 W mm ⁻¹ C ⁻¹
Specific Heat	1.4e+006 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

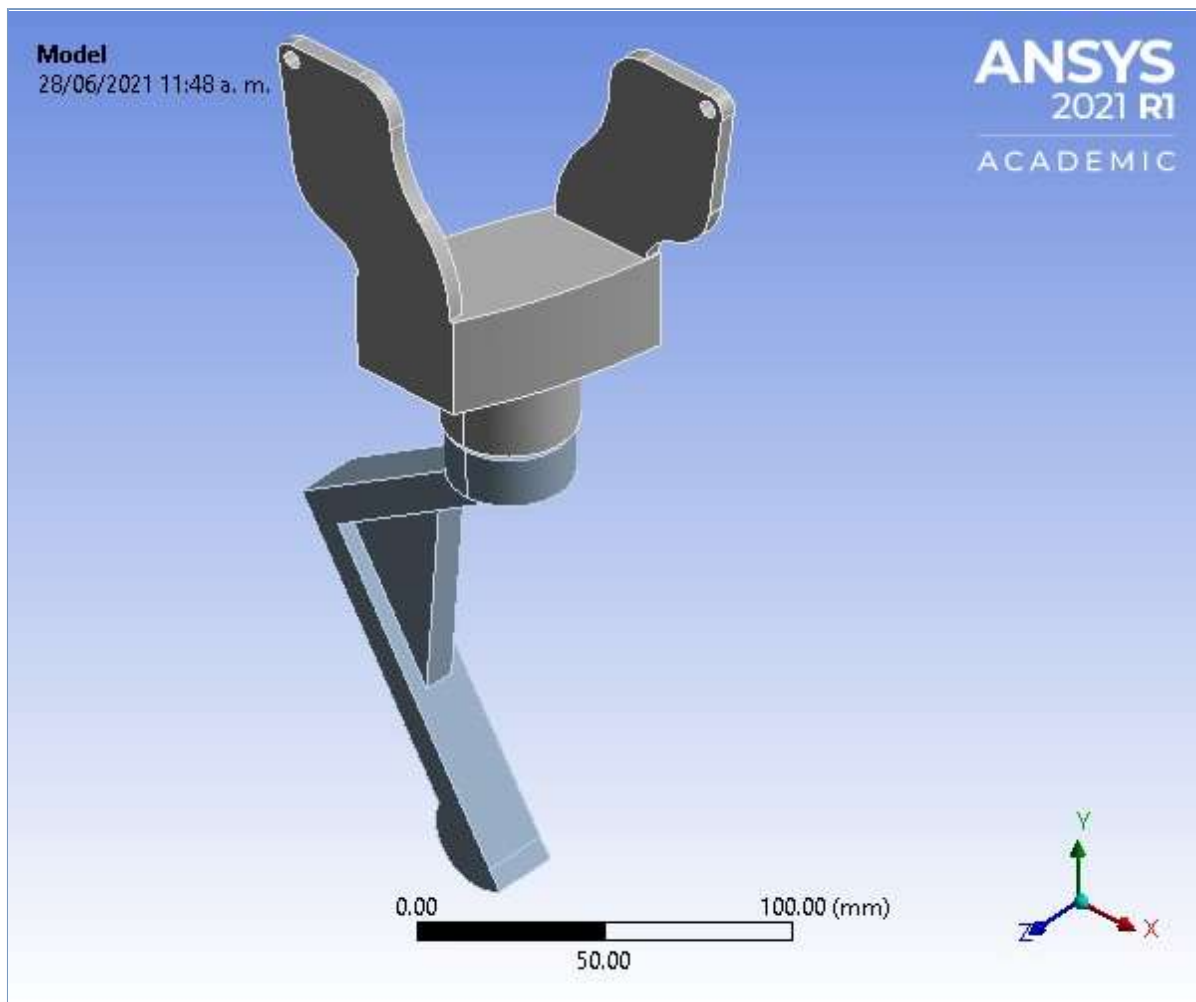
TABLE 22
Plastic, ABS (high-impact) > Opacity

	Red	Green	Blue
	0	153	255
Opacity			
	0.9		
Metallic Finish			
	0		



Project

First Saved	Saturday, June 26, 2021
Last Saved	Monday, June 28, 2021
Product Version	2021 R1
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



