

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de mano y antebrazo animatrónico
antropomorfo**

Trabajo de graduación presentado por Betti Madahy Rodas Hernández
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2018

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Diseño e implementación de mano y antebrazo animatrónico
antropomorfo**

Trabajo de graduación presentado por Betti Madahy Rodas Hernández
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

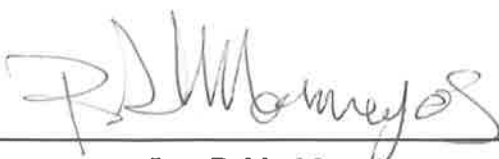
2018

Vo.Bo.:

(f) 

Ing. Pablo Mazariegos


Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Pablo Mazariegos

(f) 

MSc. Carlos Esquit

(f) 

MSc. Miguel Zea

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre de 2018.

Dedico este trabajo a mis padres y hermanas por su apoyo incondicional.

Agradezco la amistad de esas personas que ahora considero familia.

Agradezco a mi familia por mi formación personal y profesional.

Agradezco a mi asesor por su orientación y sugerencias.

Agradezco a mis profesores por su tiempo y aliento.

Prefacio	v
Lista de figuras	XIII
Lista de cuadros	XVI
Resumen	XVII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. Alcance	9
6. Marco teórico	11
6.1. Fisiología y estructura	11
6.1.1. Antebrazo	11
6.1.2. Muñeca	12
6.1.3. Mano y dedos	15
6.1.4. Músculos intrínsecos	17
6.1.5. Rangos de movilidad	18
6.2. Materiales	21
6.2.1. Grilón	21
6.2.2. Ertalón	22
6.2.3. Acetal	22
6.2.4. Delrin	23

6.2.5.	Duraluminio	23
6.2.6.	Impresión 3D	24
6.3.	Mecanismos de transmisión de movimiento	25
6.3.1.	Mecanismos de barras	25
6.3.2.	Transmisión por poleas	25
6.3.3.	Mecanismo con motor en cada junta	26
6.3.4.	Accionamiento por medio de tendones	26
6.4.	Actuadores	27
6.4.1.	Motores DC con escobillas	27
6.4.2.	Actuadores lineales	27
6.4.3.	Aleaciones con memoria de forma (SMA)	28
6.4.4.	Servos Dynamixel	28
7.	Metodología	31
8.	Identificación de requerimientos	33
8.1.	Movimientos a realizar	33
8.2.	Articulaciones	34
8.3.	Grados de libertad	34
8.4.	Velocidades	36
8.4.1.	Métrica de velocidades	38
8.5.	Selección de actuadores y mecanismos de transmisión.	39
8.5.1.	Selección de actuadores	39
8.5.2.	Selección de mecanismos de transmisión	39
9.	Diseño	41
9.1.	Falanges	41
9.1.1.	Primer prototipo	42
9.1.2.	Segundo prototipo	43
9.1.3.	Tercer prototipo	45
9.2.	Palma	46
9.3.	Muñeca	49
9.4.	Antebrazo	50
9.5.	Poleas	53
10.	Selección de material	55
10.1.	Cotización	55
11.	Validación de diseño	57
11.1.	Análisis de esfuerzos	57
11.2.	Pruebas físicas	62
12.	Manufactura y ensamble	65
12.1.	Dedos	65
12.2.	Palma	66
12.3.	Muñeca	69
12.4.	Antebrazo	70
12.4.1.	Tapaderas	71
12.4.2.	Base para motores	71

12.5. Poleas	72
13. Conclusiones	75
14. Recomendaciones	77
15. Bibliografía	79
16. Anexos	81
16.1. Planos de construcción	81
17. Glosario	83

Lista de figuras

1.	Músculos extensores del antebrazo. [3]	11
2.	Origen de los músculos extensores del antebrazo. [3]	12
3.	Origen de los músculos flexores. [3]	12
4.	Ligamentos de la muñeca. [3]	13
5.	Huesos carpianos de la muñeca. [3]	13
6.	Ligamentos intercarpianos. [3]	14
7.	Sección transversal de la muñeca. [3]	14
8.	Movimiento deslizante de la articulación radiocarpiana. [3]	15
9.	Ligamentos colaterales de la articulación metacarpofalángica. [3]	16
10.	Placas palmares. [3]	16
11.	Huesos de la mano. [4]	17
12.	Agarres prensiles humanos. [5]	17
13.	Inserción de los tendones flexores. [3]	18
14.	Mecanismo flexor. [3]	18
15.	Mecanismo extensor. [3]	18
16.	Medición de amplitud del movimiento de muñeca. [3]	19
17.	Medición de las desviaciones radiales y cubitales. [3]	19
18.	Arco de movilidad en movimiento de flexión-extensión metacarpofalángica del pulgar. [6]	19
19.	Arco de movilidad en movimiento de flexión-extensión interfalángica del pulgar. [6]	20
20.	Medición de amplitud palmar del pulgar. [6]	20
21.	Medición de amplitud de las articulaciones metacarpofalángicas. [3]	20
22.	Medición de amplitud de las articulaciones interfalángicas. [3]	20
23.	Movimientos básicos de la mano. [3]	21
24.	Mecanismos de barras. [22]	26
25.	Transmisión por poleas. [22]	26
26.	Configuración N+1. [1]	27
27.	Configuración 2n. [1]	27
28.	Rango de movimiento. Vista frontal del servo. [25]	30
29.	Bisagras cilíndricas. [26]	34
30.	Diagrama cinemático dedos.	35

31.	Diagrama cinemático flexión pulgar.	35
32.	Diagrama cinemático abducción-aducción pulgar.	35
33.	Diagrama cinemático de la mano.	36
34.	Análisis flexión-extensión dedo índice referencia.	36
35.	Velocidad (mm/s) alcanzada.	37
36.	Análisis flexión-extensión dedo pulgar referencia.	37
37.	Velocidad (mm/s) alcanzada.	37
38.	Análisis abducción-aducción dedo pulgar referencia.	38
39.	Velocidad (mm/s) alcanzada.	38
40.	Mediciones de falanges.	42
41.	Prototipo 1: Ensamble de dedo índice.	42
42.	Prototipo 1: Defecto al extenderse.	43
43.	Prototipo 1: Defecto al flexionarse.	43
44.	Prototipo 2.	44
45.	Prototipo 2: Flexión alcanzada.	44
46.	Prototipo 2: Trayectos para tendones flexores.	44
47.	Prototipo 2: Trayectos para tendones extensores.	44
48.	Prototipo 2: Defecto desviación.	44
49.	Prototipo 3.	45
50.	Prototipo 3: Mecanismo de control de extensión.	45
51.	Palma: Parte trasera vista isométrica.	46
52.	Palma: Parte trasera vista de lado.	47
53.	Palma: Parte trasera vista trasera.	47
54.	Palma: Parte frontal vista frontal.	47
55.	Palma: Parte frontal vista isométrica.	48
56.	Palma: Parte frontal vista de lado.	48
57.	Palma completa vista de lado.	48
58.	Cojinete AX-12A. [28]	49
59.	FP04-F2. [29]	49
60.	FP04-F2 ensamblado. [29]	49
61.	Diseño articulación radiocarpiana.	49
62.	Articulación radiocarpiana ensamblada.	50
63.	Carril.	50
64.	Primer prototipo antebrazo: Vista isométrica.	51
65.	Primer prototipo antebrazo: Vista frontal.	51
66.	Segundo prototipo antebrazo: Vista frontal.	51
67.	Antebrazo con tapaderas: Vista isométrica.	52
68.	Tapadera para antebrazo: Vista isométrica.	52
69.	Tapadera para antebrazo: Vista lateral.	52
70.	Base para motores.	53
71.	Polea para XL-320.	54
72.	Ensamble CAD: Vista isométrica.	54
73.	Ensamble CAD: Vista frontal.	54
74.	Carga puntual aplicada.	58
75.	Constraints.	58
76.	Esfuerzos de Von Mises.	58

77.	Desplazamiento.	58
78.	Factor de seguridad.	59
79.	Esfuerzos de Von Mises.	59
80.	Desplazamiento.	60
81.	Factor de seguridad.	60
82.	Flexión-extensión en dedo índice del prototipo.	62
83.	Velocidad(mm/s) vs Tiempo(s).	62
84.	Flexión-extensión en dedo pulgar del prototipo.	62
85.	Velocidad(mm/s) vs Tiempo(s).	63
86.	Abducción-aducción en dedo pulgar del prototipo.	63
87.	Velocidad angular(rad/s) vs Tiempo(s).	63
88.	Impresión de falanges utilizando breakaway.	66
89.	Material de soporte para palma utilizando PLA.	67
90.	Superficie de palma utilizando PLA.	67
91.	Material de soporte para palma utilizando breakaway.	67
92.	Cojinetes y tendones montados en la palma.	68
93.	Relleno de porcelana en las falanges distales.	68
94.	Ensamble acople muñeca y sobre AX-12A.	69
95.	Ensamble acople muñeca y sobre AX-12A.	69
96.	Proceso de impresión del antebrazo.	70
97.	Ensamble muñeca y antebrazo.	70
98.	Tapadera: Vista frontal.	71
99.	Tapadera: Vista posterior.	71
100.	Ensamble antebrazo con tapadera.	72
101.	Ensamble completo de mano y antebrazo.	73
102.	Ensamble de prototipo funcional de mano y antebrazo.	73

Lista de cuadros

1.	Propiedades Grilón. [8]	21
2.	Propiedades térmicas Grilón. [8]	21
3.	Propiedades mecánicas Grilón. [8]	21
4.	Propiedades Ertalón. [10]	22
5.	Propiedades térmicas Ertalón. [10]	22
6.	Propiedades mecánicas Ertalón. [10]	22
7.	Propiedades Acetal. [12]	22
8.	Propiedades térmicas Acetal. [12]	23
9.	Propiedades mecánicas Acetal. [13]	23
10.	Propiedades Duraluminio. [15]	23
11.	Propiedades térmicas Duraluminio. [15]	24
12.	Propiedades mecánicas Duraluminio. [15]	24
13.	Propiedades mecánicas PLA. [17]	24
14.	Propiedades mecánicas ABS. [19]	25
15.	Instruction packet. [24]	28
16.	Status packet. [24]	29
17.	LED colors. [25]	30
18.	Status of the device. [25]	30
19.	Velocidades de flexión-extensión alcanzadas.	38
20.	Velocidad angular de abducción-aducción alcanzada	38
21.	Armellas [ACE]	47
22.	Cotización de maquinado. [Maquinados precisos]	56
23.	Cotización de presentaciones de Delrin. [Metales Industriales de Guatemala]	56
24.	Cotización de material. [Metales Industriales de Guatemala]	56
25.	Cotización total. [Metales Industriales de Guatemala y Maquinados Precisos]	56
26.	Tensión en falanges distales.	61
27.	Tensión en falanges mediales.	61
28.	Tensión en falanges proximales.	61
29.	Tensión total en dedos.	61
30.	Tensión promedio.	61

31. Comparación de velocidades.	64
32. Tiempo de impresión invertido en prototipo final.	66

El presente trabajo de graduación es parte de la fase tres del Megaproyecto Animatronics. La fase anterior de dicho Megaproyecto se basó en el diseño y construcción de un pirata animatrónico, concepto que fue retomado y dividido en secciones.

El propósito de este trabajo de graduación es el diseño e implementación de la mano y antebrazo de dicho pirata animatrónico. Pero se pretende no solo mejorar el diseño mecánico para que este sea mas apegado a la anatomía humana, sino también mejorar la fluidez del movimiento.

Se realizó una investigación sobre la anatomía y fisiología humana, así como las distintas alternativas para construir los mecanismos de transmisión de movimiento, y alternativas de actuadores que permitieran lograr un movimiento lo suficientemente rápido y uniforme como para evitar un comportamiento indeseado.

El diseño de las estructuras fue basado en la mano y antebrazo izquierdo de mi persona. Se encontró que para el movimiento de los dedos el mecanismo de accionamiento por medio de tendones es útil y ventajoso.

Además, se encontró que los servos Dynamixel son útiles para la aplicación de este trabajo por lo que se implementaron dichos actuadores.

Con la implementación del mecanismo de tendones utilizando los servos Dynamixel se consiguió que los dedos animatrónicos siguieran una trayectoria de movimiento fluida, así como apegada a la trayectoria seguida por la mano humana utilizada como referencia. Por último, gracias a que el diseño está basado en las dimensiones de un modelo en específico se alcanzó un aspecto real y natural para el diseño.

The present graduation project is part of phase three of the Animatronics Megaproject. The previous phase of said Megaproject was based on the design and construction of an animatronic pirate, a concept that was retaken and divided into sections.

The purpose of this graduation project is the design and implementation of the hand and forearm of said animatronic pirate. But it is intended not only to improve the mechanical design so that it is more similar to the human anatomy, but also to improve the fluidity of movement.

An investigation was carried out on the human anatomy and physiology, as well as the different alternatives to construct the motion transmission systems, and alternatives of actuators that would allow to achieve movement fast and uniform enough to avoid an undesired behavior.

The design of the structures was based on my left hand and forearm. It was found that for the movement of the fingers the drive mechanism by means of tendons is useful and advantageous.

In addition, it was found that the Dynamixel servos are useful for the application of this work reason why these actuators were implemented.

With the implementation of the tendon mechanism using the Dynamixel servos, the animatronic fingers were able to follow a trajectory presenting fluid movement, as well as being close to the trajectory followed by the human hand used as a reference. Finally, thanks to the fact that the design is based on the dimensions of a specific model, a real and natural aspect was achieved for the design.

CAPÍTULO 1

Introducción

En el presente trabajo se mostrará el diseño de una mano y antebrazo animatrónico que replique el movimiento y la fluidez humana.

Se presenta una investigación de la estructura de la mano y codo humanos que será crucial como base en el diseño de eslabones y articulaciones del animatrónico. Se realizó una investigación sobre los mecanismos de transmisión de movimiento para a partir de ellos escoger el más apropiado y eficiente.

Según los requerimientos de velocidad promedio a alcanzar por los dedos del animatrónico y de las cargas que este debe soportar se escogieron los actuadores a utilizar.

Para el diseño mecánico también se hizo un análisis de supuestos a los que se deseaba estuviera expuesto el animatrónico. Es decir, si se espera que dicho animatrónico se encuentre en el exterior se debe escoger un material que sea resistente a cambios climáticos, como viento, cantidad de horas expuestas a luz solar, temperaturas de funcionamiento, humedad, lluvia, entre otros.

Se llevó a cabo un diseño fluido y realista, en el cual cada dedo es resistente a fuerzas menores a 5 Newtons. Estas fuerzas externas son consideradas por si en el futuro el animatrónico se encuentra expuesto a público u operarios de mantenimiento.

Existe la posibilidad de que este sufra pequeñas fuerzas en sus extremidades debido a que estas son las partes más expuestas. Un ejemplo de estas fuerzas podría ser un golpe provocado al botar una herramienta o durante un movimiento brusco.

Se llevó a cabo un diseño CAD que permitió tener una idea de la apariencia del prototipo final. Asimismo, este ensamblaje permitió llevar a cabo un análisis de esfuerzos para comprobar la resistencia del diseño de los dedos al ser sometidos a una carga puntual de 5 Newtons.

En la actualidad la gran mayoría de robots consisten en seis juntas rotacionales o prismáticas que tienen un efector final que interactúa con el espacio de trabajo. En robots antropomorfos este efector final es llamado mano. Una mano con múltiples dedos puede realizar diferentes tipos de agarres, y con la selección de motores livianos y con un rango de movilidad amplio permiten que la mano sea rápida, precisa y eficiente. [1]

Los primeros usos de una mano de múltiples dedos fueron en dispositivos protésicos para reemplazar extremidades perdidas. En 1509 se realizó una prótesis para el caballero von Berlichingen, quien había perdido su mano durante batalla cuando joven. Según [1] las manos se pueden clasificar en cuatro tipos distintos:

- **Cosméticas:** No tienen movimiento propio y no pueden ser activadas. Sin embargo, pueden ser utilizadas para mover cosas empujándolas, o como apoyo para la mano no protésica.
- **Pasivas:** Necesitan que la mano no protésica ajuste el agarre de la mano. La mano de von Berlichingen era de este tipo.
- **Accionadas por el cuerpo:** Para activar la prótesis es necesario utilizar el movimiento de otra parte del cuerpo. Dos de las más comunes son arm-flexion control y shrug control. En la primera se jala un cable cuando el brazo se mueve hacia adelante, mientras que en la segunda el cable es jalado cuando los hombros son encogidos.
- **Accionadas externamente:** Se necesita de una fuente de poder externa para activar la prótesis. La fuente de poder puede ser una batería o gas comprimido.

En la Universidad del Valle de Guatemala se ha trabajado como Megaproyecto el diseño de prótesis, dividido en diferentes fases de trabajo. A pesar de que ese Megaproyecto se enfoca en una prótesis, el diseño de la mano y sus falanges juega un papel importante que sirve como precedente para este trabajo de graduación.

Durante la primera fase se realizó el movimiento de las falanges, consiguiendo agarre cilíndrico, de punta, de gancho, de palma, esférico y de lado. En la segunda fase se implementó

la muñeca y el codo. En la última se implementa un nuevo modelo de la mano, reduciendo el peso y mejorando los mecanismos de transmisión de articulaciones. Además, se mejoró la estructura de forma que esta se pareciera más a la mano humana. [2]

En Guatemala los animatrónicos han ido surgiendo y volviéndose cada vez más populares en los últimos años. Ejemplos de estos son los animatrónicos de dinosaurios pertenecientes a Pizza Grizzly y Dino Park. Estos últimos son dueños también de la primera figura animatrónica.

En la Universidad del Valle de Guatemala se ha trabajado en el desarrollo de animatrónicos, sin embargo, los diseños de los últimos años a pesar de ser funcionales se han quedado atrás en cuanto a eficiencia y realismo.

Es por esto por lo que el motivo del presente trabajo es realizar un diseño que no solo permita la obtención de un movimiento de mano y antebrazo funcional, sino también un movimiento fluido y realista. Se pretende con variaciones de movimiento en los actuadores lograr un efecto más humano en vez de obtener un movimiento no uniforme y abrupto.

Además, se pretende que el diseño de este conjunto sea posteriormente utilizado junto con diseños de otras partes del cuerpo animatrónico para unirse y en conjunto crear un animatrónico que mimique el comportamiento de un humano.

Este trabajo de graduación es de importancia debido a que en él podré afianzar diversos conocimientos adquiridos a lo largo de mi carrera universitaria. Además, me permitirá no solo tener contacto con grandes distribuidores de Guatemala, sino también tener contacto con tecnología que está empezando a ser desarrollada y explotada en el país.

Me dará también la posibilidad de familiarizarme con procesos de selección y cotización de materiales que podrían ser útiles más adelante en mi vida profesional.

4.1. Objetivo general

Diseñar una mano y antebrazo animatrónicos antropomorfos que cuenten con un movimiento fluido y realista.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar el diseño de las estructuras de la mano y el antebrazo, incluyendo el mecanismo de movimiento de los dedos y muñeca.
- Seleccionar mecanismos de transmisión para generar el movimiento flexor de los dedos, y rotacional de muñeca.
- Realizar un modelo CAD del ensamblaje completo, diseñando piezas factibles y poco complejas de manufacturar.
- Llevar a cabo un análisis de esfuerzos del diseño CAD para comprobar que las estructuras propuestas no fallen.
- Seleccionar los actuadores y materiales según los requerimientos del animatrónico.
- Construir un prototipo funcional de la mano y antebrazo.

El presente trabajo de graduación tiene como propósito el diseño e implementación de mano y antebrazo para un animatrónico. Estos deben tener un aspecto semejante a la anatomía humana, por lo que se diseñó por completo estas estructuras, basadas en las mediciones de un humano de referencia.

Este diseño busca conseguir un movimiento fluido y realista por medio de la implementación de un mecanismo flexor-extensor para todos los dedos y un movimiento rotacional en la muñeca. Para el dedo pulgar se incorporó adicionalmente un mecanismo abductor-aductor para que el movimiento combinado fuera más parecido al movimiento de agarre prensil humano.

Debido a que el objetivo principal de este conjunto es exhibición, no se espera que el antebrazo sea capaz de sostener y soportar un objeto con un peso mayor que el de la mano y antebrazo. Sin embargo, es importante para el diseño que este sea robusto y que pueda ser sometido a ciertos esfuerzos para poder alargar la vida útil del mismo. Se realizaron ciertas suposiciones de esfuerzos a los que el diseño fuera capaz de soportar, así como condiciones de trabajo según el lugar donde este sea exhibido.

Para el movimiento de los dedos se diseñó un mecanismo de accionamiento por medio de tendones. Para el movimiento de la muñeca fue necesario diseñar un acople para unir la mano al eje del motor. Además, se diseñó un acople para unir las estructuras de mano y muñeca al antebrazo.