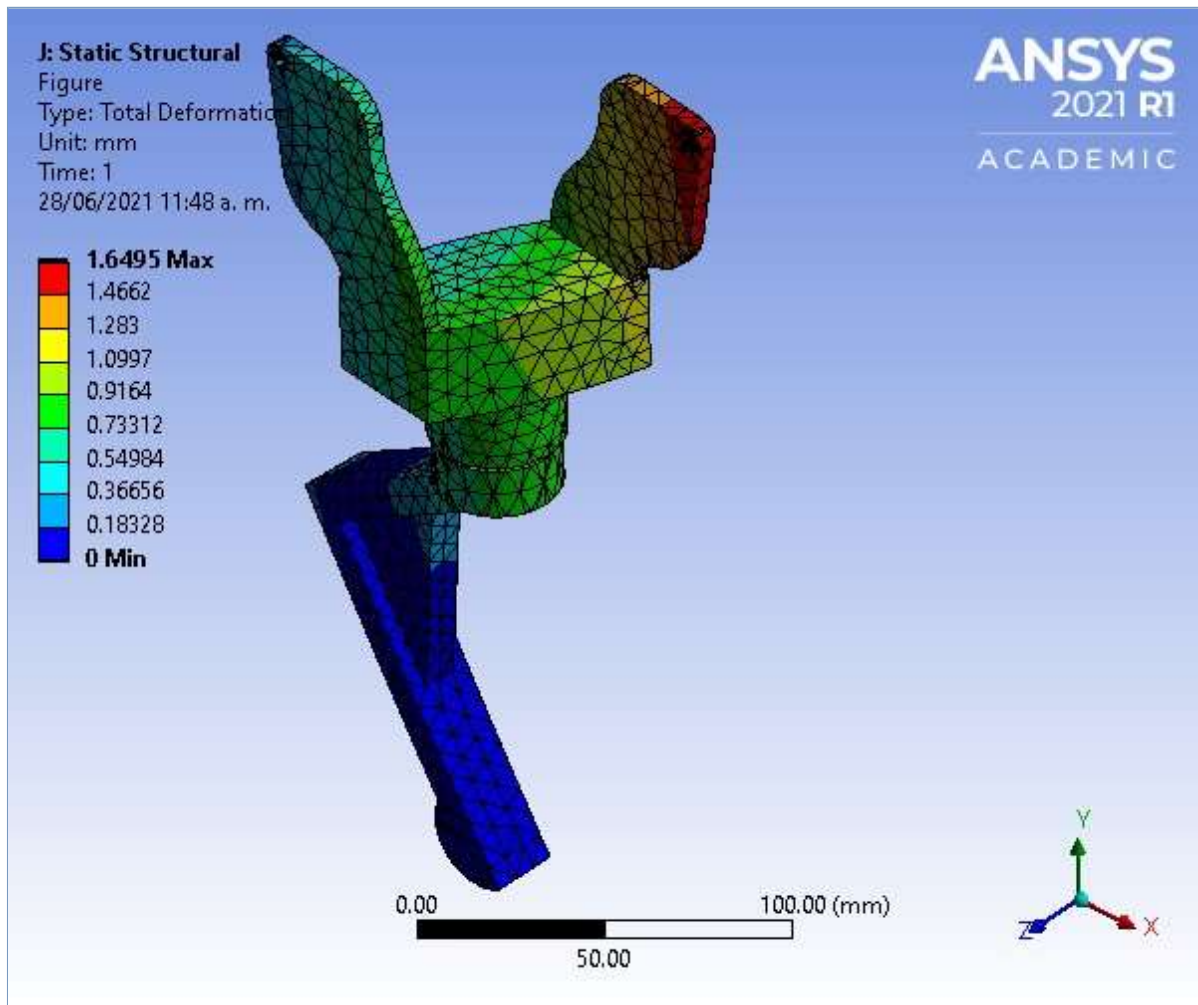


FIGURE 6
Model (J4) > Static Structural (J5) > Solution (J6) > Equivalent Stress

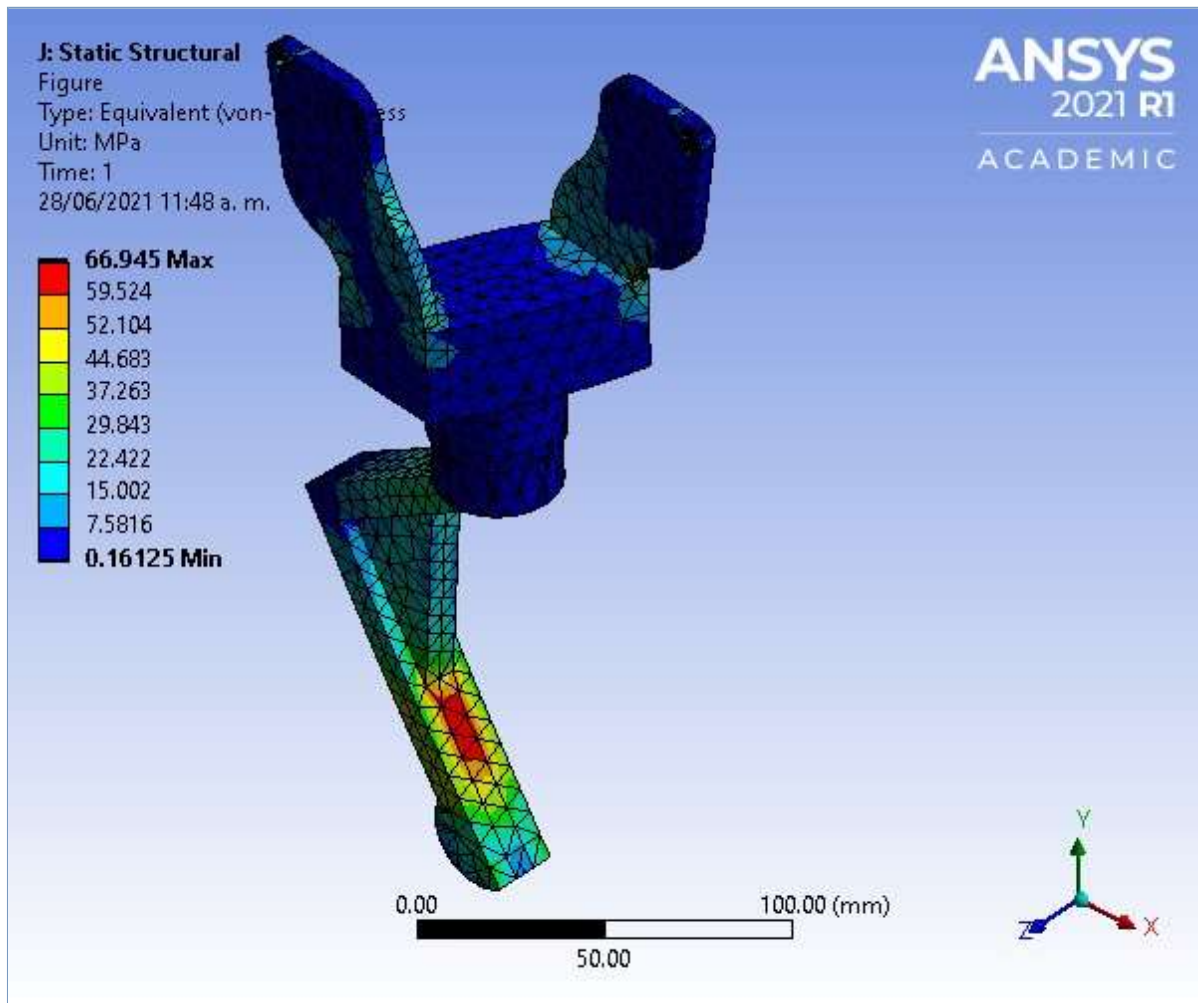
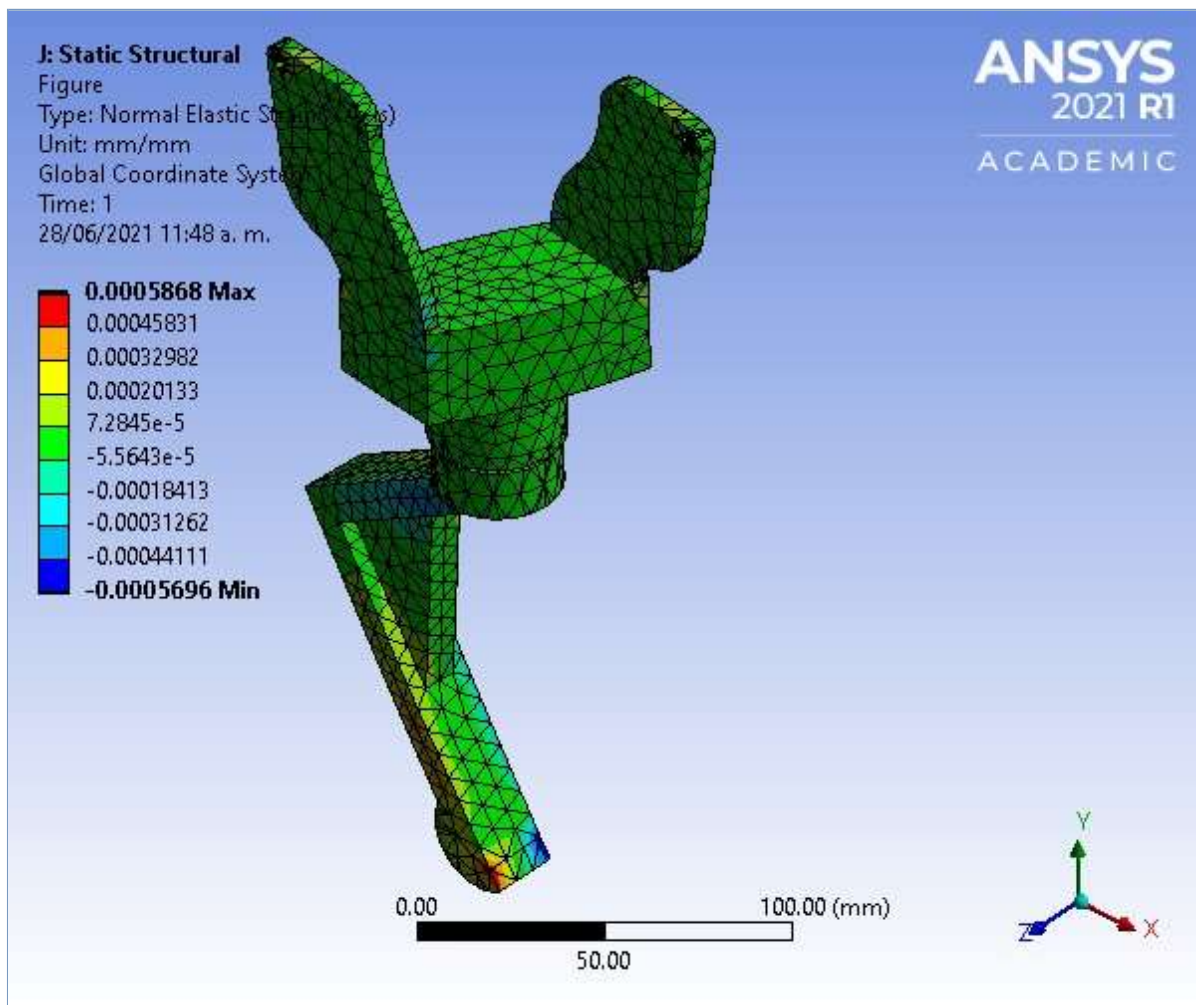