Se seleccionaron los actuadores encargados de accionar los mecanismos de movimiento elegidos. Estos deben asegurar un movimiento rápido para que pueda reproducir la velocidad promedio de un humano, así como deben tener la capacidad de mover las estructuras correspondientes.

6.1. Fisiología y estructura

6.1.1. Antebrazo

El codo consta de tres articulaciones: humerocubital, radiohumeral y radiocubital. La primera permite un movimiento flexionante y de extensión, las otras permiten la pronación y supinación. La pronación es el movimiento del antebrazo que permite girar la mano de afuera a adentro y mover la palma hacia abajo o adentro. Mientras que la supinación es el movimiento del antebrazo que permite girar la mano de adentro hacia afuera y mover la palma hacia arriba o adelante. [3]

Todos los músculos del antebrazo que se originan en la región del codo actúan sobre la muñeca y los dedos, y secundariamente sobre la articulación del codo. Estos se muestran en la Figura 1. [3]

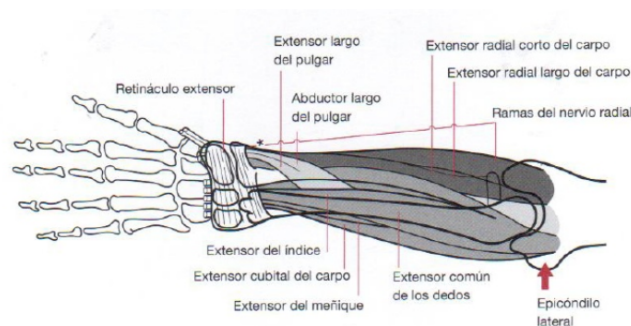


Figura 1: Músculos extensores del antebrazo. [3]

Los músculos radiales (extensor radial (ER), y flexor radial (FR)) se originan en la cresta supracondílea. Los músculos cubitales (extensor cubital (EC) y flexor cubital (FC))

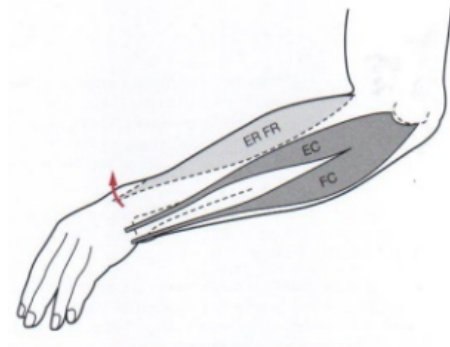


Figura 2: Origen de los músculos extensores del antebrazo. [3]

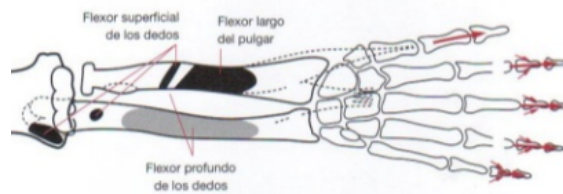


Figura 3: Origen de los músculos flexores. [3]

se originan en el epicóndilo lateral [Figura 2]. El músculo flexor largo del pulgar y los flexores superficial y profundo de los dedos se originan en la porción intermedia del radio y el cúbito [Figura 3]. [3]

6.1.2. Muñeca

La mano puede moverse de forma radial y de forma cubital gracias a la muñeca. En ambos movimientos el carpo se mueve en dirección opuesta a la mano, es decir, cuando la mano se mueve de forma radial el carpo se desliza cubitalmente y cuando la mano se mueve cubitalmente el carpo se desliza al radio [Figura 8]. [3]

Ligamentos de la muñeca

Los ligamentos longitudinales radial y cubital, y los ligamentos transversos y oblicuos de la mano no solo le brindan sujeción, sino también permiten que exista movimiento en la misma. [3]

Cuando la mano se desvía radialmente intervienen los ligamentos colaterales cubitales tensándose. Estos son los que nacen en la apófisis estiloides cubital y en el ligamento triangular que se une al hueso pisiforme. [3]

Por otro lado, cuando la mano se desvía en dirección cubital, el ligamento colateral radial es el que tensa. Este nace en la apófisis estiloides del radio y se une al hueso escafoide hasta llegar al trapecio y el primer metacarpiano. [3]

El ligamento arqueado de Henle está formado por los ligamentos palmares cubitales y radiales, quienes se unen a los huesos semilunar y grande convergiendo en la línea media. Los ligamentos dorsales son más laxos y menos simétricos. [3]

Cuando sucede la supinación de la mano los ligamentos palmares se tensan, mientras que la pronación tensa los ligamentos dorsales. La amplitud de los movimientos depende de la laxitud de las estructuras ligamentosas. [3]

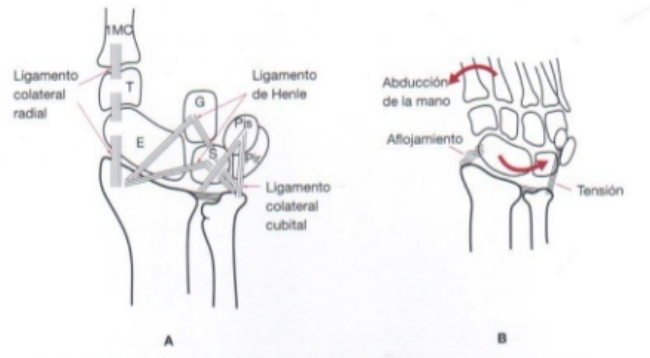


Figura 4: Ligamentos de la muñeca. [3]

Huesos de la muñeca

La articulación de la muñeca es la que se encuentra entre el antebrazo y los huesos del carpo. Existen ocho huesos carpianos distribuidos en dos filas: la proximal y la distal, como se muestra en la Figura 5, cada hueso tiene forma cuboidea con seis superficies. [3]

Cuatro de estas seis superficies se articulan con otros huesos del carpo y es por eso que están cubiertas por cartílago. Las dos restantes, dorsal y ventral, por el contrario están descubiertas y tienen la superficie rugosa para así permitir inserciones ligamentosas. Cada superficie del hueso carpiano es simétrica con respecto a la superficie opuesta con la que se une mediante ligamentos intercarpianos [Figura 6]. [3]

La fila proximal está formada por los huesos escafoides, semilunar, piramidal, y el pisiforme que se encuentra en la superficie palmar del hueso piramidal. Esta fila se articula con el radio y el cúbito para formar la articulación de la muñeca. [3]

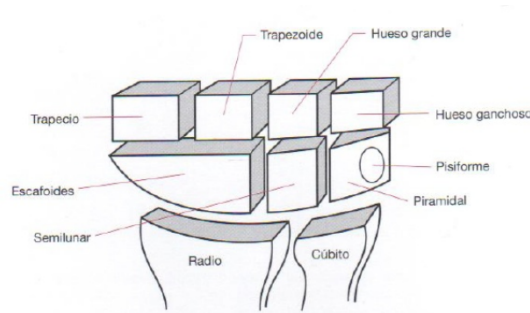


Figura 5: Huesos carpianos de la muñeca. [3]

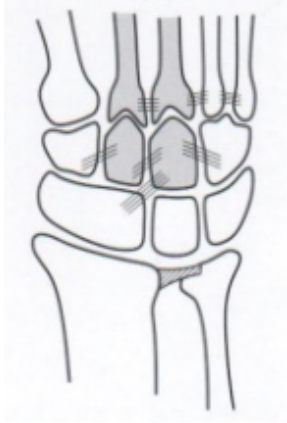


Figura 6: Ligamentos intercarpianos. [3]



Figura 7: Sección transversal de la muñeca. [3]

La fila distal está formada por el trapecio, trapezoide, hueso grande y hueso ganchoso. Los primeros dos se articulan con el escafoides, el hueso grande y el semilunar; el hueso ganchoso se articula con el piramidal. Ningún hueso del carpo se articula con el cúbito. [3]

El arco palmar se mantiene gracias al ligamento transversal del carpo. Este ligamento está unido al tubérculo del hueso escafoides y se extiende hasta el pisiforme. El ligamento puede relajarse en cierta medida cuando el músculo se contrae. [3]

Túnel del carpo

Los ligamentos transversos encierran la concavidad de los huesos del carpo formando el túnel del carpo. Este túnel contiene los tendones del flexor profundo de los dedos, los tendones del flexor superficial de los dedos, el flexor radial del carpo, el flexor largo del pulgar, y el nervio mediano [Figura 7]. [3]

En la muñeca se encuentran siete tendones que se encargan de transmitir la fuerza

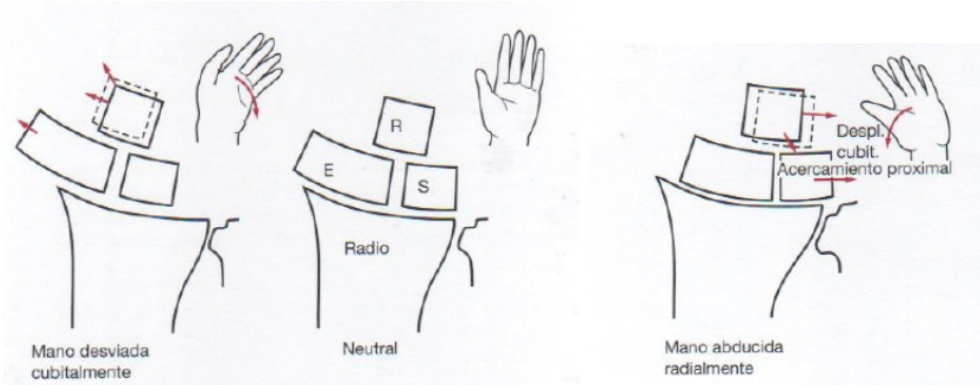


Figura 8: Movimiento deslizante de la articulación radiocarpiana. [3]

ejercida por los músculos extrínsecos del antebrazo a los dedos. En la Figura 7 se muestran los tendones flexores: Flexor radial del carpo (FRC), flexor superficial de los dedos (FSD), flexor profundo de los dedos (FPD), flexor cubital del carpo (FCC), el extensor radial del carpo (ERC), el extensor de los dedos (ED) y el extensor cubital del carpo (ECC). Además, se muestra el cúbito (C) y el radio (R). [3]

Túnel cubital

Es un pasillo entre el hueso pisiforme y el gancho del hueso ganchoso. Contiene el nervio cubital, los vasos sanguíneos y el tendón del músculo flexor cubital de la muñeca. También es llamado canal de Guyón. [3]

6.1.3. Mano y dedos

Metacarpianos

Los metacarpianos se articulan con el borde irregular de la fila distal del carpo. El movimiento de los metacarpianos varía en cada uno de ellos. El pulgar rota sobre su base y todos los metacarpianos se mueven de forma compleja sobre su base correspondiente. Estos movimientos dependen de la función y de su articulación y musculatura. [3]

Articulación metacarpofalángica

Desde la posición de extensión completa la flexión inicial del falange proximal empieza con la flexión alrededor del eje de la porción distal, de forma tangencial a la palma. Cuando ya está flexionado hacia el eje de la cara redonda el falange proximal se flexiona alrededor. [3]

Cuando los dedos están extendidos los ligamentos colaterales de la articulación metacarpofalángica están laxos. Esto permite el movimiento de abducción y aducción. Cuando

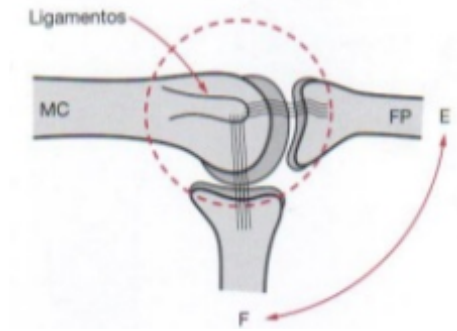


Figura 9: Ligamentos colaterales de la articulación metacarpofalángica. (E) dedo Extendido, (F) dedo Flexionado, (MC) Metacarpiano, (FP) Falange Proximal. [3]

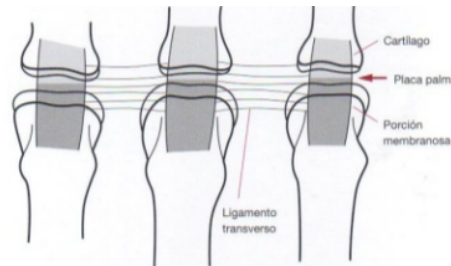


Figura 10: Placas palmares. [3]

se alcanzan los 90° de flexión los ligamentos se tensan por lo que en la posición del dedo flexionado no es posible la abducción ni la aducción [Figura 9]. [3]

Los ligamentos colaterales empiezan en un pequeño tubérculo que se encuentra en las caras laterales de la cabeza de forma excéntrica. Cuando están extendidos los ligamentos permiten el movimiento lateral. En la cara dorsal de la articulación metacarpofalángica no hay ligamentos. En la cara palmar de la cápsula hay placas que limitan la movilidad [Figura 10]. [3]

Falanges

En cada mano existen catorce falanges. Todos los dedos, a excepción del pulgar contienen tres falanges como se muestra en la Figura 11. [3]

Las articulaciones interfalángicas son articulaciones bisagra que permiten flexión y extensión. Mientras que las articulaciones metacarpofalángicas permiten abducción, aducción y circunducción. [3]

Los ligamentos colaterales no existen en las articulaciones interfalángicas. [3]

Gracias a la basta cantidad de músculos y articulaciones que se encuentran en la mano existe gran variedad de configuraciones de sujeción. Dichas configuraciones pueden ser divididas en: prensiles y no prensiles. La primera se refiere a movimientos en los que un objeto es tomado y sostenido de forma parcial o total dentro de la mano. El segundo se refiere a movimientos en los cuales no son realizadas acciones de agarre pero los objetos si pueden

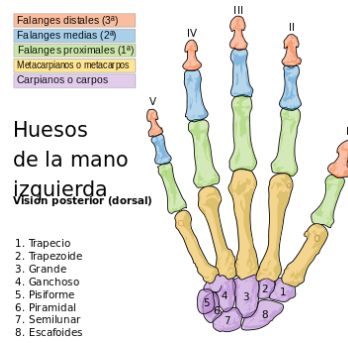


Figura 11: Huesos de la mano. [4]

ser manipulados con la mano entera o con los dedos. [5]

En 1919, Schlesinger en un estudio de destreza de las manos humanas clasificó la taxonomía y agrupó en seis categorías los agarres de mano humana. [5]

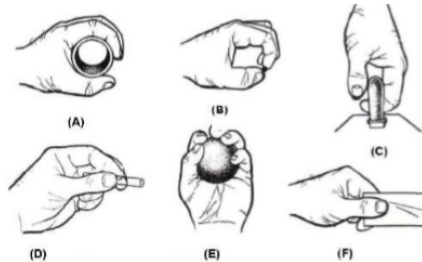


Figura 12: Agarres prensiles humanos. [5]

En la Figura 12 se describen las seis categorías de Schlesinger como: (A) Cilíndrico, (B) de punta, (C) de gancho, (D) palmar, (E) esférico, y (F) lateral. [5]

Tendones flexores

Cada tendón flexor profundo es insertado en la base del falange distal, mientras que el flexor superficial se divide a la mitad del falange proximal. En la mitad de la articulación interfalángica proximal se forma una V con una extensión media y una lateral. Cada una de estas extensiones se divide y cruza al lado contrario [Figura 13]. [3]

Una cuarta parte del tendón original pasa por debajo del tendón profundo. El tendón profundo se inserta a lo ancho de la base del falange distal en la placa palmar [Figura 14]. [3]

6.1.4. Músculos intrínsecos

Estos músculos se originan en la mano y se dirigen a los dedos. Se dividen en los siguientes grupos musculares:

- Tenar: Encargado de las funciones del pulgar.

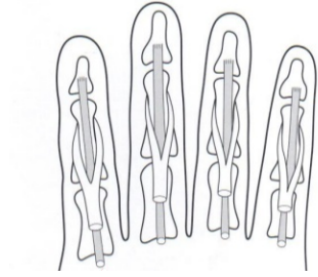


Figura 13: Inserción de los tendones flexores. [3]

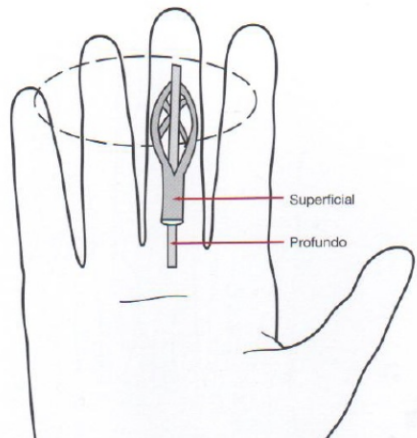


Figura 14: Mecanismo flexor. [3]

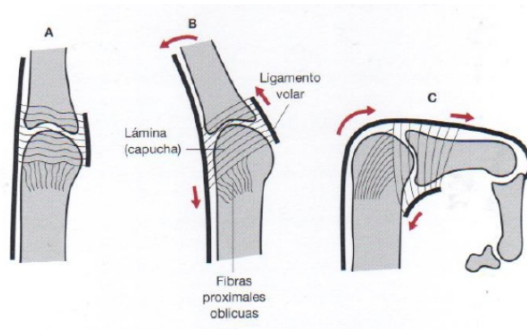


Figura 15: Mecanismo extensor. [3]

- Hipotenar: Encargado de las funciones del muñique.
- Interóseos y lumbricales: Encargados de la aducción y la abducción de los dedos. Se combinan con los tendones extensores para extender lo dedos.

6.1.5. Rangos de movilidad

En la Figura 17 se puede observar que la muñeca se desvía 20° de forma radial y 30° de forma cubital. [3]

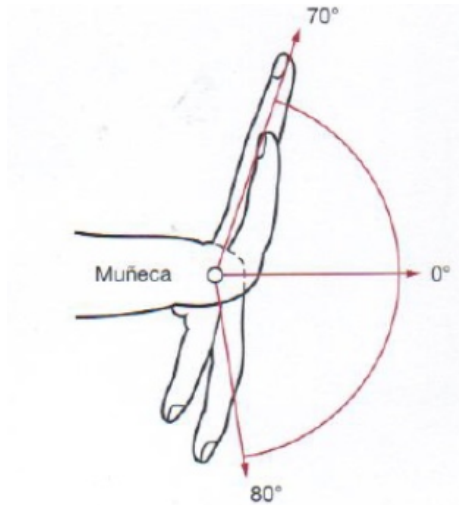


Figura 16: Medición de amplitud del movimiento de muñeca. [3]

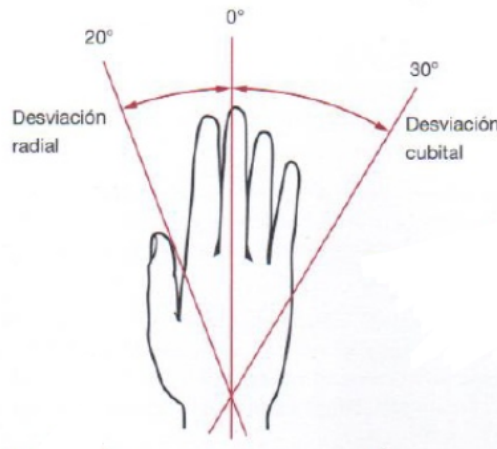


Figura 17: Medición de las desviaciones radiales y cubitales. [3]



Figura 18: Arco de movilidad en movimiento de flexión-extensión metacarpofalángica del pulgar. [6]

En las Figuras 18 y 19 se puede observar el rango de movimiento de flexión-extensión en el pulgar, mientras que la Figura 20 muestra el movimiento de abducción-aducción [6]. La Figura 18 describe un arco de 50° de flexión sin ángulo de extensión. La Figura 19 muestra

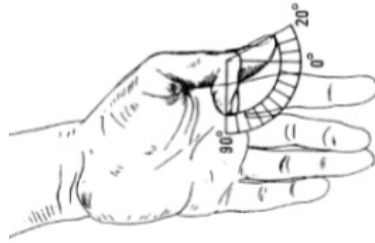


Figura 19: Arco de movilidad en movimiento de flexión-extensión interfalángica del pulgar. [6]

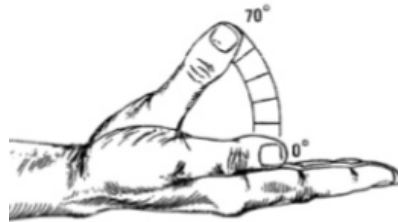


Figura 20: Medición de amplitud palmar del pulgar. [6]

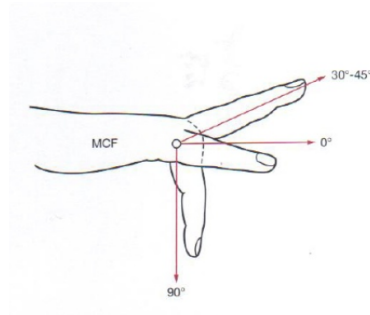


Figura 21: Medición de amplitud de las articulaciones metacarpofalángicas. [3]