FIGURE 8
Model (J4) > Static Structural (J5) > Solution (J6) > Normal Elastic Strain



Material Data

Aluminum Alloy

TABLE 21
 Aluminum Alloy > Constants

Density	2.77e-006 kg mm ⁻³
Coefficient of Thermal Expansion	2.3e-005 C ⁻¹
Specific Heat	8.75e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 22
 Aluminum Alloy > Color

Red	Green	Blue
138	104	46

TABLE 23
 Aluminum Alloy > Compressive Ultimate Strength

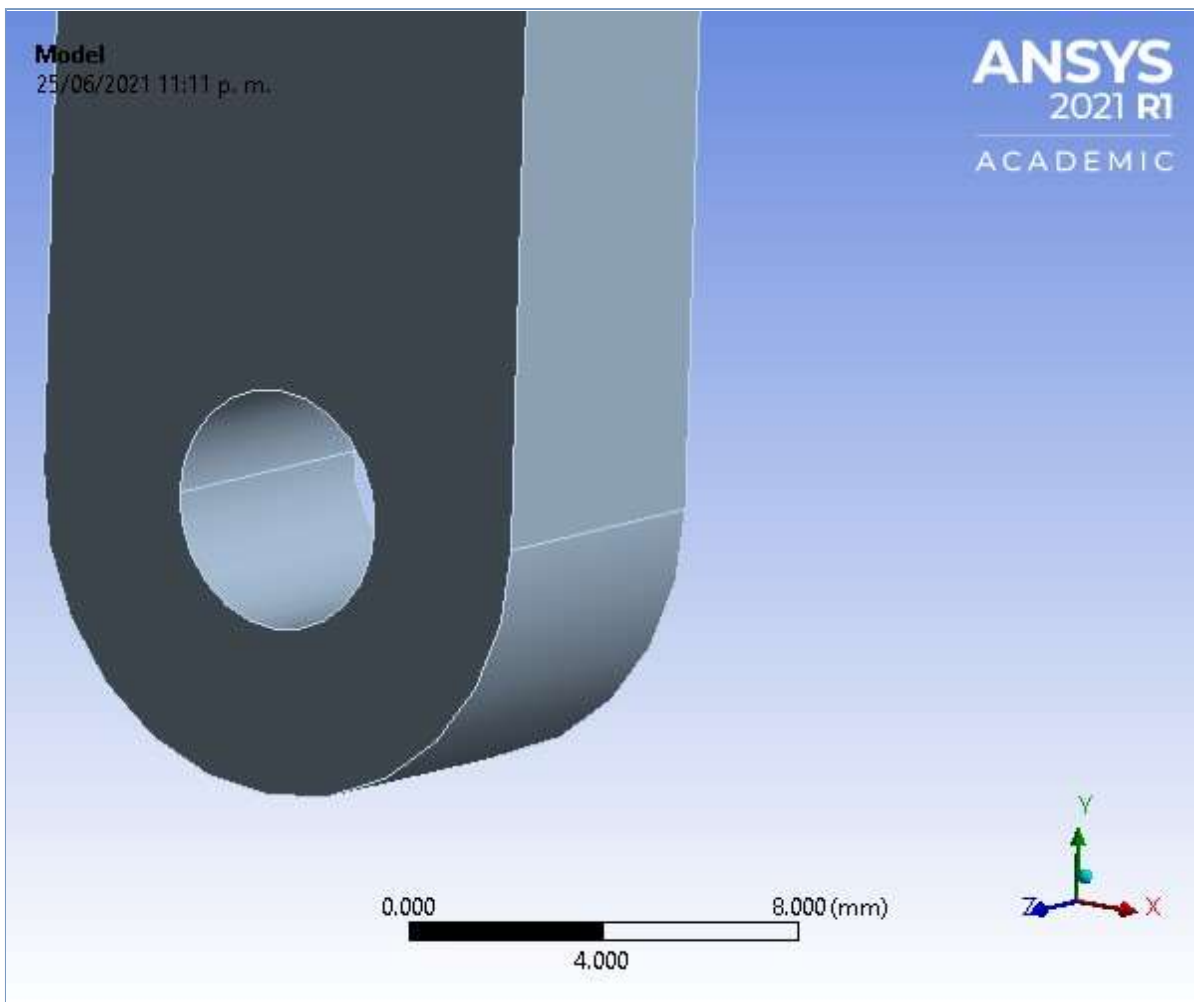
Compressive Ultimate Strength MPa
0

TABLE 24
 Aluminum Alloy > Compressive Yield Strength



Project*

First Saved	Friday, June 25, 2021
Last Saved	Friday, June 25, 2021
Product Version	2021 R1
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



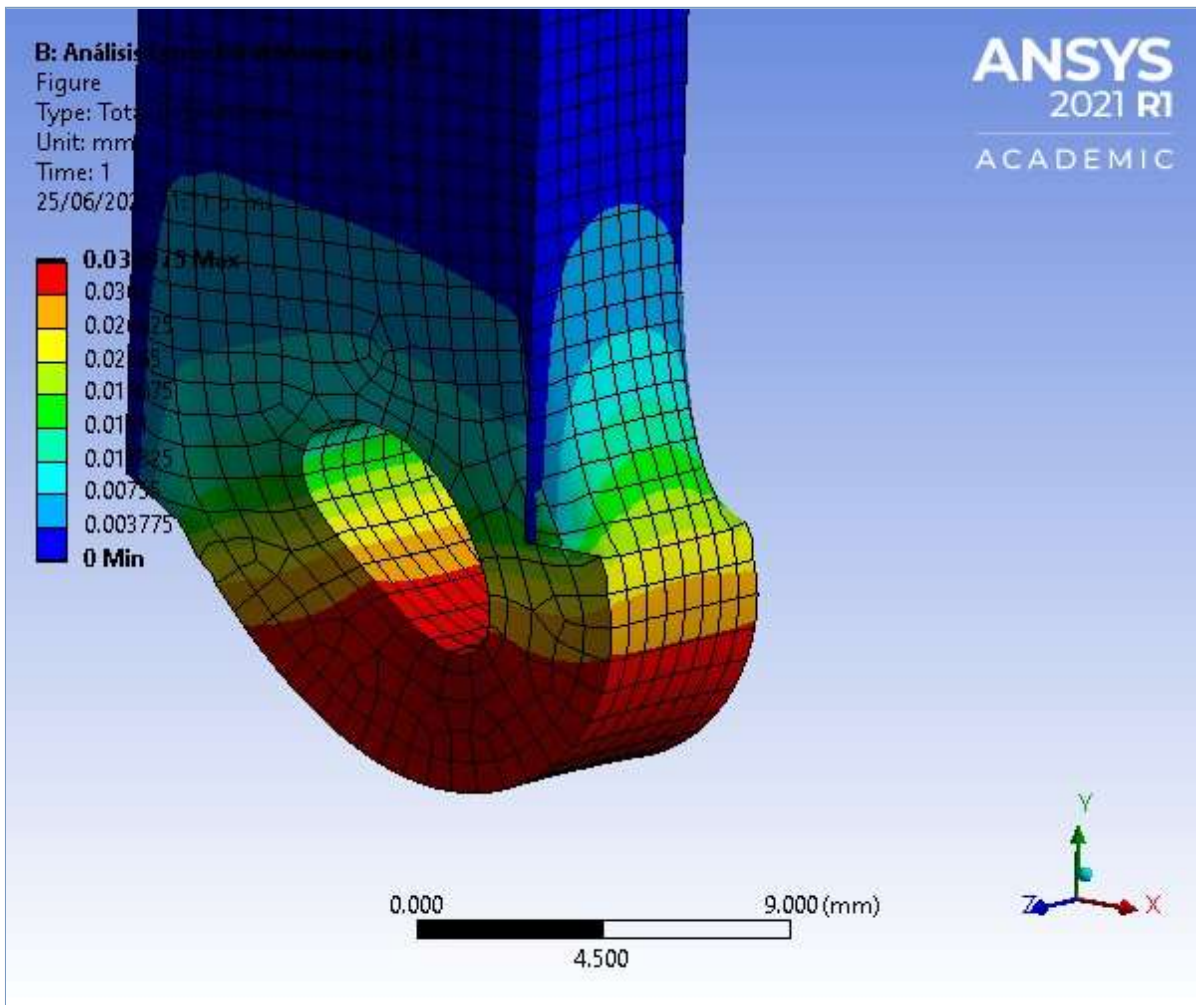


FIGURE 5
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Normal Stress

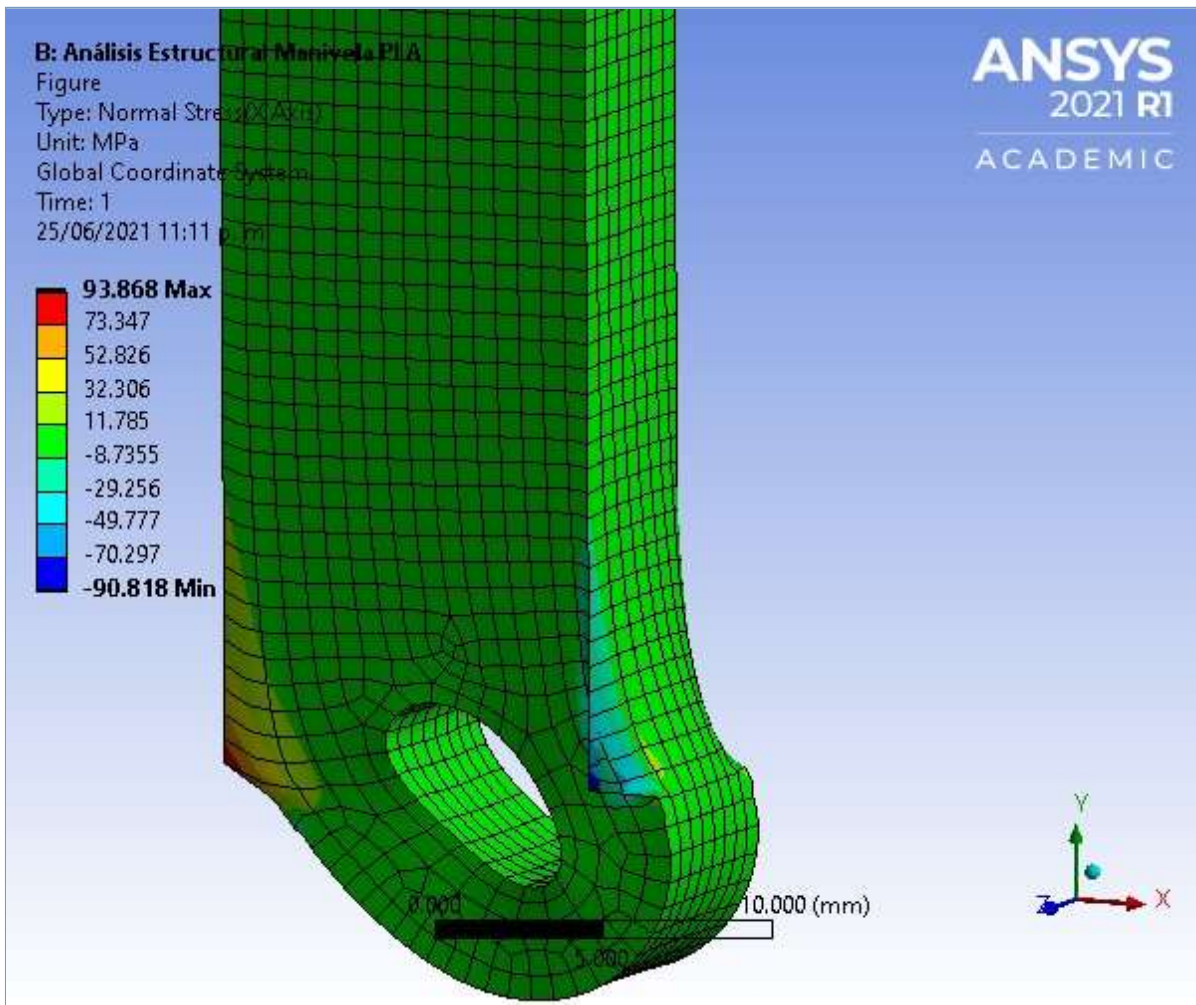
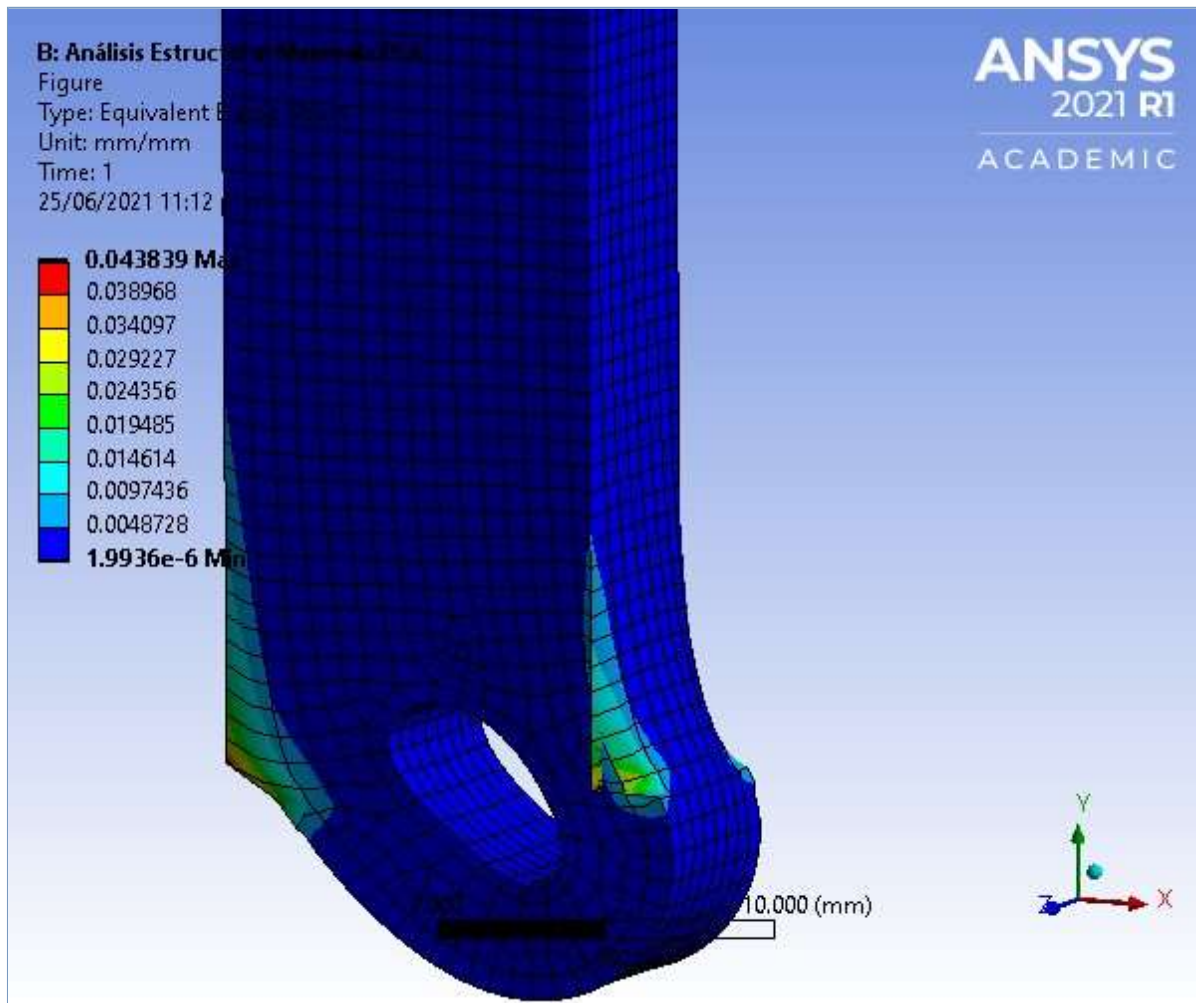