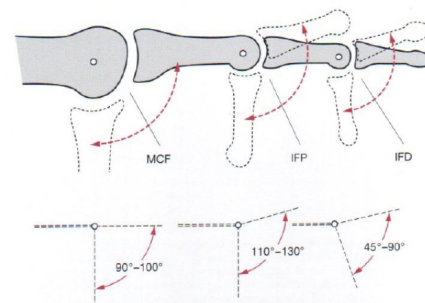


Figura 22: Medición de amplitud de las articulaciones interfalángicas. [3]

un arco total de 90° a 110°, 90° para flexión y 0° a 20° para la extensión. En las Figuras 21 y 22 se puede observar el rango de movimiento de flexión-extensión del resto de los dedos de la mano. [6]

En la Figura 23 se muestran los movimientos básicos que puede realizar la mano. [3]

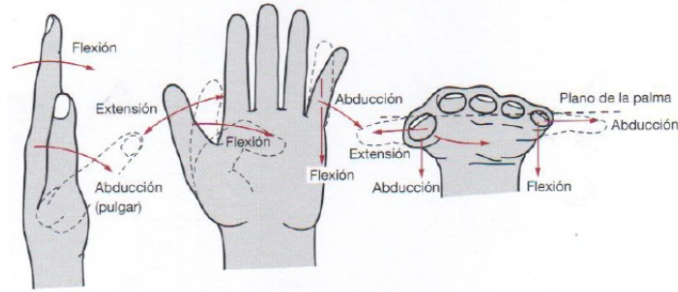


Figura 23: Movimientos básicos de la mano. [3]

6.2. Materiales

6.2.1. Grilón

Es un termoplástico que se obtiene de la poliamida 6. Tiene excelentes propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, químicas y además puede modificarse con aditivos. Resistente a golpes, fatiga y desgaste. Es fácil de mecanizar y puede soportar temperaturas de 10 a 100°C. [7]

Propiedades	
Densidad (g/cc)	1.14

Tabla 1: Propiedades Grilón. [8]

Propiedades térmicas	
Temperatura de uso (°C)	
-Máxima	90
-Mínima	-40

Tabla 2: Propiedades térmicas Grilón. [8]

Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad (Kg/cm ²)	14000
Tensión para fluencia (Kg/cm ²)	450
Resistencia a la flexión (Kg/cm ²)	400
Compresión (Kg/cm ²)	
-Esfuerzo al 1 % deformación	150
-Esfuerzo al 2 % deformación	280

Tabla 3: Propiedades mecánicas Grilón. [8]

6.2.2. Ertalón

Nylon 6 no modificado que se obtiene por medio de colada. Combina alta resistencia, rigidez, tenacidad y dureza, con resistencia a la fluencia y desgaste. Tiene alta capacidad de amortiguación mecánica y de mecanizado. [9]

Propiedades	
Densidad (g/cc)	1.15

Tabla 4: Propiedades Ertalón. [10]

Propiedades térmicas	
Temperatura de uso (°C)	
-Cortos	170
-Largos	105/90
-Mínima	-30

Tabla 5: Propiedades térmicas Ertalón. [10]

Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad (MPa)	
-Material seco	3600
-En equilibrio (23°C/50%RH)	1750
Tensión para fluencia (MPa)	
-Material seco	86
-En equilibrio (23°C/50%RH)	55
Compresión (MPa)	
-Esfuerzo al 1% deformación	34
-Esfuerzo al 2% deformación	64
-Esfuerzo al 5% deformación	93

Tabla 6: Propiedades mecánicas Ertalón. [10]

6.2.3. Acetal

Termoplástico o plástico técnico con mucha dureza y buena estabilidad dimensional. Tiene alta resistencia mecánica, dureza y tenacidad. Es fácil de mecanizar, resistente a la fricción y puede resistir temperaturas de hasta 130°C. [11]

Propiedades	
Densidad (g/cc)	1.41

Tabla 7: Propiedades Acetal. [12]

Propiedades térmicas	
Temperatura de uso (°C)	
-Máxima	140
-Mínima	-50

Tabla 8: Propiedades térmicas Acetal. [12]

Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad (Kg/cm ²)	33000
Tensión para fluencia (Kg/cm ²)	700
Compresión (Kg/cm ²)	
-Esfuerzo al 1% deformación	160
-Esfuerzo al 2% deformación	300
Resistencia a la flexión (Kg/cm ²)	1200
Coefficiente de roce	
-Estático S/Acero	0.35 A 0.45
-Dinámico S/Acero	0.25 A 0.4

Tabla 9: Propiedades mecánicas Acetal. [13]

6.2.4. Delrin

Resina acetálica que posee estabilidad dimensional, dureza elevada, rigidez, resistencia y tenacidad, buena resistencia química, buenas propiedades de deslizamiento y abrasión. Sus propiedades son similares a los metales, mecanizable fácilmente con ciclos cortos y rápidos. [14]

Por ser una resina acetálica este material comparte las propiedades mecánicas del acetal que se muestran en las Tablas 7, 8, y 9.

6.2.5. Duraluminio

Es una aleación optimizada para conseguir excelente maquinabilidad, estabilidad de forma, resistencia mecánica elevada, y resistencia a la corrosión. Supera a las aleaciones a base de aluminio duro y es tres veces mas ligero que el acero. Es soldable por proceso TIG o MIG. [15]

Propiedades	
Densidad (g/cc)	2.76

Tabla 10: Propiedades Duraluminio. [15]

Propiedades térmicas	
Temperatura de uso (°C)	
-Máxima	140
-Mínima	-50

Tabla 11: Propiedades térmicas Duraluminio. [15]

Propiedades mecánicas	
Tensión para fluencia (MPa)	460
Tensión de tracción (Mpa)	540

Tabla 12: Propiedades mecánicas Duraluminio. [15]

6.2.6. Impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología que permite crear un objeto físico a partir de un modelo digital. Es de tipo aditiva, ya que agrega material capa por capa. Generalmente entre los materiales que pueden ser utilizados por las impresoras están los siguientes:

PLA

Polyactic acid. Termoplástico compuesto por fuentes orgánicas y reusables. Permite un acabado superficial presentable. [16]

Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad a la tracción (MPa)	2346.5
Esfuerzo de tracción a la deformación (MPa)	49.5
Esfuerzo de tracción a la rotura (MPa)	45.6
Alargamiento a la deformación	3.3 %
Alargamiento a la rotura	5.2 %
Resistencia a la flexión (MPa)	103.0
Módulo de flexión (MPa)	3150.0
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella a 23°C (kJ/m ²)	5.1

Tabla 13: Propiedades mecánicas PLA. [17]

ABS

Acrylonitrile Butadiene Styrene. Minimiza el pandeo y asegura la adhesión entre capas. [18]

Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad a la tracción (MPa)	1681.5
Esfuerzo de tracción a la deformación (MPa)	39.0
Esfuerzo de tracción a la rotura (MPa)	33.9
Alargamiento a la deformación	3.5 %
Alargamiento a la rotura	4.8 %
Resistencia a la flexión (MPa)	70.5
Módulo de flexión (MPa)	2070.0
Resistencia a la prueba de impacto Izod, con mella a 23°C (kJ/m ²)	10.5

Tabla 14: Propiedades mecánicas ABS. [19]

Breakaway

Es un tipo de material de soporte fácil de remover y no necesita un proceso posterior para dar un acabado presentable. Provee buena adherencia a ABS, Nylon, PLA, Tough PLA, CPE, or CPE+. El breakaway tiene como ventajas que ahorra tiempo al retirar el material de soporte, comparado con el PVA no hay que esperar a que se disuelva y no hay que lijar la superficie. [20]

PVA

Polyvinyl Alcohol. Es un material de soporte soluble en agua ideal para modelos complejos con geometrías en voladizo, cavidades internas profundas o geometrías complejas. Provee buena adherencia a PLA, Tough PLA, CPE, y Nylon. [21]

6.3. Mecanismos de transmisión de movimiento

6.3.1. Mecanismos de barras

Comúnmente utilizados en la construcción de prótesis robóticas, en este mecanismo se transmite el movimiento a cada falange al conectarle una barra a cada uno. Elimina el uso de motores para mover las articulaciones. Un inconveniente con la implementación de este mecanismo es que limita los movimientos ya que la flexión se produce al tiempo en las tres articulaciones. Esto reduce la maniobrabilidad de la mano en un gran porcentaje. [22]

6.3.2. Transmisión por poleas

En este mecanismo se une una cuerda en un punto fijo de la polea para evitar deslizamientos y lograr la transmisión de movimiento. Este mecanismo reduce el peso de la mano y mientras el eje de un motor gire la polea girará a la misma velocidad. Pueden montarse diversas poleas y transmitir el movimiento de una polea a otra. [22]

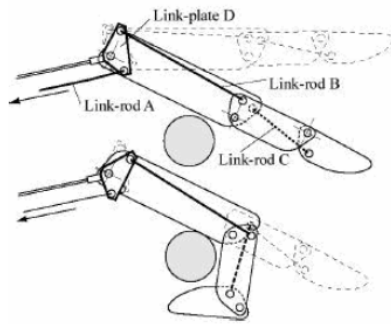


Figura 24: Mecanismos de barras. [22]

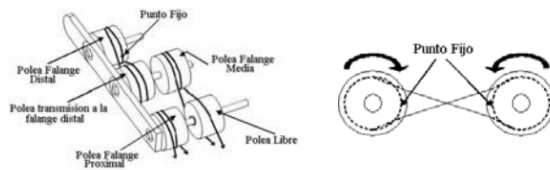


Figura 25: Transmisión por poleas. [22]

6.3.3. Mecanismo con motor en cada junta

Normalmente utilizado en manos robots. Para este mecanismo se montan motores pequeños en cada articulación, lo cual es considerado una estrategia de diseño funcional. El problema de este mecanismo es que incrementa el costo, según la cantidad de motores a utilizar y además aumenta el peso del mecanismo. [22]

6.3.4. Accionamiento por medio de tendones

En muchos robots es difícil controlar los torques de las juntas directamente ya que se requiere un actuador grande para poder ejercer fuerzas significativas. Es por eso que es común el uso de redes de transmisión para transferir las fuerzas de un actuador a la junta requerida. Para realizar dicha red de transmisión por lo general es necesario usar una combinación de eslabones, tendones, engranes y poleas. [1]

Una peculiaridad de utilizar redes de tendones es que la tensión en cada tendón debe ser estrictamente positiva. [1]

Tipos de redes de tendones

Los límites del número de tendones necesarios para construir una red de tendones con cierre por fuerza están dados por el teorema de Caratheodory y el de Steinitz. En el primero se asegura que para un robot con n eslabones se necesita por lo menos $n+1$ tendones para actuarlo por completo. El segundo prueba que si se tienen más de $2n$ tendones entonces son redundantes. A partir de estos teoremas se originaron dos tipos de redes de tendones

conocidas como las configuraciones " $N+1$ " y " $2N$ ". Por lo general, la configuración " $N+1$ " consiste en un tendón que hala todas las juntas en una dirección, y n tendones adicionales que generan torques en la dirección contraria. En la configuración " $2N$ " a cada junta se le unen dos tendones que actúan en direcciones opuestas. [1]

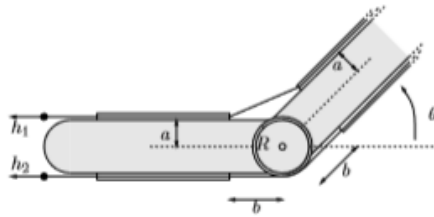


Figura 26: Configuración N+1. [1]

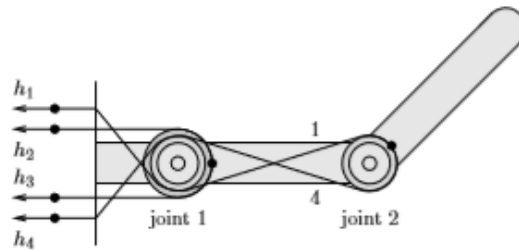


Figura 27: Configuración 2n. [1]

6.4. Actuadores

6.4.1. Motores DC con escobillas

Estos motores son comúnmente utilizados en las manos robóticas, acoplados a cajas reductoras para así aumentar el torque y reducir la velocidad de los mismos. Por efecto electromagnético y el desgaste de las escobillas deben estar en constante mantenimiento. Gracias a la diversidad en tamaños estos se pueden montar en diferentes lugares y en diferentes tipos de grippers permitiendo aumentar los grados de libertad posibles. [22]

6.4.2. Actuadores lineales

Dispositivo que transforma un movimiento rotacional de un motor a un movimiento lineal, de empuje y halado. Estos actuadores ofrecen un movimiento silencioso, de control preciso y seguridad. [22]

6.4.3. Aleaciones con memoria de forma (SMA)

Conformados por uniones metálicas que pueden asumir fases o formas según la acción de diferentes temperaturas. Pueden recuperar su forma original cuando son enfriados. Puede sustituir fácilmente a los motores ya que son más livianos. [22]

6.4.4. Servos Dynamixel

Estos son motores inteligentes desarrollados para ser utilizados exclusivamente para conectar juntas en un robot o estructuras mecánica. Son modulares y pueden conectarse en cadena para poder ser parte de movimientos robóticos flexibles y fuertes. [23]

Los servos digitales AX-12A y XL-320 utilizan una comunicación Half-Duplex UART para realizar escrituras y lecturas sobre los registros que determinan su funcionamiento. [24]

AX-12A

Su secuencia de datos es controlada por el protocolo de comunicación 1.0 que se divide en dos tipos de paquetes de datos. [24]

1. Instruction packet: El paquete de información se envía desde el microcontrolador a los servomotores.

Instruction packet							
0xFF	0xFF	ID	LENGTH	INSTRUCTION	PARAMETER 1...	PARAMETER N	CHECKSUM

Tabla 15: Instruction packet. [24]

2. Status packet: El paquete de información se envía desde el servo hacia el microcontrolador.

Status packet							
0xFF	0xFF	ID	LENGTH	ERROR	PARAMETER 1...	PARAMETER N	CHECKSUM

Tabla 16: Status packet. [24]

0xFF: Indican el inicio de un paquete.

ID: Identificador del servo.

LENGTH: Longitud del paquete (número de parámetros + 2)

INSTRUCTION: Instrucción a realizar.

ERROR: Errores durante comunicación.

PARAMETER 1...N: Información adicional que describe el parámetro enviado.

CHECKSUM: Cálculo que comprueba si el instruction packet es correcto (Checksum = (ID + LENGTH + INSTRUCTION + PARAMETER 1...N)).

[24]

XL-320

Su secuencia de datos es controlada por el protocolo de comunicación 2.0. Este protocolo es similar al descrito anteriormente pero permite desarrollar más acciones de control. [24]

El envío y recepción de secuencias de datos se llevan a cabo programando librerías denominadas ax12a.h y xl320.h. Algunas de las funciones más comunes se describen a continuación.

xl320.h

- `setJointSpeed(servoID, speed)` : Le asigna una velocidad de movimiento al servo con ID (servoID). Las velocidades se manejan en valores de 0 a 1023 (0x3FF), donde la unidad corresponde a aproximadamente 0.111 RPM. Si se configura 0 como speed se usará la velocidad máxima del servo; si se configura 1023 es aproximadamente 114 RPM. [25]
- `LED(servoID, position)` : Le asigna un color al LED indicador del servo, permitiendo así llevar un control más visual. El LED indica el estado presente del dispositivo como se muestra en la Tabla 18.
- `moveJoint(servoID, position)` : Mueve el servo con ID (servo ID) a la posición indicada. La posición se puede dar como un rango entre 0 y 1023, donde 1023 equivale a un ángulo de 300°. El rango de movimiento para un servo XL-320 se muestra en la Figura 28.

Enabled bit	Decimal Value	Output Color
NONE	0	OFF
0	1	Red
1	2	Green
2	3	Blue
0+1	4	Yellow
1+2	5	Cyan
0+2	6	Purple
0+1+2	7	White

Tabla 17: LED colors. [25]

Status	LED Representation
Booting	Red LED flickers once
Factory Reset	Red LED flickers 4 times
Alarm	Red LED flickers
Boot Mode	Red LED On

Tabla 18: Status of the device. [25]

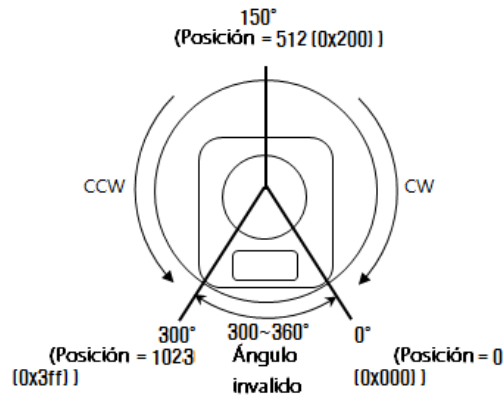


Figura 28: Rango de movimiento. Vista frontal del servo. [25]

ax12a.h

- `move(ID, position)` : Mueve el servo con el ID establecido a la posición indicada. Al igual que en un servo XL-320 esta puede estar entre 0 y 1023, con ángulos equivalentes como se muestra en la Figura 28.
- `moveSpeed(ID, position, speed)` : Cumple el mismo objetivo que la función `move(ID, position)` pero el movimiento sucede con una velocidad específica. Las velocidades se manejan como se describió en la función `setJointSpeed(servoID, speed)`.

Este trabajo de graduación se realizó a lo largo de tres semestres, durante los cuales se trabajó por competencias y tareas que necesitaron análisis, diseño y comprobación. Dichas tareas pueden ser catalogadas en las etapas de investigación, identificación de requerimientos, selección de mecanismos y actuadores, diseño, selección de materiales, validación de diseño, y manufactura y ensamble. Cada una de estas etapas se describen a continuación, por medio de una lista actividades.

Investigación

- I. Se realizó una investigación preliminar de la estructura de la mano, sus tipos de movimientos, y una investigación del movimiento de la muñeca.
- II. Se investigaron diferentes tipos de mecanismos que permitan el movimiento de las diferentes articulaciones.

Identificación de requerimientos

- I. Se definieron los movimientos necesarios para cumplir los objetivos.
- II. Se diseñaron los tipos de articulaciones a utilizar en las uniones de las falanges, y en la muñeca.
- III. Se reconoció la velocidad requerida en los movimientos para lograr un movimiento fluido y realista.

Selección de mecanismos y actuadores

- I. Se determinaron los actuadores a utilizar para accionar los mecanismos de movimiento.

- II. Se determinaron los mecanismos para transmitir el movimiento de las articulaciones de dedos y muñeca.

Diseño

- I. Diseño de estructuras y articulaciones de mano, muñeca y antebrazo.
- II. Se realizó un diseño CAD para la obtención de una imagen del prototipo final previa a su construcción.

Selección de materiales

- I. Se consultó la disponibilidad de los materiales seleccionados.
- II. Se cotizó en empresas guatemaltecas el coste de la manufactura y materiales.

Validación de diseño

- I. Se compararon las trayectorias de movimiento del diseño con el movimiento de una persona para verificar que estas sean acertadas.
- II. Se compararon las velocidades promedio alcanzadas por los dedos del animatrónico, con las velocidades promedio de una persona.

Manufactura y ensamble

- I. Se realizó la construcción de un prototipo funcional.

8.1. Movimientos a realizar

Debido a que la aplicación de este diseño es únicamente exhibición, no es necesario tomar en cuenta las fuerzas que los dedos pueden aplicar.

Además, para imitar el movimiento humano se escogió adaptar los movimientos de flexión y extensión en cada dedo. Con excepción del pulgar, los movimientos de abducción y aducción de los dedos no fueron incluidos ya que a pesar de ser un movimiento elemental para los agarres prensiles humanos, la mano animatrónica no necesita sostener objetos.

El movimiento de abducción y aducción del pulgar, combinado con el movimiento flexor y extensor del resto de los dedos da como resultado un movimiento similar a empuñar la mano.

Para delimitar los movimientos a realizar por la muñeca también fue importante tomar en cuenta que la aplicación final del diseño es únicamente demostración. Se consideró más común y llamativo el movimiento resultado de las desviaciones radiales y cubitales [Figura 17], que el movimiento de flexión y extensión [Figura 16].

Además, dicho movimiento permite reproducir el movimiento generalmente utilizado para saludar. Darle la habilidad de saludar al animatrónico es un valor agregado para en futuras fases del proyecto coordinar interacciones con el público presente.

8.2. Articulaciones

[3] se refiere a las articulaciones interfalángicas como articulaciones bisagra que permiten los movimientos de flexión y extensión [Ver sección 9.1].

Esa afirmación sirvió de inspiración para utilizar bisagras reales para las uniones interfalángicas y metacarpofalángicas. Se buscaron bisagras de barril pequeñas, normalmente utilizadas en manualidades.