FIGURE 7
Model (B4) > Static Structural (B5) > Solution (B6) > Equivalent Elastic Strain



Material Data

PLA

TABLE 18
PLA > Constants

Density	1.24e-006 kg mm ⁻³
Thermal Conductivity	1.3e-004 W mm ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 19
PLA > Color

Red	Green	Blue
181	194	156

TABLE 20
PLA > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
3500	0.3	2916.7	1346.2	50

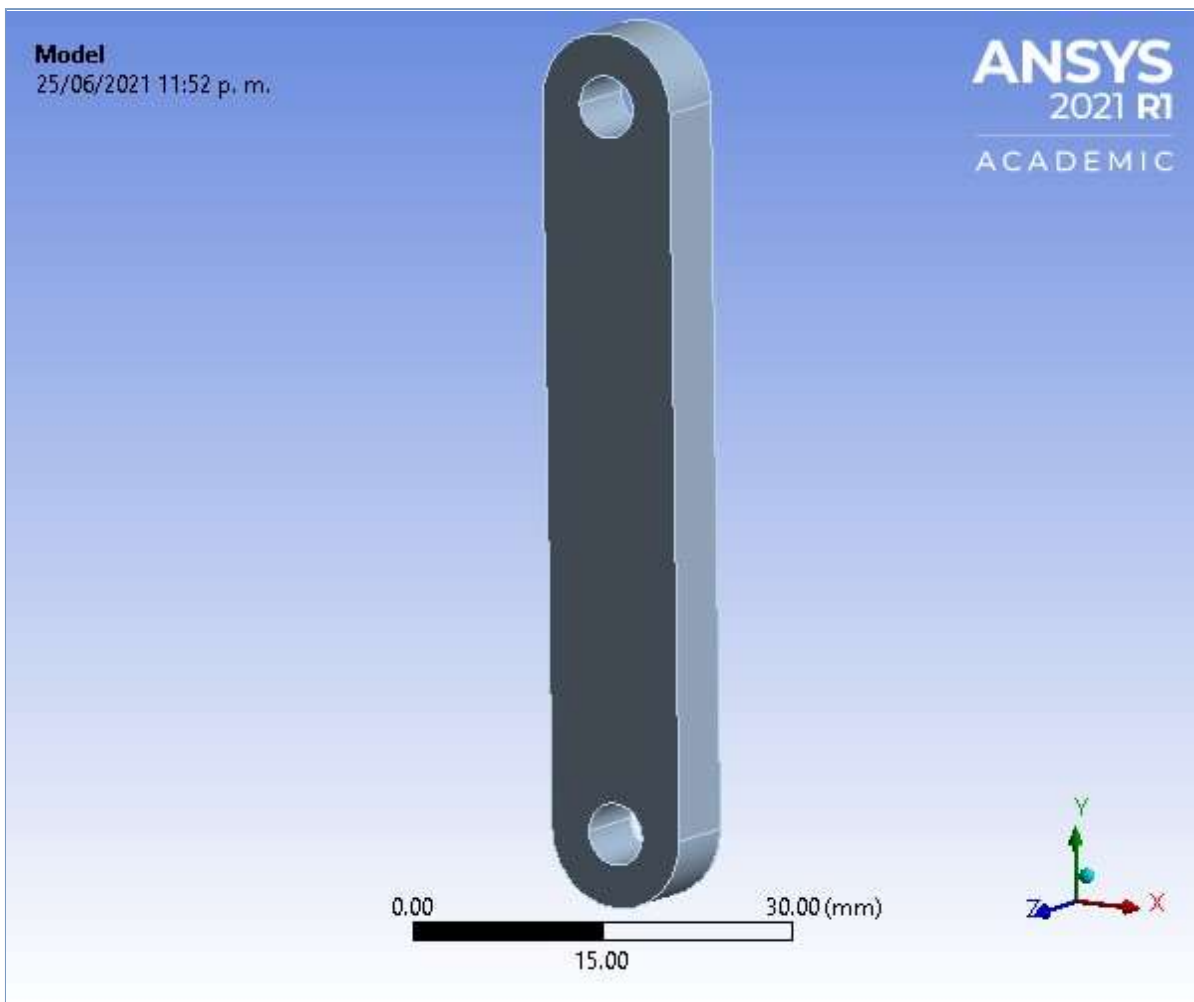
TABLE 21
PLA > Melting Temperature

Melting Temperature C



Project*

First Saved	Friday, June 25, 2021
Last Saved	Friday, June 25, 2021
Product Version	2021 R1
Save Project Before Solution	No
Save Project After Solution	No



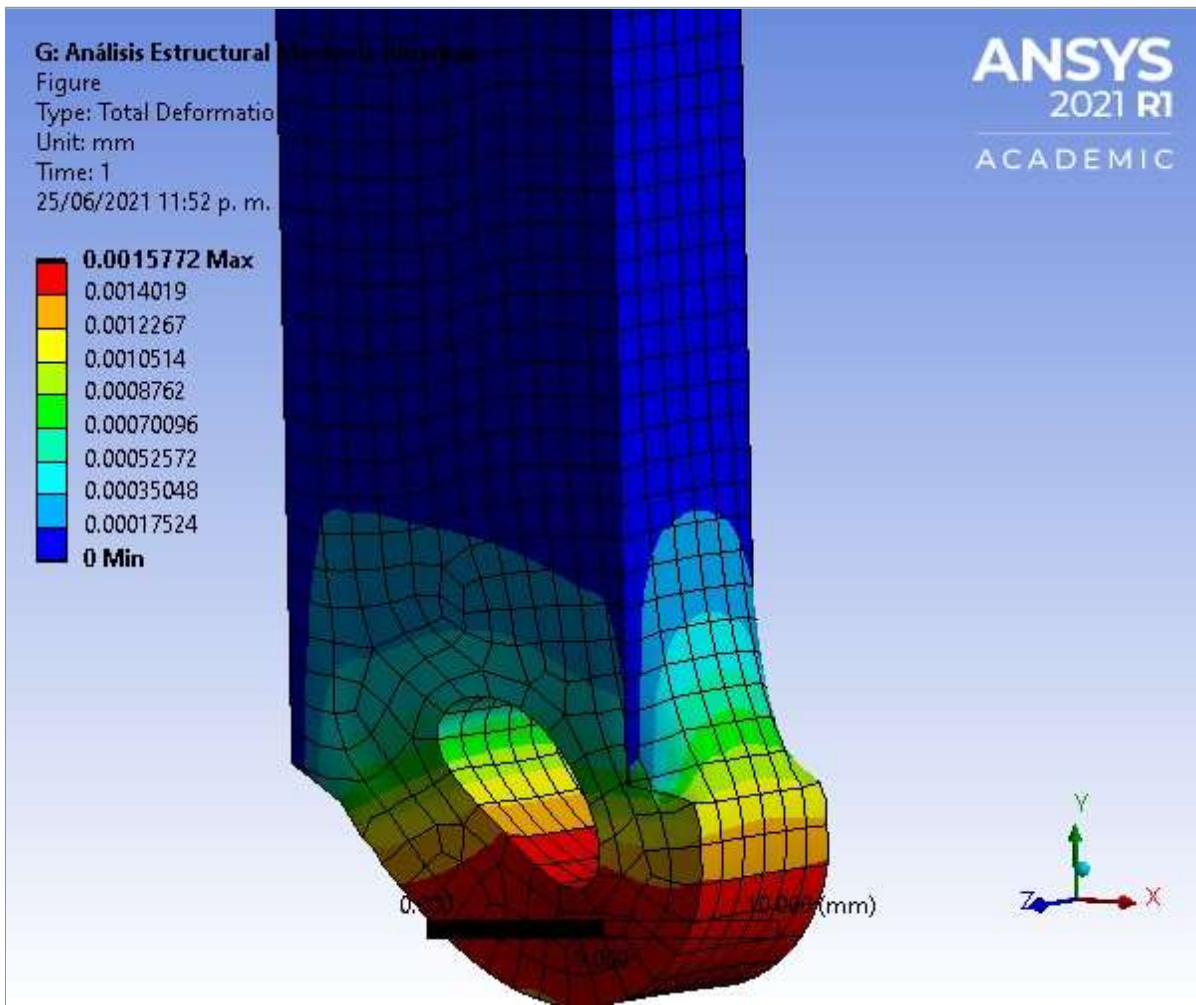


FIGURE 5
Model (G4) > Static Structural (G5) > Solution (G6) > Equivalent Stress

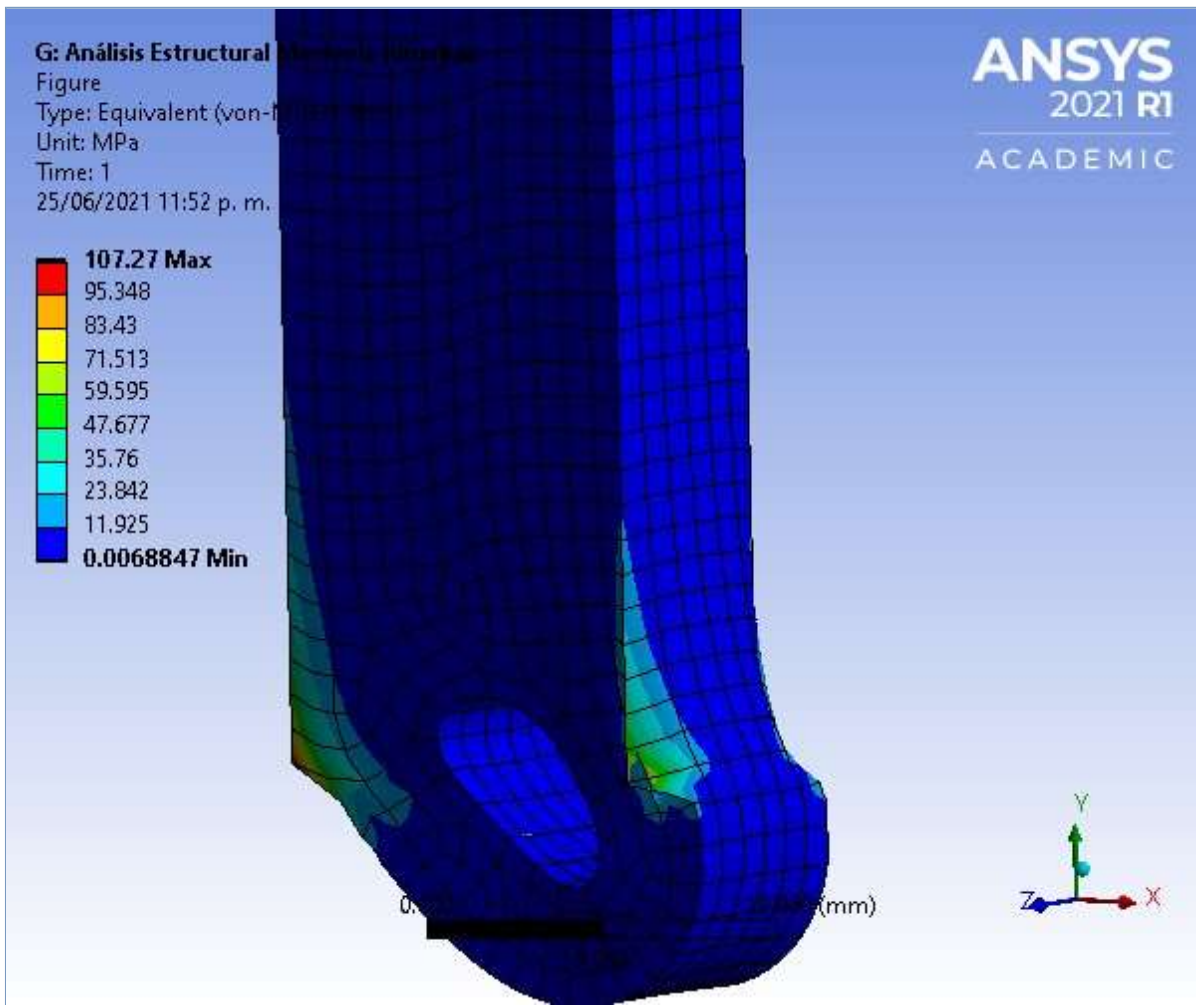
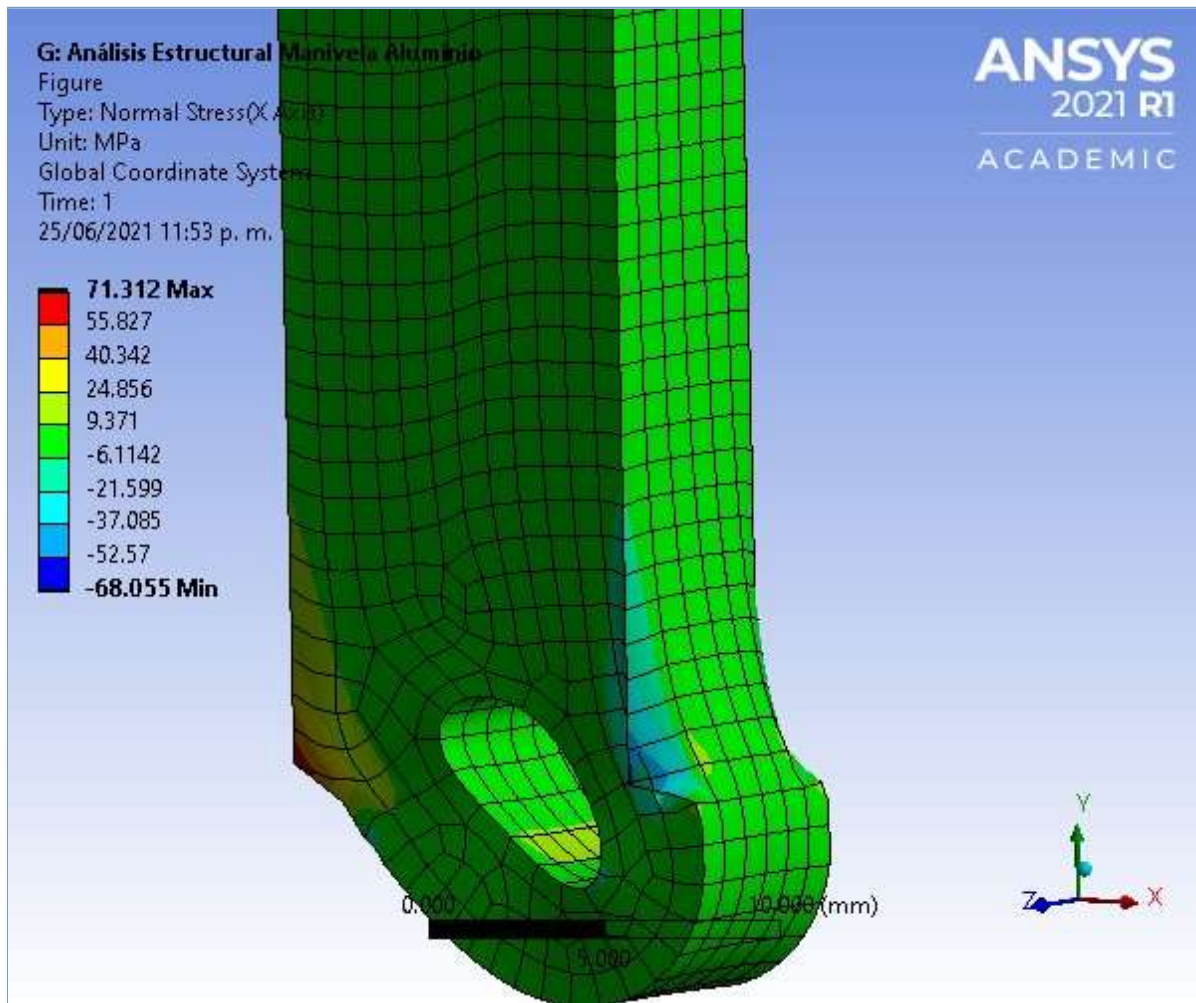


FIGURE 7
Model (G4) > Static Structural (G5) > Solution (G6) > Normal Stress



Material Data

Aluminum Alloy NL

TABLE 18
Aluminum Alloy NL > Constants

Density	2.77e-006 kg mm ⁻³
Specific Heat	8.75e+005 mJ kg ⁻¹ C ⁻¹

TABLE 19
Aluminum Alloy NL > Isotropic Elasticity

Young's Modulus MPa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus MPa	Shear Modulus MPa	Temperature C
71000	0.33	69608	26692	

TABLE 20
Aluminum Alloy NL > Bilinear Isotropic Hardening

Yield Strength MPa	Tangent Modulus MPa	Temperature C
280	500	

TABLE 21
Aluminum Alloy NL > Color

Red	Green	Blue
-----	-------	------