Se escogieron bisagras sólidas de cobre de 4 x 17mm, ya que por su diámetro estas pueden ser fácilmente escondidas entre las estructuras de las falanges. Asimismo, 17mm de largo es oportuno ya que permite que una porción significativa de la bisagra se encuentre introducida en el falange correspondiente, permitiendo un buen agarre. Sin embargo, no es lo suficientemente larga como para entorpecer el ensamblaje o movimiento, o modificar de forma relevante los largos de las falanges para poder mantener el tamaño de los dedos.



Figura 29: Bisagras cilíndricas. [26]

Además, para el pulgar se utilizó un eje ortogonal al metacarpiano para unirlo a la palma permitiendo el movimiento abducción-aducción.

Para remedar la articulación radiocarpiana se decidió utilizar directamente el movimiento de un servomotor, ya que estos están diseñados para controlar la posición de su eje y mantenerlo fijo en una posición determinada. Se diseñó un acople para unir el motor escogido [Ver sección 8.5], Dynamixel AX12-A, y la palma de la mano animatrónica [Ver sección 9.2].

8.3. Grados de libertad

Como se definió anteriormente, todos los dedos están compuestos por tres falanges, a excepción del pulgar que está compuesto por dos falanges y un metacarpiano. En los dedos índice, medio, anular y meñique la conexión distal-medial, medial-proximal, y proximal-palma es ejecutada por bisagras cilíndricas [Ver sección 8.2]. En el caso del pulgar la conexión distal-medial y medial-metacarpo se efectúa con las mismas bisagras, mientras que el metacarpo y la palma están unidos por medio de un eje ortogonal.

Para determinar el GDL global de cada dedo se utilizará la **ecuación de Gruebler** con la modificación de Kutzbach

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (1)$$

donde:

M = grado de libertad o movilidad

L = número de eslabones

J_1 = número de juntas de 1GDL (completa)

J_2 = número de juntas de 2GDL (semijunta)

Todos los dedos pueden modelarse entonces como mecanismos de cuatro barras de cadena abierta. Cada falange o metacarpo es un eslabón al igual que la palma, pero esta última es la bancada. La bancada tiene una junta completa rotatoria fija, mientras que el resto de eslabones está unido por una junta completa rotatoria móvil.

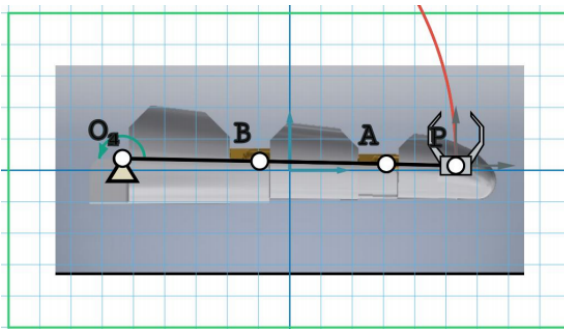


Figura 30: Diagrama cinemático dedos.

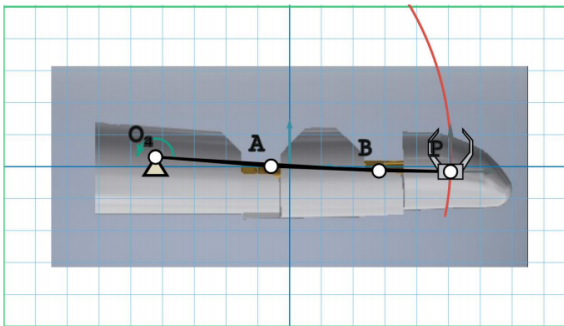


Figura 31: Diagrama cinemático flexión pulgar.

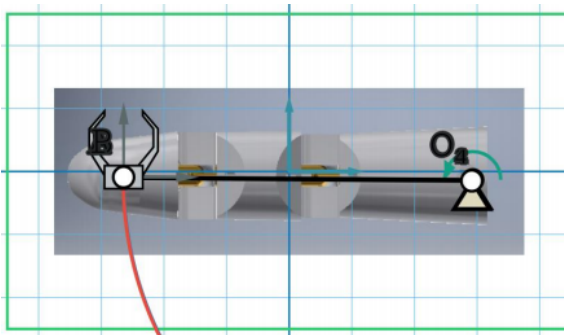


Figura 32: Diagrama cinemático abducción-aducción pulgar.

Como todos los dedos son mecanismos de cuatro barras de cadena abierta, todos tienen

la misma cantidad de grados de libertad. Para cada dedo se cumple $L = 4$, $J_1 = 3$, $J_2 = 0$ por lo que la ecuación (1) da como resultado $M = 3$.

En el caso de la muñeca los eslabones son: la mano completa incluyendo dedos y el acople que se muestra en la Figura 61, y el motor que actúa como la bancada. Por lo tanto, la muñeca puede modelarse como un mecanismo de dos barras de cadena abierta.

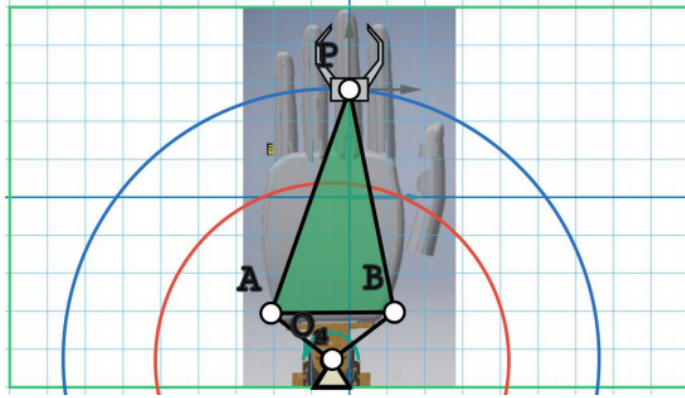


Figura 33: Diagrama cinemático de la mano.

Para este mecanismo $L = 2$, $J_1 = 1$, $J_2 = 0$ y la ecuación (1) da como resultado $M = 1$.

8.4. Velocidades

Para tener una idea general de las velocidades que se requieren alcanzar se utilizó el software de análisis de video y herramienta de modelado Tracker.

Se tomó un video de mi mano izquierda flexionando el dedo índice varias veces, a diferentes velocidades. Haciendo uso de la herramienta se analizó el video para determinar una aproximación de la velocidad promedio del movimiento flexión-extensión con base en cuanto tiempo le lleva a mi dedo pasar de estar en posición extendida a flexionada, y viceversa.

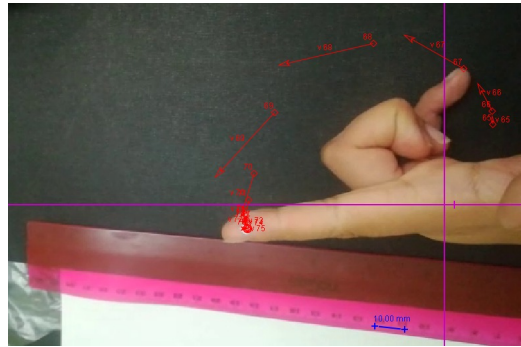


Figura 34: Análisis flexión-extensión dedo índice referencia.

Se encontró que la velocidad media de flexión-extensión de mi dedo índice es 310.177 mm/s. Para facilitar el posterior análisis se generalizó esta velocidad para los dedos índice,

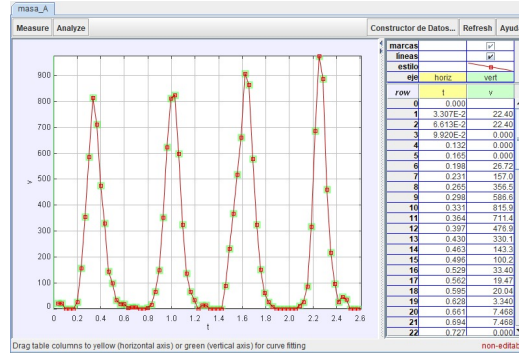


Figura 35: Velocidad (mm/s) alcanzada.

medio, anular y meñique.

En el caso del dedo pulgar se realizó un procedimiento similar. Para analizar el movimiento del pulgar se tomaron dos videos, en cada uno se realiza un movimiento diferente. En el primer video se realizó el movimiento de abducción-aducción. En el segundo video se realizó el movimiento de flexión-extensión. Para cada movimiento se encontró el valor medio de velocidad.

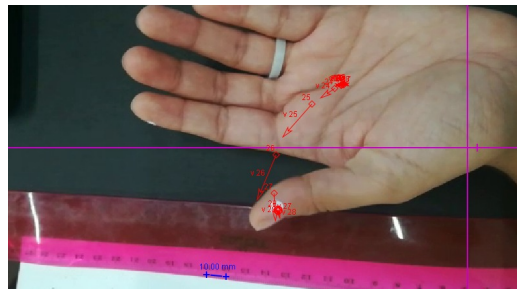


Figura 36: Análisis flexión-extensión dedo pulgar referencia.

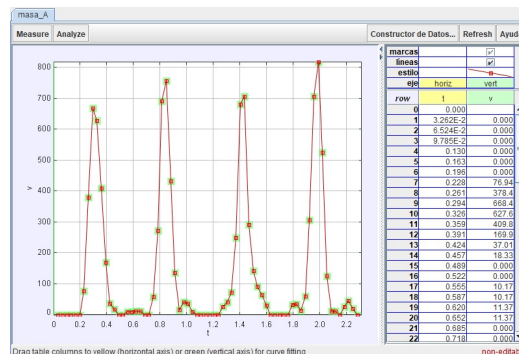


Figura 37: Velocidad (mm/s) alcanzada.

A partir de estos análisis se definió una métrica para poder evaluar los resultados en velocidad del diseño del prototipo final.

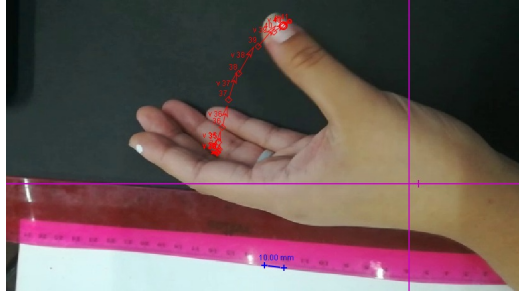


Figura 38: Análisis abducción-aducción dedo pulgar referencia.

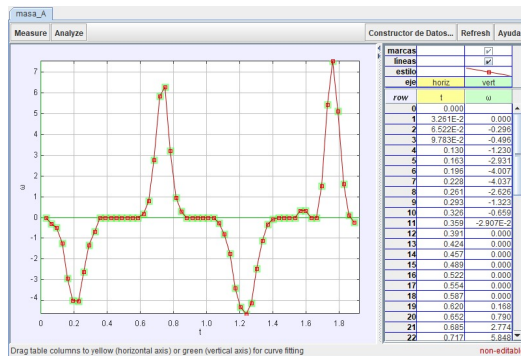


Figura 39: Velocidad (mm/s) alcanzada.

Velocidades de flexión-extensión	
Dedo	Velocidad (mm/s)
Pulgar	220.811
Resto de dedos	310.177

Tabla 19: Velocidades de flexión-extensión alcanzadas.

Velocidad angular abducción-aducción (rad/s)	
Pulgar	0.672

Tabla 20: Velocidad angular de abducción-aducción alcanzada

8.4.1. Métrica de velocidades

Después de conocer las velocidades promedio alcanzadas por la mano de referencia se consideró como una velocidad aceptable si la velocidad del animatrónico se mantenía por lo menos 35 mm/s por arriba o por debajo de la velocidad de referencia. Esto debido a que se estimó que una diferencia de 3.5 centímetros en un segundo no es tan perceptible, por lo que sigue dando la impresión de ser realista.

8.5. Selección de actuadores y mecanismos de transmisión.

8.5.1. Selección de actuadores

Para el movimiento de los dedos y muñeca se dispuso utilizar actuadores Dynamixel no solo por ser ideales para esta aplicación [Ver sección 6.4.4] , sino también por conveniencia ya que se tiene alta disponibilidad en la Universidad del Valle de Guatemala .

Para los dedos, de la variedad de actuadores que esta marca ofrece se optó por utilizar los Dynamixel XL-320 ya que estos son rápidos y serán de utilidad para alcanzar un movimiento fluido. Además, su bajo peso ayuda a que el brazo no quede sobrecargado y de esta forma sea más sencillo para el hombro cargar el peso total del brazo.

Entre sus características convenientes se encuentran:

- Peso: 16.7g
- Torque sin carga: 0.39 Nm
- Velocidad sin carga: 114 RPM
- Voltaje de operación: 7.4V

[23]

Para el movimiento de la muñeca, por otro lado se optó por un motor que contara con más torque, pero que siguiera siendo rápido. El aumento en el torque es importante porque en este caso la muñeca debe ser capaz de mover la mano en su totalidad, cumpliendo con la métrica de velocidades. Se escogió utilizar el dynamixel AX-12A.

- Peso: 55g
- Torque sin carga: 15.3 kg cm
- Velocidad sin carga: 59 RPM
- Voltaje de operación: 12V

[23]

8.5.2. Selección de mecanismos de transmisión

En este trabajo de graduación se optó por accionar los dedos utilizando tendones inelásticos ya que ofrece ventajas como disminución de peso, y flexibilidad para encaminarlos.

La primera ventaja permite que se reduzca el peso ya que los motores transmisores pueden posicionarse estratégicamente. En lugar de tener un motor en cada junta, sumando peso en la mano, se pueden trasladar al antebrazo acercándolo al codo. Mover el punto de

aplicación de la carga de los motores, reduciendo la distancia de estos al punto de apoyo, es beneficioso ya que el codo necesita ejercer menos fuerza, y por ende menos torque.

La segunda ventaja se refiere a que los tendones pueden encaminarse permitiendo el paso ordenado por lugares específicos. Es decir, que independientemente de la geometría de el antebrazo, los dedos y la palma se puede construir un trayecto para que los tendones vayan del generador de fuerza hacia el falange deseado. Sin embargo, esta última ventaja también presenta problemas ya que complica la cinemática del sistema, lo cual puede ser perjudicial para cálculos posteriores.

Se utilizó una configuración " $N+1$ ". A pesar de que cada tendón fue conectado únicamente a un falange, halar un tendón puede generar fuerzas en varias juntas debido a que al momento de halar el tendón este ejerce fuerzas a lo largo de su longitud sobre cualquier parte del mecanismo que lo este sujetando en su lugar.

Se nombraron los tendones según el movimiento que generan: tensor, extensor, abductor y aductor. Todos los tendones son encaminados por medio de trayectorias en el diseño de las falanges [Ver sección 9.1] o por medio de armellas en la base para actuadores. Para los movimientos de flexión y extensión de los dedos se utilizó como tendón principal el extensor, y como tendones opuestos dos tendones flexores. Para los movimientos de abducción y aducción el tendón principal es el aductor y el tendón opuesto el abductor.

Se utilizó un motor para cada par de tendones encargado de movimientos opuestos. Cada tendón de un movimiento se fijó a lados opuestos de una polea [Ver sección 9.5] que gira conforme el giro del motor. De esta manera cuando el motor gire en cierta dirección uno de los dos tendones se enrolla en la polea tensandose mientras que el otro se desenrolla destensandose, generando así el movimiento deseado.

La implementación del mecanismo de tendones es diferente para el pulgar que para el resto de los dedos debido a la diferencia de movimientos a implementar. Para el pulgar se implementó un mecanismo de cuatro tendones: un tensor, un extensor, un abductor y un aductor. Para el resto de dedos el mecanismo a utilizar está compuesto por tres tendones: dos extensores y un flexor.

Por simplicidad el diseño está basado en mi antebrazo y mano izquierda. Todos los diseños fueron realizados utilizando el software Autodesk Inventor. Esta es una herramienta útil para realizar diseño en 3D, simulaciones, modelados, etc.

Para cada estructura diseñada se realizó un sketch a partir del cual se generó una pieza en 3D. A cada estructura se le asignó el material tentativo y una vez con todas las estructuras diseñadas se realizó un modelo CAD del ensamblaje completo.

9.1. Falanges

Para los dedos índice, medio, anular y meñique se realizaron medidas de las falanges proximal, medial y distal utilizando un calibrador vernier digital. De la misma forma, para el dedo pulgar se realizaron medidas de las falanges distal, proximal y metacarpo.

Simplificando la geometría de las falanges de mi mano izquierda a cilindros elípticos, para cada falange se recopilaban cinco mediciones: largo, eje mayor en la base, eje menor en la base, eje mayor en la parte superior, y eje menor en la parte superior.

Por la geometría de las bisagras escogidas para fungir como articulaciones interfalángicas y metacarpofalángicas, se decidió que cinco milímetros de cada extremo serían introducidos en su falange correspondiente. Esto dejó siete milímetros de bisagra expuestos entre falanges, permitiendo movimiento libre. Estos siete milímetros representan el tamaño total del nudillo.

En las falanges proximales y mediales se midió la distancia que hay entre los dos nudillos correspondientes; y en las falanges distales, la distancia que hay desde el nudillo hasta la punta del dedo. Para encontrar el largo total de dichos falanges a cada distancia medida se le resto siete milímetros.

Tomando como referencia la orientación de la mano izquierda mostrada en la Figura 11 la base del falange se fijó cinco milímetros por encima del nudillo inferior, mientras que la parte superior del falange se fijó cinco milímetros por debajo del nudillo superior.

En las falanges distales se midió la distancia existente entre el nudillo y la punta del dedo. Durante el modelado en 3D se redondeo la punta para que el diseño se asemejara a la anatomía humana.

Con estas medidas a la mano se procedió a diseñar y modelar los dedos de la mano.

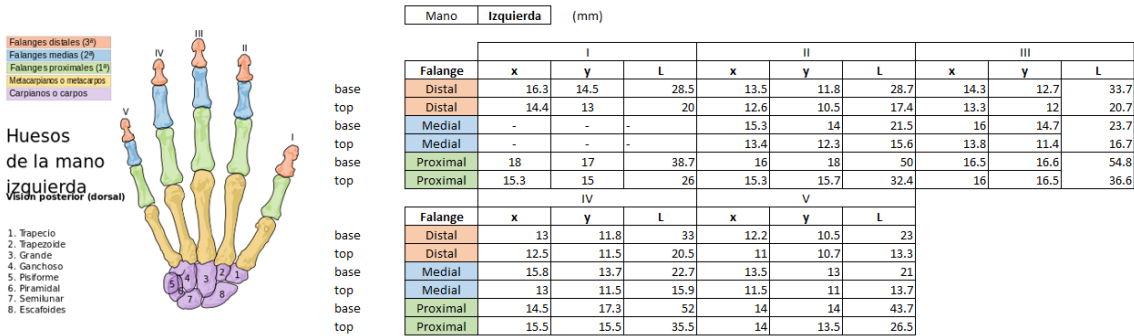


Figura 40: Mediciones de falanges.

9.1.1. Primer prototipo

Este prototipo fue utilizado únicamente para tener una idea general de la geometría de los dedos según las mediciones tomadas.

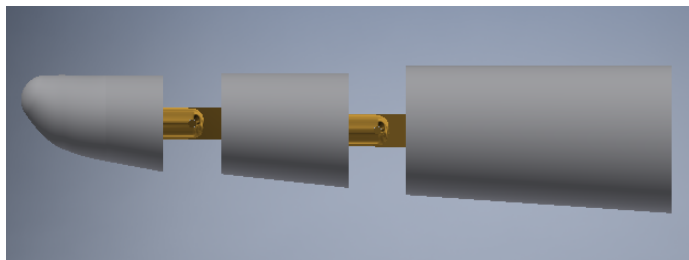


Figura 41: Prototipo 1: Ensamble de dedo índice.

Debido a que el rango de movilidad de las bisagras excede los 90° al extender el dedo el movimiento no es controlado. Es decir, cuando cada falange se extiende giraba más de lo requerido resultando en una posición no natural. Además, la trayectoria que seguía tampoco era la deseada ya que el falange distal no era el último en extenderse [Figura 42].

Por otro lado, en el movimiento de flexión se genera una colisión entre los eslabones antes de que se logre alcanzar la posición deseada [Figura 43].

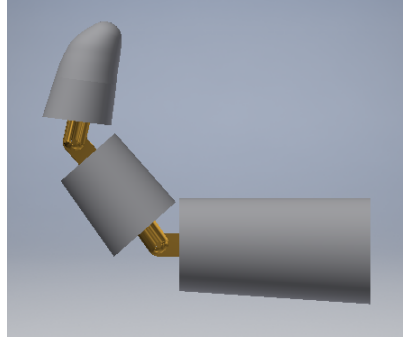


Figura 42: Prototipo 1: Defecto al extenderse.

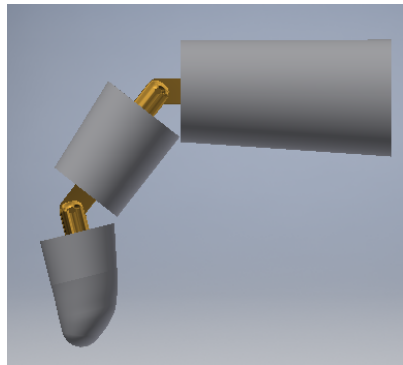


Figura 43: Prototipo 1: Defecto al flexionarse.

9.1.2. Segundo prototipo

En este prototipo se implementó el mecanismo para flexión-extensión en todos los dedos. A cada falange y metacarpo se le incluyó por la parte frontal un trayecto que se encarga de darle dirección a el tendón flexor. Por la parte dorsal del dedo se incluyó el trayecto que encamina el tendón extensor. En el falange distal se agregó un agujero en la yema del dedo y en donde se ubica la uña para asegurar ahí el extremo del tendón correspondiente. Dichos trayectos se muestran en las Figuras 46 y 47.

Fue necesario incorporar en el diseño un impedimento físico que delimitara el rango de movimiento de cada falange al extenderse. Se agregó una estructura encargada de evitar que los dedos al extenderse fueran flexionados hacia la parte posterior de la palma. Después de aplicarlo la trayectoria del movimiento de extensión fue el deseado. Se encontró que a pesar de lograr restringir el movimiento durante la extensión, era posible para las falanges girar con respecto al eje Z como se muestra en la Figura 48.

También, se incorporó un ángulo de 45° en la parte frontal superior e inferior de cada falange para prevenir la colisión entre falanges [Ver Figura 46] y así aumentar el ángulo de flexión del animatrónico para que este se encuentre entre los rangos mostrados en las Figuras 22 y 21. La flexión total alcanzada mejoró visualmente y se encuentra entre los rangos aceptados por lo que el ángulo se conservo así [Ver Figura 45].

Se observó que con el tendón flexor conectado al falange distal el primero en flexionarse

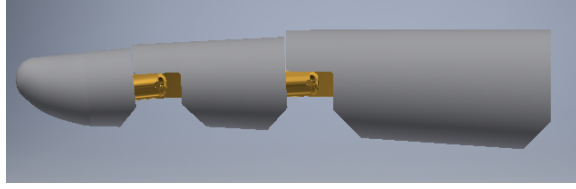


Figura 44: Prototipo 2.

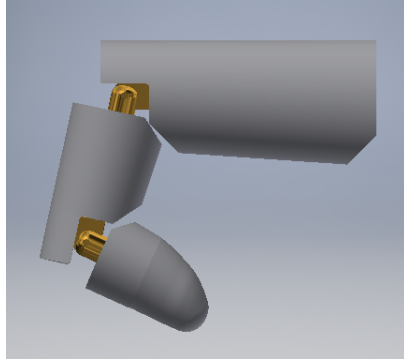


Figura 45: Prototipo 2: Flexión alcanzada.

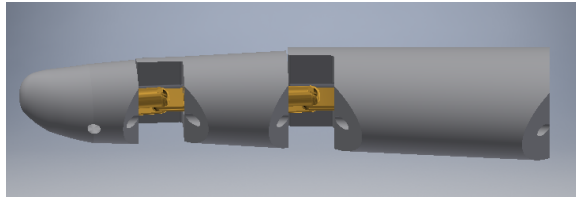


Figura 46: Prototipo 2: Trayectos para tendones flexores.

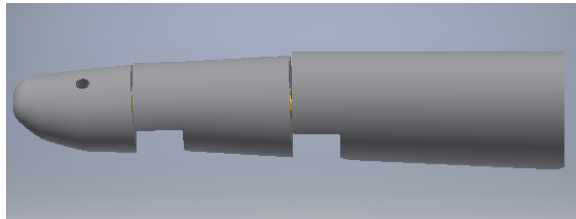


Figura 47: Prototipo 2: Trayectos para tendones extensores.

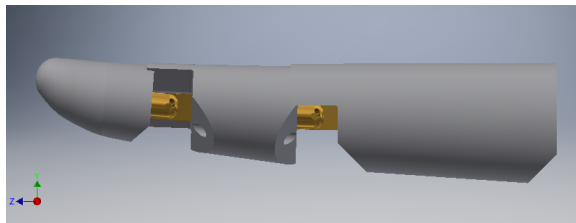


Figura 48: Prototipo 2: Defecto desviación.

es este, seguido del falange medial y por último el proximal. Por otro lado, un humano encoge primero el falange medial, seguido del distal y por último el proximal.

9.1.3. Tercer prototipo

Se sustituyó el impedimento físico que delimita el movimiento de extensión de forma que evitara el movimiento de las falanges con respecto al eje Z. Para ello se utilizó de referencia la geometría de las falanges del InMoov [27]. A diferencia del InMoov este mecanismo solo se encarga de evitar el movimiento descrito anteriormente, mientras que en el InMoov también funciona como articulación interfalángica o metacarpofalángica. En la base de las falanges proximales se agregó este impedimento para que funcione de unión con la palma, ya que antes no existía [Figura 50].

Para los dedos índice, medio, anular y meñique se agregó un segundo tendón flexor amarrado al falange medial para que el movimiento de flexión fuera más parecido al movimiento humano.

Por cuestiones puramente estéticas se redondeo el falange distal para que este fuera menos punteagudo. Se redujo por aproximadamente 10 mm el largo del falange proximal, ya que en la palma se incorporó un nudillo y al ensamblar el dedo quedaba 10 mm más largo que la referencia [Figura 49].

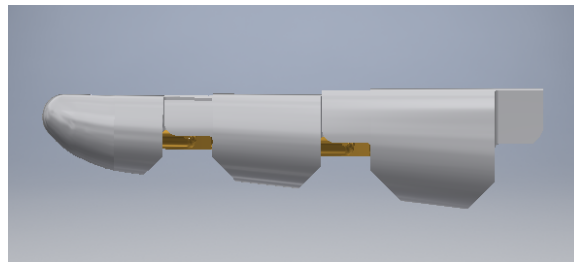


Figura 49: Prototipo 3.

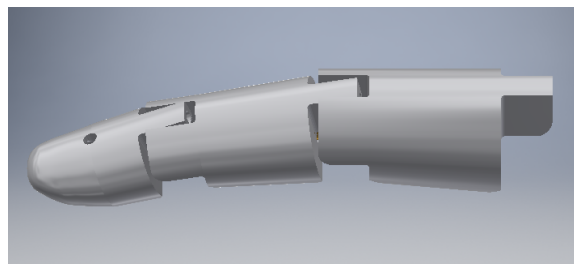


Figura 50: Prototipo 3: Mecanismo de control de extensión.

Para el dedo pulgar no se agregó el mecanismo de control de extensión para el metacarpo ya que no era necesaria. En la parte frontal del metacarpo se agregó un agujero para encajar ahí el eje que lo une a la palma. Dicho eje se posicionó en ángulo de 104° con respecto a la horizontal. Al metacarpo se le incluyó por la parte dorsal el trayecto para encaminar el tendón flexor y el extensor, y por la parte de enfrente se incluyó un trayecto que se conecta con el trayecto de la parte dorsal. A cada lado se incluyó un trayecto, uno para el tendón abductor y uno para el aductor.

9.2. Palma

La palma también está basada en mi mano izquierda, y de igual forma se utilizó un vernier digital para tomar mediciones de:

- El alto desde la muñeca a las articulaciones metacarpofalángicas.
- Ancho en la base de la palma, donde se une con la muñeca.
- Ancho a la mitad vertical de la palma.
- Ancho en la parte superior de la palma, donde se encuentran las articulaciones metacarpofalángicas.

Para crear la geometría general de la palma se realizó un sketch en Inventor comprendido por tres líneas de construcción horizontales del largo de los anchos mencionados anteriormente. Se procedió a conectar las líneas por medio de arcos de radios estimados, hasta lograr una geometría similar a mi mano.

El diseño de la palma se dividió en dos estructuras: una frontal y una trasera. Ambas tienen la geometría general de la mano y son unidas por medio de un par de tornillos. En la parte dorsal se incluyó el agujero para las articulaciones metacarpofalángicas, el mecanismo de control de extensión de cada dedo y los trayectos que encaminan los tendones. En ella se insertan los dedos y en su mayoría está vacía, para no utilizar tanto material y para que los tendones tengan espacio para moverse sin enredarse entre ellos. Con la parte frontal de la palma los tendones estarán protegidos, pero accesibles.

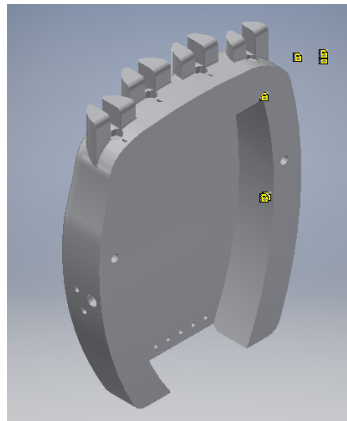


Figura 51: Palma: Parte trasera vista isométrica.

En la parte trasera de la palma, al costado derecho se le agregó el agujero para el eje que sostiene y permite el movimiento del pulgar, al igual que los trayectos de los cuatro tendones del pulgar. Solamente se utilizó un trayecto para cada par de tendones encargados de un movimiento.

En la parte interna de la palma trasera se incluyó también cinco agujeros donde se atornillaran armellas con las especificaciones que se muestran en la Tabla 21.



Figura 52: Palma: Parte trasera vista de lado.

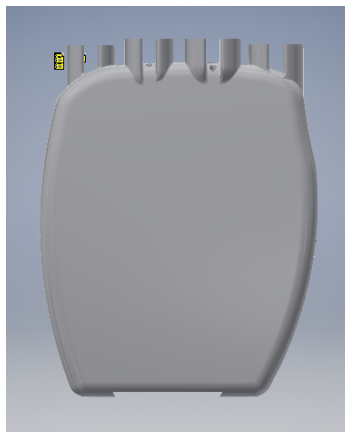


Figura 53: Palma: Parte trasera vista trasera.

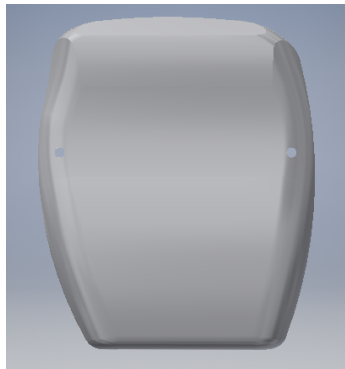


Figura 54: Palma: Parte frontal vista frontal.

Diámetro del alambre	Largo total	Abertura interior	Máx. peso para colgar
0.79 in	5/8 in	3/16 in	20 lb
0.20 cm	1.59 cm	.48 cm	9 kg

Tabla 21: Armellas [ACE]

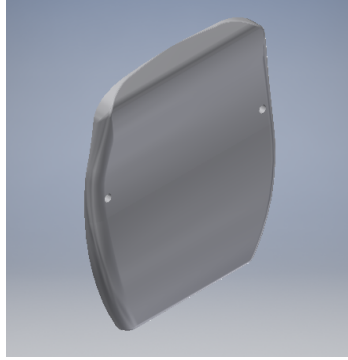


Figura 55: Palma: Parte frontal vista isométrica.



Figura 56: Palma: Parte frontal vista de lado.

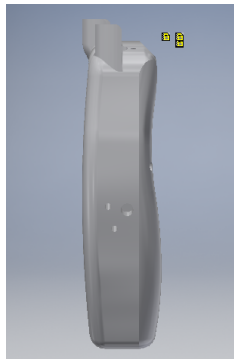


Figura 57: Palma completa vista de lado.

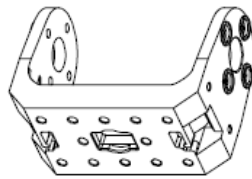
Cada armella es utilizada para dirigir los tendones de su dedo correspondiente. Asimismo, se incluyeron dos agujeros donde se sujetaron los cojinetes que trae incluido el AX-12A [Figura 58] para utilizarlos como poleas. Se utilizaron para que la dirección de la tensión sea paralela al movimiento que se desea generar.



Figura 58: Cojinete AX-12A. [28]

9.3. Muñeca

Para unir el servo con la palma se diseñó un acople inspirado en el acople F04-F2 que el motor ya trae incluido. Dicho acople se muestra en las Figuras 59 y 60.



FP04-F2

Figura 59: FP04-F2. [29]

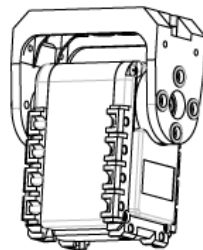


Figura 60: FP04-F2 ensamblado. [29]

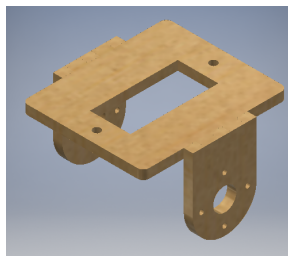


Figura 61: Diseño articulación radiocarpiana.

Para ensamblarlo es necesario alinear los agujeros de la articulación, mientras está vertical, con los del servo cuando este se encuentra en la posición 512 como se muestra en la Figura 28. Una vez alineado se debe asegurar utilizando los tornillos que el servo trae inclui-

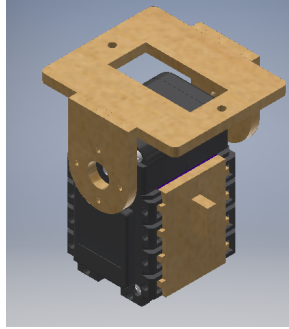


Figura 62: Articulación radiocarpiana ensamblada.

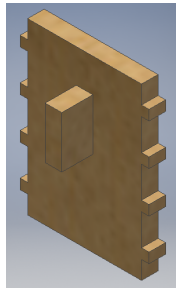


Figura 63: Carril.

dos. Los dos agujeros que se pueden observar en la parte superior son para poder atornillar la mano a la base, y el cuadrado es para que los siete tendones del animatrónico puedan pasar por la muñeca; similar a la forma en la que los siete tendones pasan por la muñeca en un humano [Figura 7].

Se diseñó también un acople para fijar el servomotor en el antebrazo. Para ello se realizó una estructura que encaja a presión a un costado del servo. Esta tiene un pequeño carril [Figura 63] que se incrusta en la carrilera del antebrazo [Ver sección 9.4]. De esta forma se restringe el giro del motor con respecto al antebrazo.

Para asegurar el motor en el antebrazo a una altura específica se colocó sobre la estructura que sujeta los motores encargados del movimiento de los dedos. Se aprovechó la tensión de los tendones para mantenerlo siempre en su lugar.

9.4. Antebrazo

El antebrazo está también basado en mi brazo izquierdo, y es aquí donde se albergan los seis motores necesarios para generar el movimiento de los dedos; similar a como los músculos extensores y flexores del humano son originados en el antebrazo [Ver Figuras 2 y 3].

El diseño del antebrazo es hueco por dentro, para utilizar poco material y aprovechar el espacio disponible para acomodar y esconder los actuadores de forma conveniente. Cuenta con una carrilera, en la que encaja la base y el acople de la muñeca.

La base para los actuadores tiene la geometría del contorno del antebrazo y es del grosor

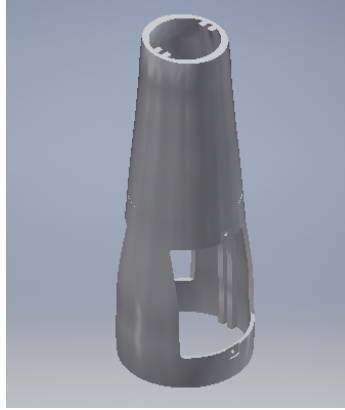


Figura 64: Primer prototipo antebrazo: Vista isométrica.

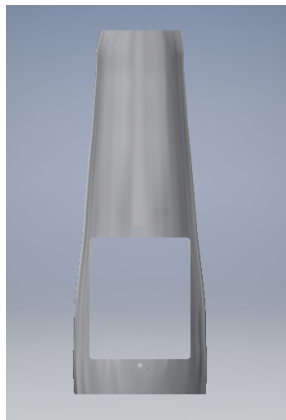


Figura 65: Primer prototipo antebrazo: Vista frontal.

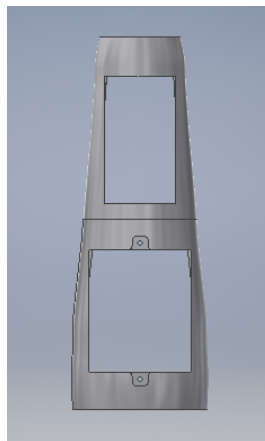


Figura 66: Segundo prototipo antebrazo: Vista frontal.

de la carrilera para poder deslizarse fácilmente al momento de ensamblar o desensamblar. Esta pieza cuenta con nueve agujeros que son utilizados para sostener los motores por medio de tornillos y tuercas. También, cuenta con armellas a lo largo de la pieza para ayudar a los tendones a encaminarse, sin enredarse, hacia su motor respectivo. Por último, debido a que los motores XL-320 pueden ser conectados en **daisy-chain** la estructura cuenta con un



Figura 67: Antebrazo con tapaderas: Vista isométrica.

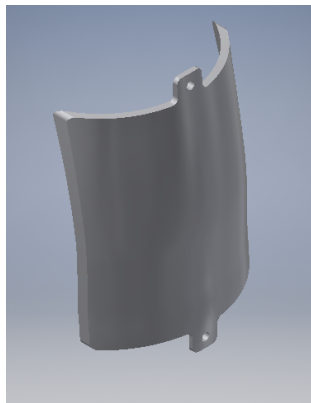


Figura 68: Tapadera para antebrazo: Vista isométrica.

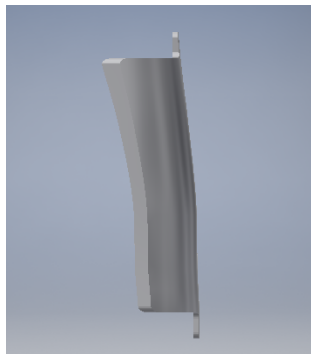


Figura 69: Tapadera para antebrazo: Vista lateral.

espacio para que los motores de un lado del antebrazo puedan ser fácilmente conectados con el resto en caso de querer conectar los actuadores en dicha configuración.

Durante la construcción del prototipo se encontró que era complicado asegurar que los tendones pasaran por sus armellas correspondientes. Por esta razón a la parte superior del antebrazo se agregaron dos agujeros, similares a los utilizados para las tapaderas y en la misma dirección, para poder observar con claridad que el tendón atraviesa su armella y así facilitar la construcción del prototipo [Figura 66].

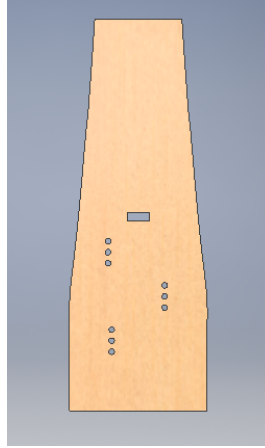


Figura 70: Base para motores.

Por la geometría de la base para motores, y la forma en la que están ordenados los actuadores en ella, esta puede ser removida del antebrazo deslizándola aun con los actuadores acoplados.

Además, como parte del diseño el antebrazo cuenta con dos tapaderas removibles que son fijadas por medio de tornillos. Dichas tapaderas son de utilidad para que, de ser necesario, la persona encargada del mantenimiento del animatrónico tenga libre acceso a los motores para reajustar de forma rápida y directa los tendones responsables del movimiento de los dedos.

9.5. Poleas

Para transmitir el movimiento del eje de los actuadores se diseñó una polea. Esta polea encaja a presión en el actuador, y se asegura por medio de un tornillo.

Tiene un diámetro exterior de 28mm, y un diámetro interior de 22mm. Cuenta con una carrilera que abarca 120°, esta geometría ayuda a que los tendones se mantengan dentro de la polea y evita que estos dejen de enrollarse en ella entorpeciendo el movimiento de los dedos. Tiene un espacio de 3mm para poder atornillarla al motor y que la cabeza del tornillo quede escondida. Por último cuenta con dos agujeros que permiten atornillar los tornillos incluidos en los actuadores AX-12A, estos tornillos son utilizados para enrollar en ellos los tendones así cuando el tornillo este apretado este sujete el tendón correspondiente.

En la Figura 72 se muestra el ensamblaje final para tener una idea clara de como debe verse el prototipo final.

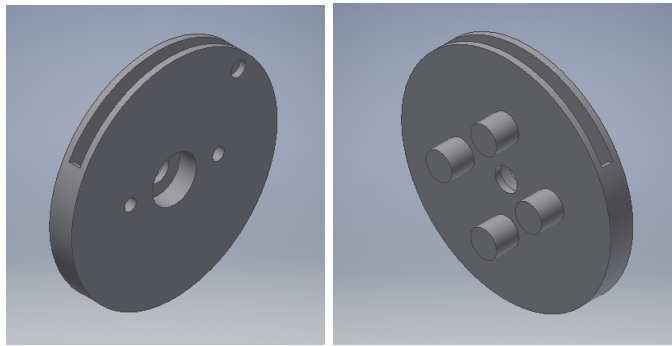


Figura 71: Polea para XL-320.



Figura 72: Ensamble CAD: Vista isométrica.

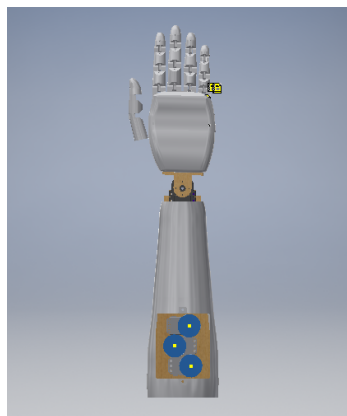


Figura 73: Ensamble CAD: Vista frontal.

Selección de material

Comparando los pesos de los materiales, se encontró que Grilón, Ertalón y Delrin tienen densidades muy parecidas, mientras que el duraluminio es casi dos veces más denso. En cuanto a esfuerzos de compresión y flexión el Delrin presentó mejores características. Sin embargo, el Ertalón predominó en tensión para fluencia.

Gracias a su disponibilidad de material y de precio se escogió utilizar el Delrin como material ideal para el maquinado del producto final.

10.1. Cotización

Se cotizó el precio de maquinado de las piezas en la empresa guatemalteca *Maquinados precisos*. Por la cantidad tan extensa de las estructuras a maquinar en el diseño la empresa optó por solicitar los planos del dedo medio (el más grande) para que la cotización fuera sobre él. De esta forma aunque no se tenga una cotización exacta, el valor de la cotización es el escenario más caro que se podría tener lo cual nos brinda una percepción del valor de maquinado total.

Después de seleccionar el material para mecanizarlo se contactó a *Metales Industriales de Guatemala* para cotizar el Delrin. Después de decidir la presentación de Delrin a utilizar se encontró que el coste en material es de Q1,012.25.

Se encontró que el coste combinado de material y maquinado necesario para obtener la estructura final da un total de Q 5,562.25.

Estructura	Coste de maquinado (Q)
Falange distal	80.00
Falange medial	80.00
Falange proximal	125.00
Palma: Parte frontal	250.00
Palma: Parte dorsal	375.00
Antebrazo	2,500.00
Tapadera antebrazo	200.00

Tabla 22: Cotización de maquinado. [*Maquinados precisos*]

Material	Presentación	Precio por pulgada/pulgada² (Q)
Delrin	Plancha	405.00
	Barra	8.25

Tabla 23: Cotización de presentaciones de Delrin. [*Metales Industriales de Guatemala*]

Estructura	Coste de material (Q)
Dedo medio	107.25
Palma	405.00
Antebrazo	500.00

Tabla 24: Cotización de material. [*Metales Industriales de Guatemala*]

Estructura	Coste de material y maquinado(Q)
Dedos	1,532.25
Palma	1,030.00
Antebrazo	3,000.00

Tabla 25: Cotización total. [*Metales Industriales de Guatemala y Maquinados Precisos*]

11.1. Análisis de esfuerzos

Como se mencionó anteriormente en la sección de requerimientos [Ver sección 8.1] el propósito del animatrónico es una demostración visual de un movimiento fluido similar al de un humano. Sin embargo, se requiere que el animatrónico no sea frágil, y sea capaz de soportar cargas pequeñas. Se consideró que el peso de una manzana, aproximadamente 1 Newton, es una carga que se desea que la mano animatrónica sea capaz de soportar. Por lo que se procedió a realizar un análisis de esfuerzos para determinar si el diseño es capaz de sostenerla.

Se dispuso que se pondría a prueba cada dedo, asumiendo que la mano realizaría un agarre prensil de gancho [Figura 12]. Por esta razón, la carga de 1N se distribuyó en cuatro dedos dando un total de $1/4$ N (0.0255 kg-fuerza).

Por el tipo de agarre, donde la fuerza recae principalmente en las falanges distales, se analizó el dedo como si fuera una viga empotrada.

Se utilizó el programa Autodesk Inventor 2017 para realizar un *Stress Analysis*. Una vez teniendo un assembly completo del dedo, incluyendo las bisagras que los unen y sirven de articulaciones se siguieron los siguientes pasos *Enviroments > Stress Analysis > Create Study*. En la pestaña de *Constraints* se utilizó la función *Fixed* para fijar el falange proximal ya que este será nuestro empotramiento. Con la función *pin* se indicó donde se encuentran los pines de las bisagras [Figura 75]. Por último, en la pestaña *loads* se seleccionó la función de *force* para aplicar una carga puntual en el dedo. La carga se colocó aproximadamente a la mitad del falange distal [Figura 74]. Se simuló y posteriormente se creó un reporte con los resultados.

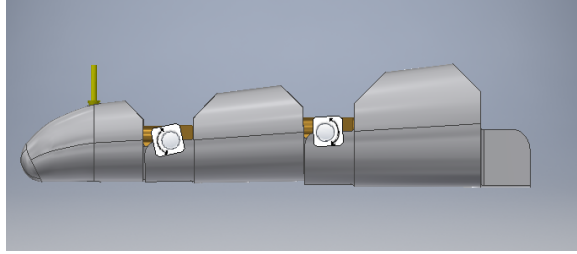


Figura 74: Carga puntual aplicada.

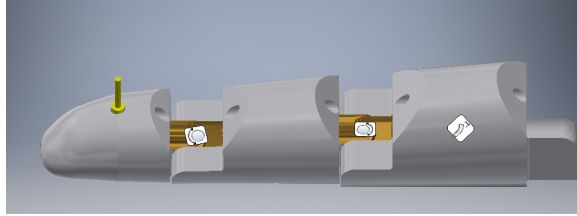


Figura 75: Constraints.

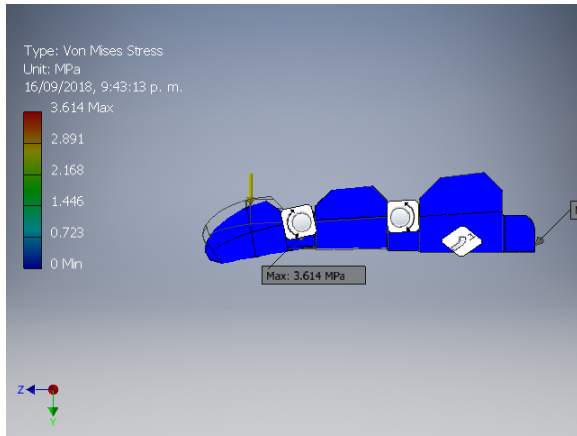


Figura 76: Esfuerzos de Von Mises.

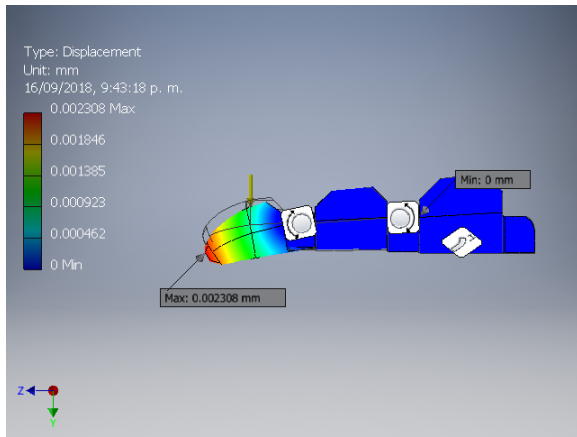


Figura 77: Desplazamiento.

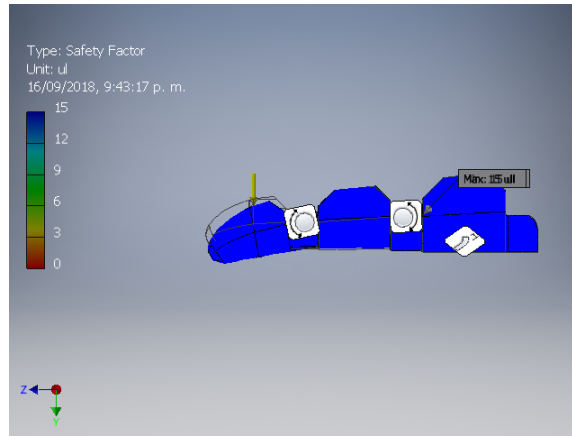


Figura 78: Factor de seguridad.

Se pudo observar que el desplazamiento es mínimo, menor a dos milésimas de milímetro, mientras que el factor de seguridad en las bisagras es 15. Sin embargo, se consideró que el hecho de que fuera capaz de soportar menos de un cuarto de libra no era tan revelador. Por esta razón se decidió probar con una carga de 5 Newtons (1 libra) en cada dedo. Se simuló de nuevo, y se generó el reporte del análisis.

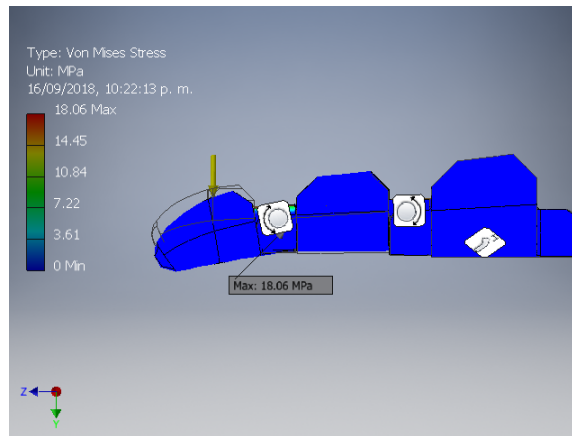


Figura 79: Esfuerzos de Von Mises.

Como se puede observar en las imágenes, se obtuvo un factor de seguridad alto para el diseño, el cual fue de 15. Se obtuvo un valor de desplazamiento de 0.01154mm. Aunque es importante notar que la fuerza con la que se realizaron pruebas no es tan alta.

Se calculó también la fuerza de tensión requerida para soportar la carga determinada. Para ello se realizaron tres análisis para cada dedo, donde la viga en voladizo fue el falange distal, el falange distal y medial, y el dedo completo. Mientras que el empotramiento se realizó siempre en el pin de la bisagra que sostiene a la viga correspondiente. Las fuerzas encontradas se sumaron para encontrar la tensión total necesaria del mecanismo encargado de accionar cada dedo.

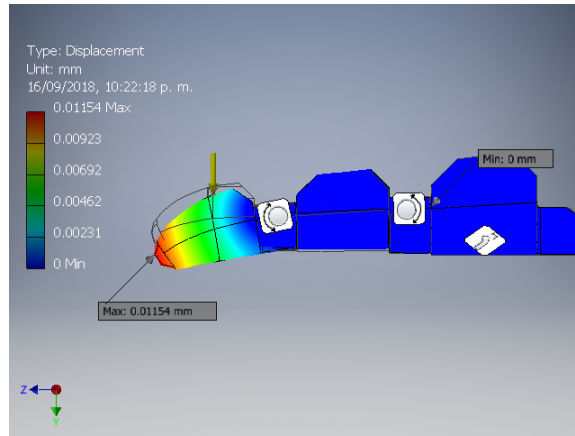


Figura 80: Desplazamiento.

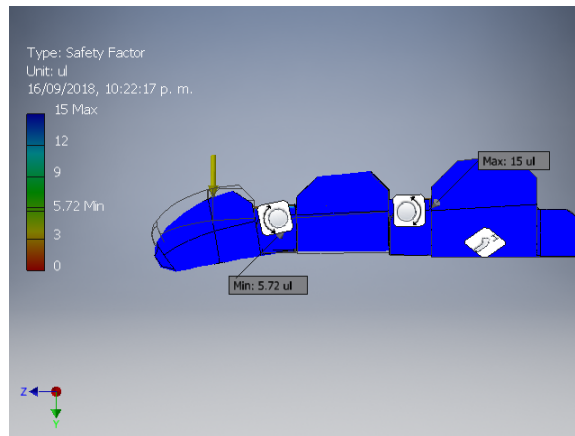


Figura 81: Factor de seguridad.

$$\sum M_A = 0 \tag{2}$$

$$F * (a) = F_t * (b) \tag{3}$$

$$F_t = \frac{F * (a)}{b} \tag{4}$$

donde:

$\sum M_A =$ Sumatoria de momentos alrededor del punto A

A= Pin de la bisagra empotrada que sostiene a la viga en voladizo

a= Distancia desde el punto A hasta el punto de aplicación de F

b= Distancia desde el punto A hasta el punto de aplicación de F_t

F= Carga puntual aplicada

F_t = Fuerza de tensión generada

Los resultados de este análisis se pueden observar en las Tablas 26, 27, 28, y 29. La tensión promedio encontrada se muestra en la Tabla 30

Datos \ Dedos	Índice	Medio	Anular	Meñique
a (mm)	12.36	16.47	14.27	9.50
b (mm)	23.00	27.5	23.57	17.63
F (N)	5	5	5	5
Ft (N)	2.69	2.99	3.03	2.69

Tabla 26: Tensión en falanges distales.

Datos \ Dedos	Índice	Medio	Anular	Meñique
a (mm)	35.48	41.11	38.32	30.30
b (mm)	46.52	52.54	46.22	39.13
F (N)	5	5	5	5
Ft (N)	3.81	3.91	4.15	3.87

Tabla 27: Tensión en falanges mediales.

Datos \ Dedos	Índice	Medio	Anular	Meñique
a (mm)	59.55	68.41	60.00	50.20
b (mm)	71.49	80.44	70.22	59.29
F (N)	5	5	5	5
Ft (N)	4.16	4.25	4.27	4.23

Tabla 28: Tensión en falanges proximales.

Datos \ Dedos	Índice	Medio	Anular	Meñique
$Ft_{distales}(N)$	2.69	2.99	3.03	2.69
$Ft_{mediales}(N)$	3.81	3.91	4.15	3.87
$Ft_{proximales}(N)$	4.16	4.25	4.27	4.23
$Ft_{totales}(N)$	10.66	11.16	11.44	10.80

Tabla 29: Tensión total en dedos.

Dedo	Fuerza de tensión
$Ft_{indice}(N)$	10.66
$Ft_{medio}(N)$	11.16
$Ft_{anular}(N)$	11.44
$Ft_{menique}(N)$	10.80
$Ft_{promedio}(N)$	11.02

Tabla 30: Tensión promedio.

11.2. Pruebas físicas

Se utilizó el software de análisis de video y herramienta de modelado Tracker para analizar un video de el dedo índice realizando un movimiento de flexión-extensión.

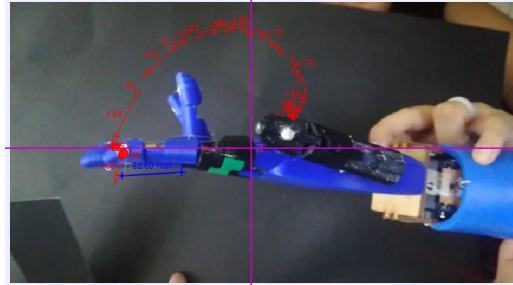


Figura 82: Flexión-extensión en dedo índice del prototipo.

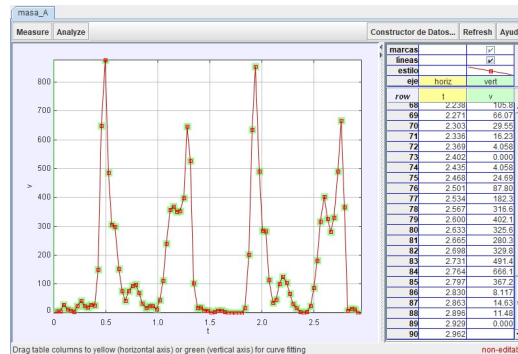


Figura 83: Velocidad(mm/s) vs Tiempo(s).

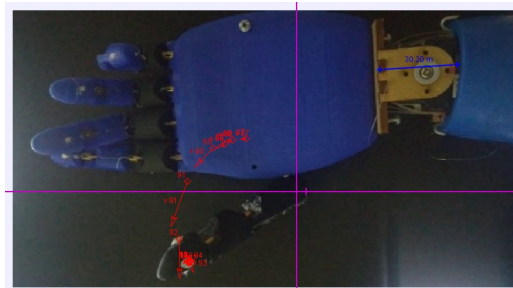


Figura 84: Flexión-extensión en dedo pulgar del prototipo.

Al comparar estos resultados con los establecidos en la sección 8.4 se puede ver a simple vista que la forma de las gráficas son muy parecidas. Además, si comparamos las velocidades máximas podemos observar que estas son similares, en especial la del movimiento abducción-aducción del pulgar.

Se calculó la diferencia de velocidades en cada movimiento y el porcentaje de error de los mismos. Los resultados se muestran en la Tabla 31. Como se puede observar en dicha tabla los porcentajes de error van de 9 a 11 %, sin embargo la diferencia entre las velocidades es

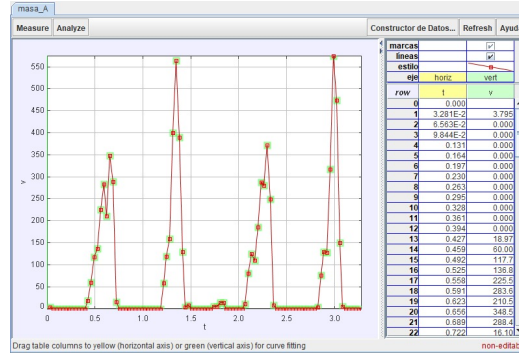


Figura 85: Velocidad(mm/s) vs Tiempo(s).

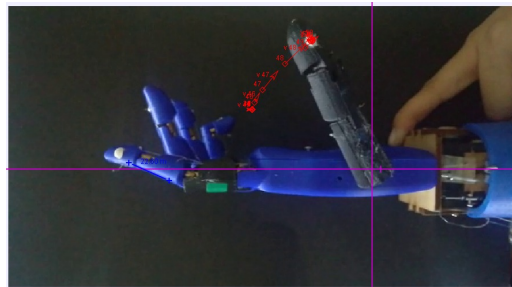


Figura 86: Abducción-aducción en dedo pulgar del prototipo.

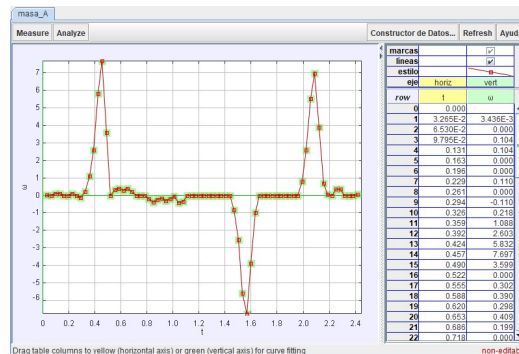


Figura 87: Velocidad angular(rad/s) vs Tiempo(s).

menor a 30 por lo que se cumple la métrica preestablecida. Además, estos porcentajes son considerados pequeños considerando que las diferencias son poco perceptibles.

Por último, si comparamos las trayectorias que siguen los dedos al generar los distintos movimientos podemos ver que existe una similitud en la geometría de las mismas.

Cálculos	Movimiento	Flexión- extensión en dedo índice	Flexión- extensión en dedo pulgar	Abducción- aducción en dedo pulgar
Velocidad referencia		310.177 mm/s	220.811 mm/s	0.672 rad/s
Velocidad animatrónico		281.566 mm/s	195.466 mm/s	0.599 rad/s
Diferencia de velocidades		28.611 mm/s	25.346 mm/s	0.073 rad/s
Porcentaje de error		9.224 %	11.478 %	10.848 %

Tabla 31: Comparación de velocidades.

Para la construcción de los prototipos y el prototipo funcional se hizo uso de las instalaciones de la Universidad del Valle de Guatemala ya que esta cuenta con dos makerspaces.

El makerspace del departamento de Electrónica, Mecatrónica y Biomédica cuenta con una cortadora láser PLS4.75, una ProtoMat s103, e impresoras Prusa i3, y mbaud3D. Por otro lado, el D-Hive, del departamento de Mecánica cuenta con seis impresoras Ultimaker 3, una Object 30 Prime, y dos cortadoras láser: una PLS4.75 y una VLS2.30.

Gracias a la disponibilidad de herramientas que facilitan el prototipado se decidió utilizar las herramientas de impresión 3D y corte láser. Los dedos, manos, antebrazo y poleas se trabajaron con impresión 3D ya que estos cuentan con geometrías complicadas, mientras que para las estructuras de la muñeca y la base de motores se utilizó la cortadora láser ya que sus geometrías no necesitan ser fabricadas directamente en 3D sino pueden ser generadas a partir de estructuras en 2D.

El corte láser tiene como ventaja que el tiempo de manufactura es significativamente menor que el de la impresión 3D. El tiempo que tarda una impresión depende de una lista de parámetros como tamaño y cantidad de piezas, relleno, patrón del relleno, alto de capa, etc.

Para todas las impresiones, con excepción del brazo, se utilizó PLA; para el antebrazo se utilizó ABS. El tiempo de impresión para cada estructura se detalla en la Tabla 32

12.1. Dedos

Los dedos fueron impresos en PLA con un relleno de 10% y alto de capa de 0.15mm, debido a que los dedos no tienen una superficie plana fue necesario utilizar material de

Estructura	Tiempo de impresión
Dedo pulgar	1 h 56 min
Dedo índice	1 h 38 min
Dedo medio	1 h 46 min
Dedo anular	1 h 36 min
Dedo meñique	1 h 16 min
Palma	12 h 56 min
Antebrazo	34 h 41 min
Poleas	1 h 50 min
Total	57 h y 39 min

Tabla 32: Tiempo de impresión invertido en prototipo final.

soporte breakaway.

Se procedió a armar dedo por dedo, colocando la bisagra en su lugar. Esta bisagra entra a presión, por lo que una vez dentro mantiene su lugar. Antes de montar el dedo en la palma se comprobó su movimiento.



Figura 88: Impresión de falanges utilizando breakaway.

12.2. Palma

La palma fue impresa en PLA con 20% de relleno y 0.1mm de alto de capa. El alto de capa se seleccionó así de fino porque se desea que la geometría de la impresión se mantenga fiel al diseño para que esta se destaque. La impresión de la parte dorsal de la palma fue impresa dos veces, ya que la primera se imprimió utilizando el mismo PLA como material

de soporte y en esta impresión los agujeros para las armellas no tenían definición, al igual que los agujeros para los cojinetes. Se intentó definir un agujero utilizando un tornillo, sin embargo se optó por volver a imprimir la estructura.

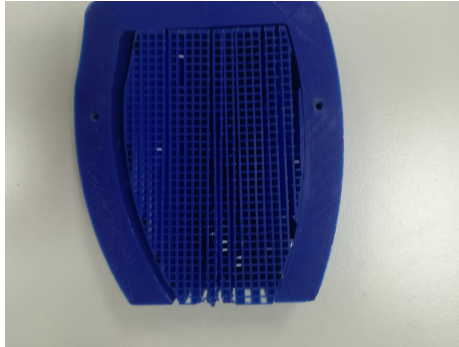


Figura 89: Material de soporte para palma utilizando PLA.



Figura 90: Superficie de palma utilizando PLA.



Figura 91: Material de soporte para palma utilizando breakaway.

Se imprimió nuevamente la estructura utilizando breakaway y la diferencia entre la superficie de ambas impresiones es evidente. La superficie de la impresión utilizando breakaway se puede ver en la Figura 92

Se procedió a montar los cojinetes de los AX-12A que serian empleados como poleas utilizando tornillos de 3mm cortados a la medida para que no atravesaran por completo

la palma. Se atornillaron las armellas, intentando no atravesar la palma. Por último, se montaron los dedos en la palma utilizando las bisagras, y el eje en el caso del pulgar.



Figura 92: Cojinetes y tendones montados en la palma.

En este prototipo se utilizó hilo de pescar pretensado como tendón. Se asignó la posición de un motor en la base de motores para cada dedo, y se midió la distancia de tendón necesaria para alcanzar desde la punta del dedo extendido hasta el motor. Se realizó un nudo en la punta del tendón para que este se mantuviera en su lugar y no atravesara los trayectos del tendón al ser tensado.

Para cada dedo se utilizó porcelana fría para rellenar los agujeros de los trayectos de las falanges distales. Esto sirvió no solo para asegurar más el tendón, sino para producir una superficie uniforme en el falange.

Para el dedo índice, medio, anular y meñique se colocaron los tendones flexores y extensores, cuidando que se respetaran los trayectos previamente establecidos hasta pasar por la muñeca. A cada uno de estos dedos se le agregó un segundo tendón flexor para mejorar la trayectoria del movimiento [Ver sección 9.1.3].



Figura 93: Relleno de porcelana en las falanges distales.

Para unir el dedo pulgar con la palma se utilizó un eje, y al igual que los otros dedos se utilizó hilo de pescar pretensado como tendón. Se colocaron los tendones flexor, extensor,

abductor y aductor y cada par de tendones encargados de un movimiento se paso por su polea correspondiente 92

12.3. Muñeca

Como se mencionó anteriormente, este acople fue manufacturado en en makerspace utilizando la cortadora láser. Para poder hacerlo se cambio el diseño del acople para que este estuviera conformado por tres piezas, en lugar de ser una pieza solida.

Después de ensamblar las tres piezas se procedió a montar el acople en el actuador AX-12A. Para ello se posicionó el actuador en 150° para que la mitad del rango de movimiento estuviera alineado con el eje Z, de esta forma es más fácil manejar el rango de movimiento con respecto a la vertical.

Se alineó la cara frontal del AX-12A con su acople, y se colocó por la parte trasera el cojinete incluido con el actuador. Se atornilló el acople al actuador utilizando los tornillos incluidos con el actuador. Las estructuras de los costados entran a presión.

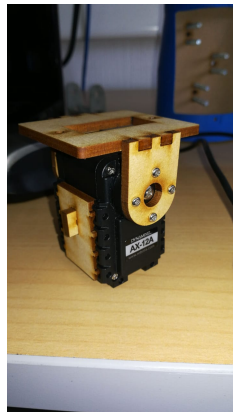


Figura 94: Ensamble acople muñeca y sobre AX-12A.

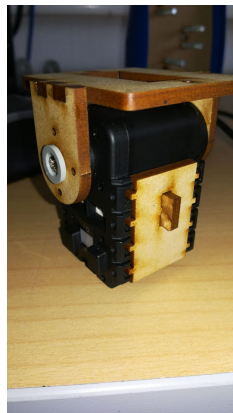


Figura 95: Ensamble acople muñeca y sobre AX-12A.

12.4. Antebrazo

Para la manufactura del antebrazo el diseño se dividió en dos partes ya que el alto total superaba el volumen máximo de impresión de una Ultimaker 3 (215x215x200mm).

Se optó por imprimirlo en ABS, ya que se necesitaba que esta estructura fuera más robusta y resistente. Por la misma razón se utilizó un relleno de 60% y un alto de capa de 0.15mm. Se utilizó ABS como material de soporte para ángulos en voladizo mayores a 45°.

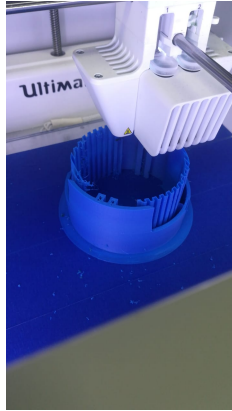


Figura 96: Proceso de impresión del antebrazo.

En el diseño el ancho de la carrilera es de 3.2mm para que una plancha de MDF cupiera en ella, sin embargo por tolerancias de impresión esta ranura quedó más pequeña.

Se notó que la impresión tenía unas ranuras por lo que se diluyó ABS en acetona puro para crear una pasta y poder rellenarlas.

Se comprobó que el acople de la muñeca encajara en la carrilera [Figura 97].



Figura 97: Ensamble muñeca y antebrazo.

12.4.1. Tapaderas

Las tapaderas también fueron impresas en ABS utilizando un alto de capa de 0.15mm, relleno de 20 %, y ABS como material de soporte. Después de ser impresas se comprobó el ajuste con el antebrazo. Sin embargo, un inconveniente con la impresión en ABS es que cuando la pieza se enfría tiende a encogerse o deformarse. Por esta razón el acoplamiento de las tapaderas con el antebrazo no es perfecto, sin embargo si puede ser utilizado y mantenido en su lugar como se muestra en la Figura 100



Figura 98: Tapadera: Vista frontal.



Figura 99: Tapadera: Vista posterior.

12.4.2. Base para motores

Esta base fue cortada en láser, se tuvo que lijar los costados para que esta cupiera en la carrilera del antebrazo. Para sujetar los motores en su lugar se alinearon los tres agujeros de cada motor en los agujeros correspondientes de la base, se utilizaron tornillos de 4mm de ancho y 63mm de alto para sostener los motores. Este largo se aprovechó para que un solo tornillo sostuviera a dos motores, uno por el frente y uno por detrás, sosteniéndose en su



Figura 100: Ensamble antebrazo con tapadera.

lugar por medio de una tuerca. Mientras se fueron colocando los actuadores en posición, se conectaron sus cables para que estos quedaran fijos en el ensamble final.

Según la trayectoria que debe seguir cada tendón se atornillaron las armellas correspondientes. Una vez con los actuadores y las armellas en posición se deslizó la base de motores por la carrilera interior de ambas partes del antebrazo para comprobar que esta cupiera.

12.5. Poleas

Para la impresión de las poleas originalmente se intentó utilizar material de soporte soluble PVA, sin embargo el material de soporte en la ranura no se disolvió por completo por lo que obstruía el paso de los tendones. Se procedió a imprimir las poleas utilizando material de soporte breakaway pero se encontró que en este caso era imposible remover el material dentro de la ranura.

Se decidió imprimir las poleas sin ningún material de soporte, se encontró que debido al pequeño voladizo algunos *hilos* de PLA quedaron atrapados dentro de la polea pero estos podían ser removidos fácilmente mejorando la superficie de las poleas. Fueron impresas en PLA utilizando 5% de relleno y 0.15mm de alto de capa.

Se asignó un ID y un baudrate de 9600 a cada motor a utilizar. Se montó una polea a cada actuador XL-230 y se aseguró con los tornillos de centro que traen incluidos los motores.

Por último los tendones que habían llegado hasta la muñeca en el ensamble de la mano se atravesaron por el antebrazo y sus armellas correspondientes con la base del antebrazo fuera del antebrazo. Se realizó de esta forma para asegurar y facilitar el paso de tendones ordenados por las armellas de la base de actuadores. Una vez con los tendones atravesando sus armellas se amarraron a sus poleas correspondientes solo para no perder su posición. Se deslizó la base de motores por la carrilera interior del antebrazo y se comprobó que la tapadera pudiera cerrar con los actuadores y sus respectivas poleas y tendones montadas

sobre la base para actuadores.

Por medio de código se colocaron los XL-320 a 100° , para estandarizar la posición de ajuste de los tendones. Manualmente se posicionó cada dedo completamente extendido y cada par de tendones se enrolló en direcciones opuestas en su polea. Se aseguró que los tendones atravesaran la ranura de la polea y que después pasaran por medio del agujero de 2 mm que permite el paso hacia los tornillos de ajuste. Ya en posición, se tensó lo más posible los tendones y se sujetaron a sus respectivos tornillos.

Se comprobó que los actuadores fueran capaces de mover su dedo a lo largo de todo su rango de movimiento.



Figura 101: Ensamble completo de mano y antebrazo.

Cuando se realizó el cambio para utilizar el segundo prototipo del antebrazo se optó por imprimir de nuevo algunos falanges para que todo el prototipo fuera del mismo color y de esta forma mejorar la estética del mismo.



Figura 102: Ensamble de prototipo funcional de mano y antebrazo.

1. Como mecanismo de transmisión para el movimiento flexión-extensión de los dedos se optó por utilizar accionamiento por medio de tendones, ya que este ofrece ventajas como disminución de peso en los dedos y la mano, y flexibilidad para encaminar los tendones a lo largo de geometrías complicadas.
2. Se determinó que para el movimiento realista del pulgar era necesario incorporar más que solo el movimiento flexión-extensión por lo que se incorporó el movimiento abducción-aducción.
3. Para generar el movimiento rotacional de la muñeca se utilizó el movimiento del actuador transmitido por medio de un acople.
4. La velocidad promedio en el movimiento de flexión-extensión en el dedo índice de la mano utilizada como referencia para este diseño es de 310.177 mm/s.
5. La velocidad promedio en el movimiento de flexión-extensión en el dedo pulgar de la mano utilizada como referencia para este diseño es de 220.811 mm/s.
6. La velocidad promedio en el movimiento de abducción-aducción en el dedo pulgar de la mano referencia es de 0.67 rad/s.
7. Para el movimiento de flexión-extensión en el dedo animatrónico se logró una velocidad promedio de 281.566 mm/s y un rango de movimiento interfalángico de 45°.
8. Para el movimiento de flexión-extensión en el dedo pulgar del animatrónico se logró una velocidad promedio de 195.466 mm/s y un rango de movimiento interfalángico de 45°.
9. Para el movimiento de abducción-aducción en el dedo pulgar del animatrónico se logró una velocidad promedio de 0.599 rad/s y un rango de movimiento de 65°.
10. La velocidad promedio de los dedos animatrónicos cumplen con la métrica establecida.

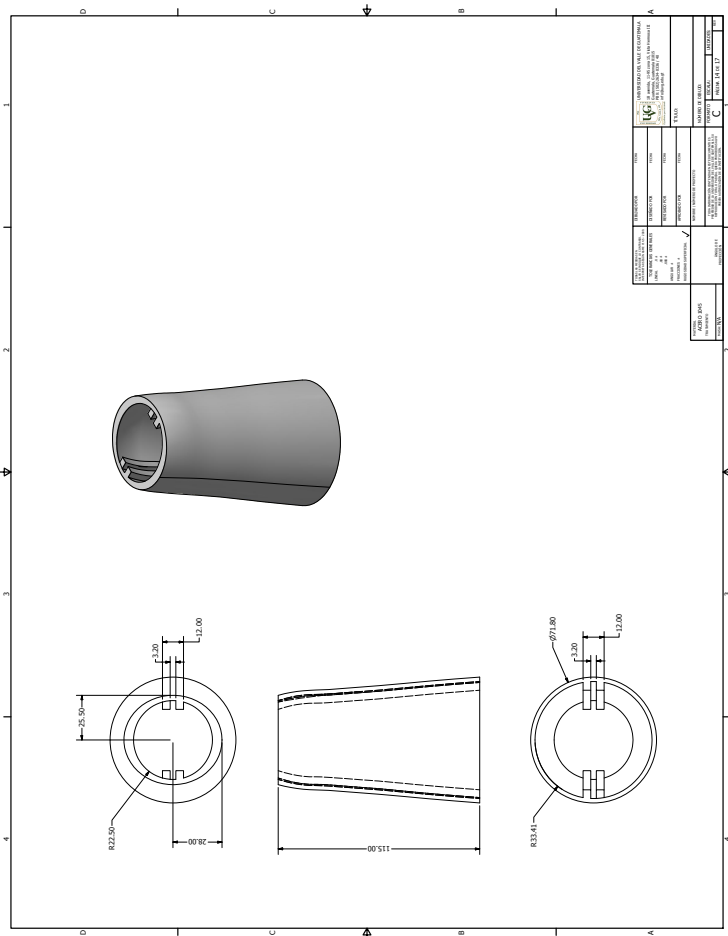
11. Los rangos de movimiento de los dedos se encuentran dentro del rango de amplitud de las articulaciones interfalángicas, por lo que se considera que su movimiento es acertado.
12. En el análisis de esfuerzos del diseño CAD se encontró un factor de seguridad de 15 al colocar una carga puntual de 5 Newtons en la punta del dedo.
13. La fuerza de tensión promedio necesaria para accionar el mecanismo de tendones de un dedo cuando se tiene una carga puntual de 5 Newtons en la punta del mismo es de 11.04 Newtons.
14. Para el movimiento de los dedos se seleccionó el servo Dynamixel XL-320 ya que este ofrece hasta 114 RPM cuando no tiene carga.
15. Para el movimiento de la muñeca se seleccionó el servo Dynamixel AX-12A ya que el torque que este ofrece es de 1.5 N m y para mover la mano es necesario un torque de 0.096 N m.
16. Se seleccionó como material para la mano y antebrazo animatrónico el Delrin, una resina acetilica, ya que este presentó las mejores resistencias a compresión y flexión y disponibilidad de material y precio.

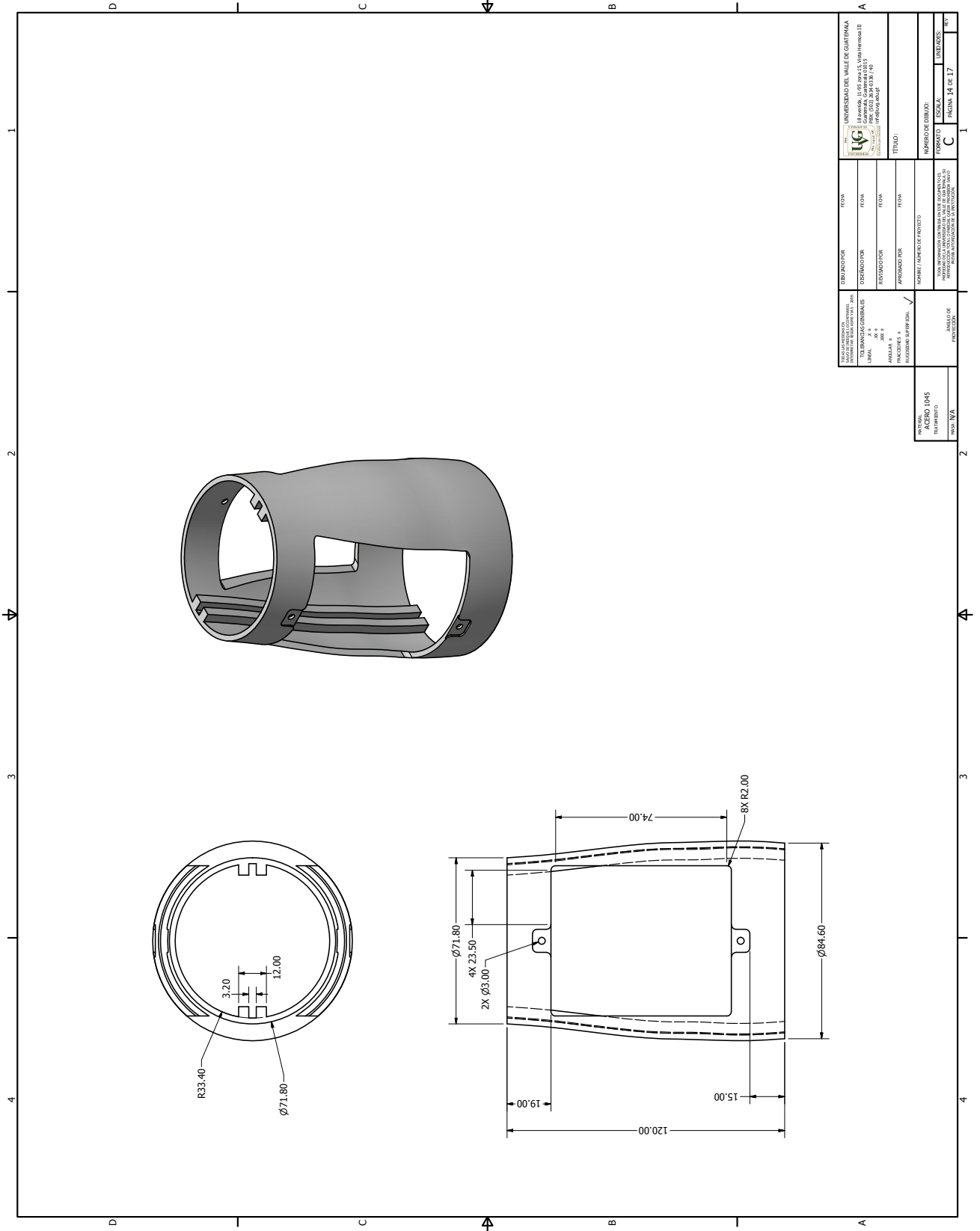
1. Analizar la posibilidad de utilizar un recubrimiento estético del diseño para aumentar la similitud a la figura humana.
2. Modificar las poleas y la configuración de los tendones para aproximar aún más la trayectoria de los dedos.
3. Si se desea perfeccionar la velocidad necesaria para cada movimiento para que este sea lo más real posible se recomienda realizar un estudio estandarizado para medir las velocidades alcanzadas por los sujetos de prueba.
4. Debido a que esta mano y antebrazo fueron diseñados basados en la mano y antebrazo izquierdos de una mujer de 21 años, si se desea aplicar este diseño para un animatrónico masculino de otra edad se recomienda acoplar las dimensiones y geometrías del diseño para que este sea lo más apegado a la realidad posible.
5. Analizar la posibilidad de aplicarle un sistema de control para mantener una fuerza interna deseada, en el caso de que se quisiera ampliar la aplicación de la mano para que esta pueda sostener objetos; o un sistema de control que permita rastrear la trayectoria de un objeto.

-
- [1] R. M. Murray, *A mathematical introduction to robotic manipulation*. CRC press, 2017.
 - [2] P. Mazariegos, *Diseño e implementación de un nuevo modelo de la mano de la Prótesis Biónica Transhumeral*. Universidad del Valle de Guatemala, 2012.
 - [3] R. Cailliet, *Anatomía funcional, biomecánica*. Marbán, 2006.
 - [4] D. M. Andrade y D. A. Zúñiga, *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MANO ROBÓTICA PARA LA ENSEÑANZA DEL ALFABETO DACTILOLÓGICO UNIVERSAL PARA PERSONAS SORDOMUDAS*. Universidad Politécnica salesiana sede cuenca, 2012.
 - [5] R. A. Arredondo y J. D. Camacho, *DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE UNA PRÓTESIS ROBOTICA DE MANO ADAPTADA A VARIOS AGARRES UTILIZANDO UNA INTERFAZ CEREBRO-COMPUTADORA (BCI)*. Valledupar, 2016.
 - [6] R. López, “Arcos y ángulos de movimiento”, *línea*, 2009. dirección: <https://www.slideshare.net/pedroespinoso106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>.
 - [7] G. FILTROS, *BARRAS DE GRILON, POLIPROPILENO Y APM*. dirección: <http://www.gomafiltros.com/productos/grilon/>.
 - [8] I. JQ, *Tabla de propiedades Poliamida 6*. dirección: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>.
 - [9] QUADRANT, *Ertalon® 6 PLA*. dirección: <https://www.quadrantplastics.com/es/productos/plasticos-mecanizables/ingenieria-80-160-c/productos-ertalon-R-y-nylatron-R/ertalon-R-6-pla.html>.
 - [10] Bronymec, *Tabla de propiedades Ertalon*. dirección: <http://bronymec.com/descargas/ertalon-6-pla.pdf>.
 - [11] S. Plasticbages Industrial, *Fabricación y comercialización de plásticos técnicos*. dirección: <http://www.plasticbages.com/elacetal.html>.
 - [12] PRODUFLON, *Tabla de propiedades térmicas de Acetal*. dirección: <http://www.plasticbages.com/caracteristicasacetal.html>.

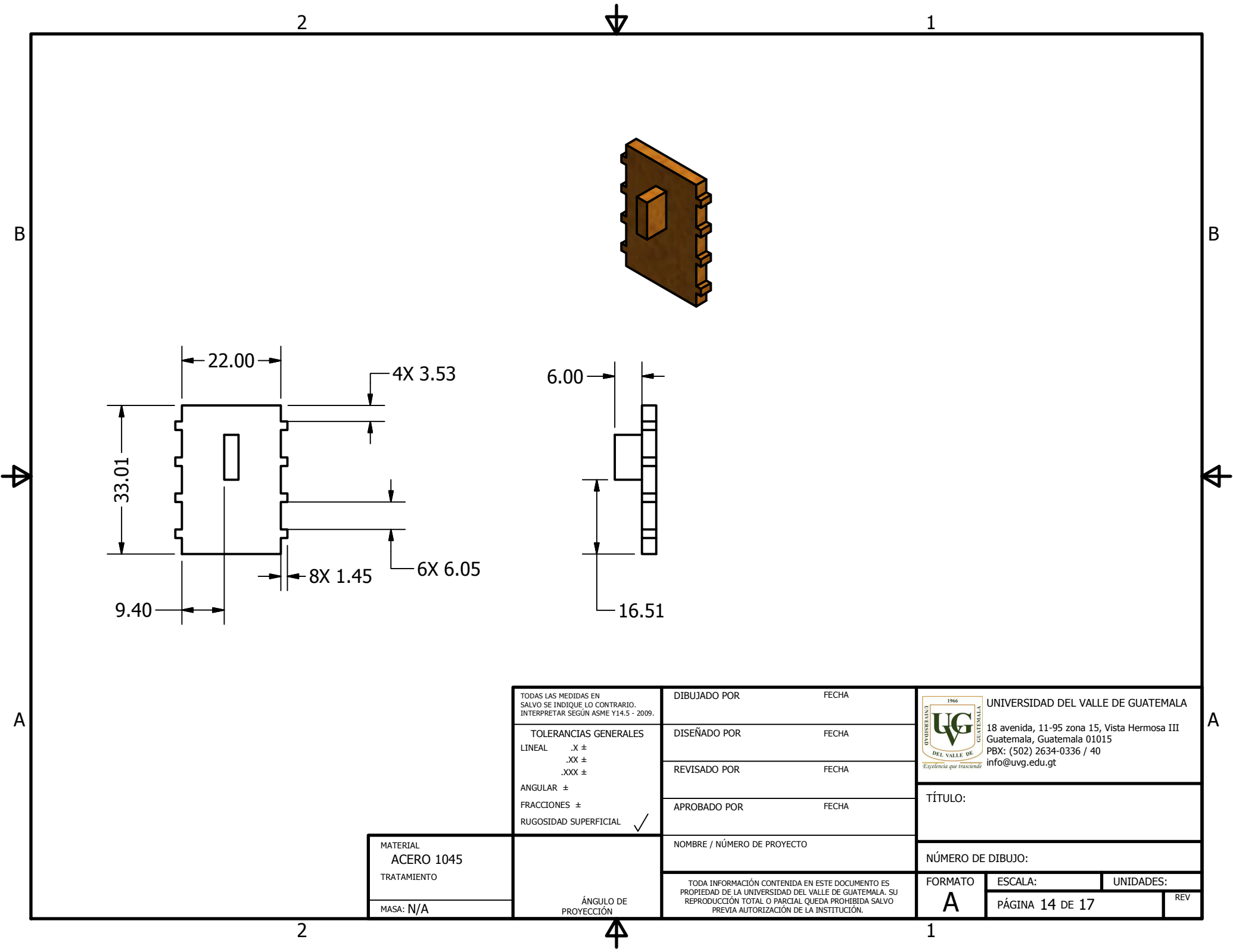
- [13] —, *Tabla de propiedades mecánicas Acetal*. dirección: http://www.produflon.com.ar/pdf/resina_acetal.pdf.
- [14] I. JQ, *Generalidades del DELRIN*. dirección: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Delrin/DelrinP/general.htm>.
- [15] S. Metales y perfiles, *Duraluminio*. dirección: <http://www.metalesyperfiles.com/wp-content/tablas/aluminio/aduraluminio.pdf>.
- [16] ULTIMAKER, *Ultimaker PLA*. dirección: <https://ultimaker.com/en/products/materials/pla>.
- [17] —, *Ficha de datos técnicos PLA*. dirección: <https://ultimaker.com/download/67583/TDS%5C%20PLA%5C%20v3.011-spa-ES.pdf>.
- [18] —, *Ultimaker ABS*. dirección: <https://ultimaker.com/en/products/materials/abs>.
- [19] —, *Ficha de datos técnicos ABS*. dirección: <https://ultimaker.com/download/67619/TDS%5C%20ABS%5C%20v3.011-spa-ES.pdf>.
- [20] —, *Ultimaker Breakaway*. dirección: <https://ultimaker.com/en/products/materials/breakaway>.
- [21] —, *Ultimaker PVA*. dirección: <https://ultimaker.com/en/products/materials/pva>.
- [22] O. F. AVILES, P. L. SIMANCA y G. CALLE, “DEDOS PARA “GRIPPERS” ROBÓTICOS”, *Scientia et technica*, vol. 1, n.º 27, 2005.
- [23] ROBOTIS, *Dynamixel*. dirección: <http://www.robotis.us/dynamixel/>.
- [24] D. Martínez, *Control de servomotores mediante un microcontrolador ARM*. Lleida, 2016.
- [25] ROBOTIS, *XL-320 Control Table Description*. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/x/xl320/>.
- [26] Uxcell, *Gate Hinges*. dirección: https://www.amazon.com/gp/product/B01MSLGK3Y/ref=oh_aui_detailpage_o03_s00?ie=UTF8&psc=1.
- [27] InMoov, *Finger starter*. dirección: <https://inmoov.fr/finger-starter/>.
- [28] D. R. Europe, *ERGASTER ES-B1 DYNAMIXEL AX BUSHING HUB SET*. dirección: <http://www.eu.diigiit.com/ergaster-es-b1-dynamixel-ax-bushing-hub-set>.
- [29] ROBOTIS, *AX-12A e-manual*. dirección: <http://emanual.robotis.com/docs/en/dxl/ax/ax-12a/#control-table-of-eprom-area>.

16.1. Planos de construcción





UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 Zona 15, Villa Hermosa II C.A. 01015, Guatemala T: (502) 23391313 F: (502) 23391314 E: info@uv.edu.gt		TITULO: NOMBRE / APELLIDOS DEL PROYECTO:	
DISEÑADOR POR: FECHA: REVISOR POR: FECHA: APROBADO POR: FECHA: INGENIERO DE PROYECTO:	DISEÑADOR POR: FECHA: REVISOR POR: FECHA: APROBADO POR: FECHA: INGENIERO DE PROYECTO:	NOMBRE / APELLIDOS DEL PROYECTO:	NOMBRE / APELLIDOS DEL PROYECTO:
INSTITUCIÓN: ACERO 1045 TRATAMIENTO: PASA / NA		NÚMERO DE DISEÑO: C	
ESCALA: 1		UNIDADES: INT	
PÁGINA: 14 DE 17		FECHA:	



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

MATERIAL	ACERO 1045
TRATAMIENTO	
MASA:	N/A

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
--------------	-------


DISEÑADO POR	FECHA
--------------	-------

REVISADO POR	FECHA
--------------	-------

APROBADO POR	FECHA
--------------	-------

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

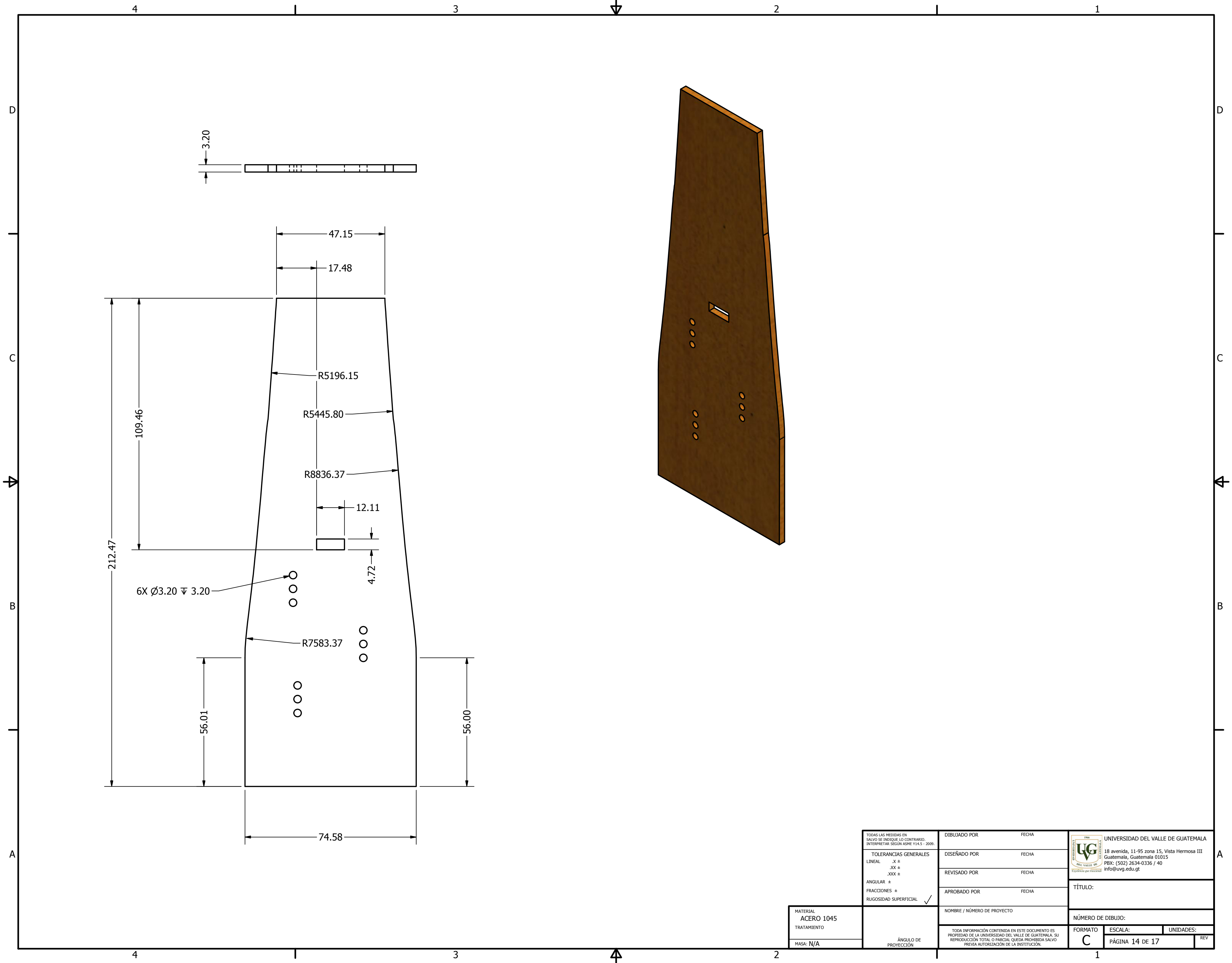



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

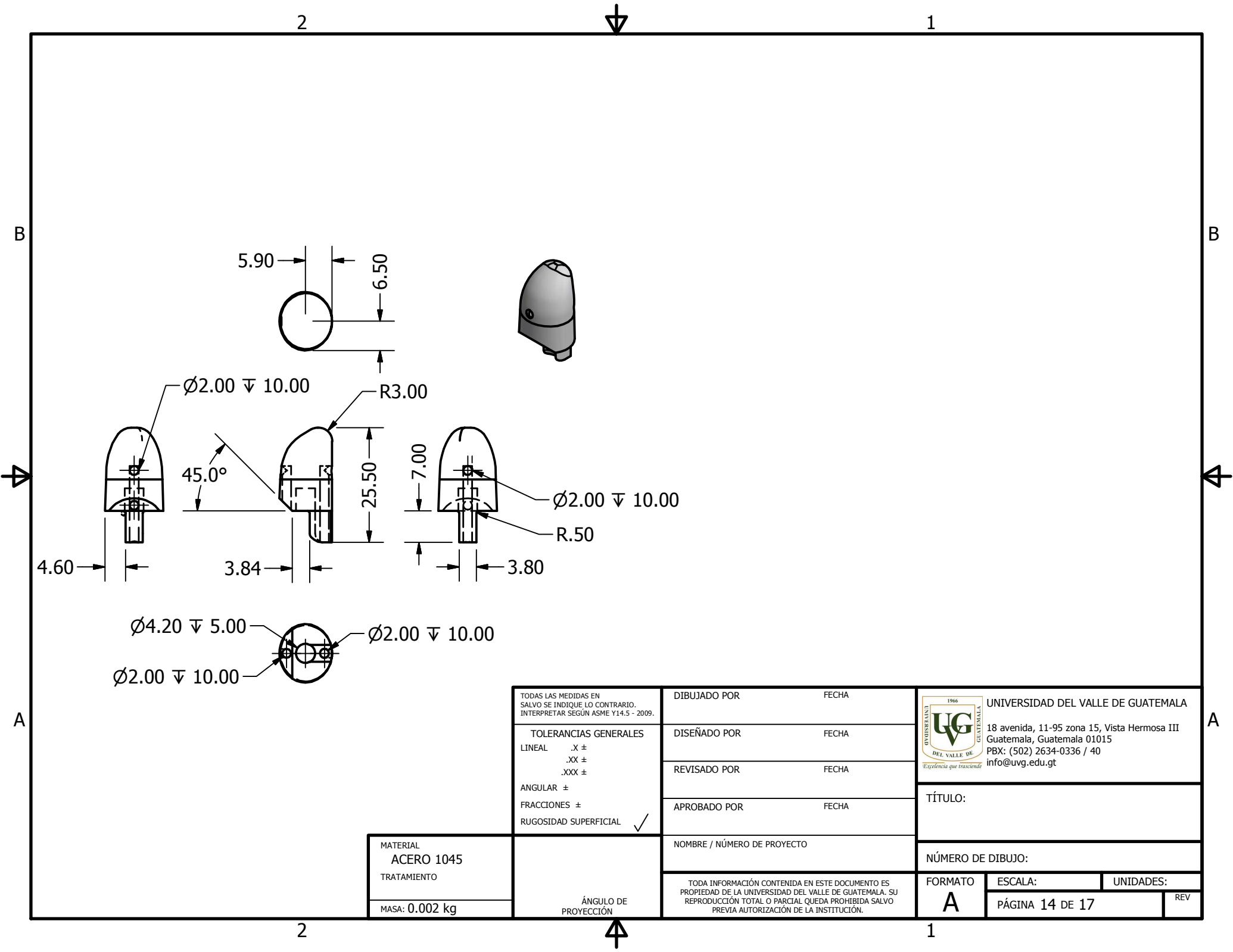
TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓	DIBUJADO POR	FECHA	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvvg.edu.gt
	DISEÑADO POR	FECHA	
	REVISADO POR	FECHA	
	APROBADO POR	FECHA	
MATERIAL ACERO 1045 TRATAMIENTO	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO		TÍTULO:
MASA: N/A	ÁNGULO DE PROYECCIÓN		NÚMERO DE DIBUJO:
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.		FORMATO C	ESCALA: PÁGINA 14 DE 17
		UNIDADES: REV	




TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

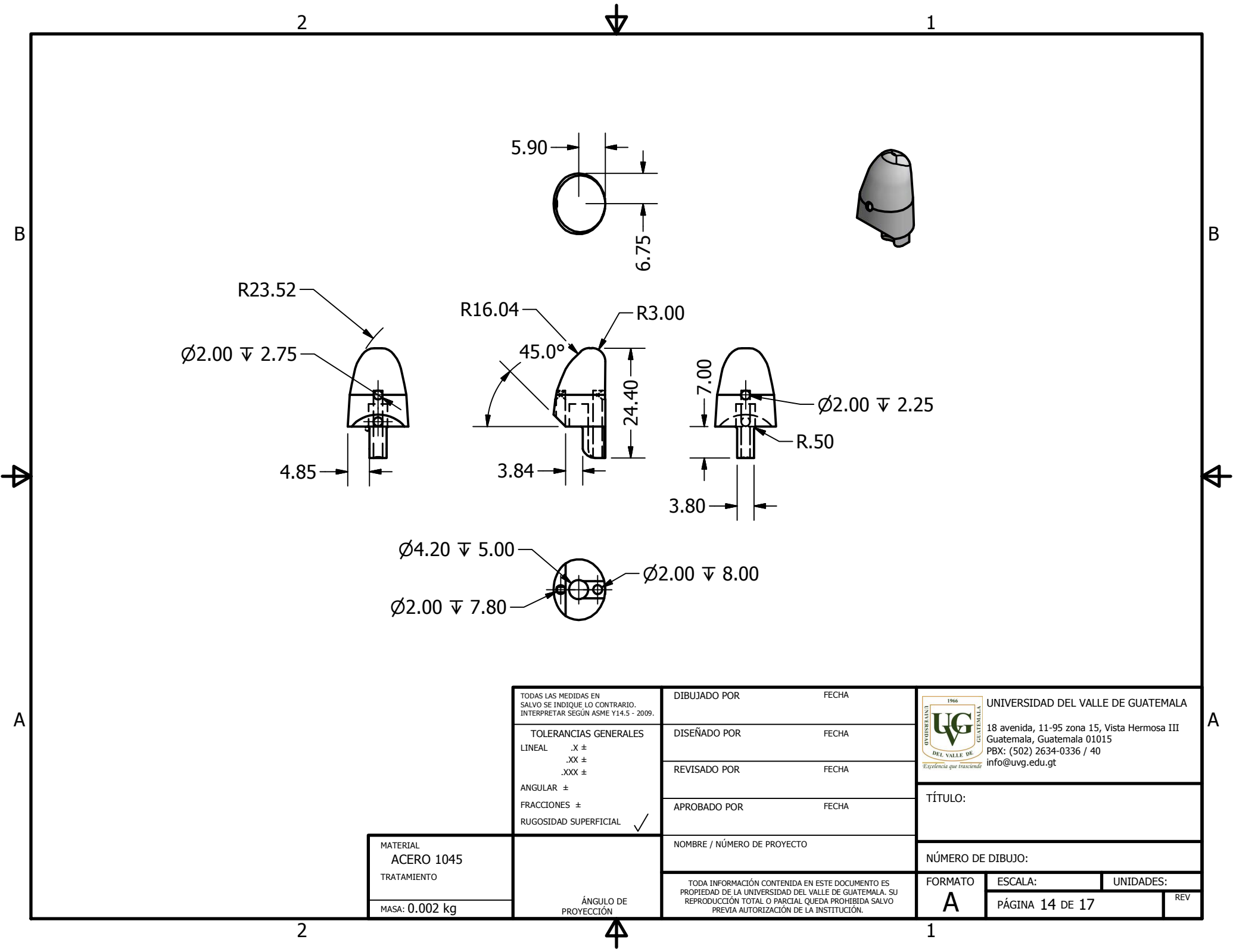
TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

MATERIAL	ACERO 1045
TRATAMIENTO	
MASA:	0.002 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.	

	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
	18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt	
TÍTULO:		
NÚMERO DE DIBUJO:		
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.


TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

MATERIAL	ACERO 1045
TRATAMIENTO	
MASA:	0.002 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

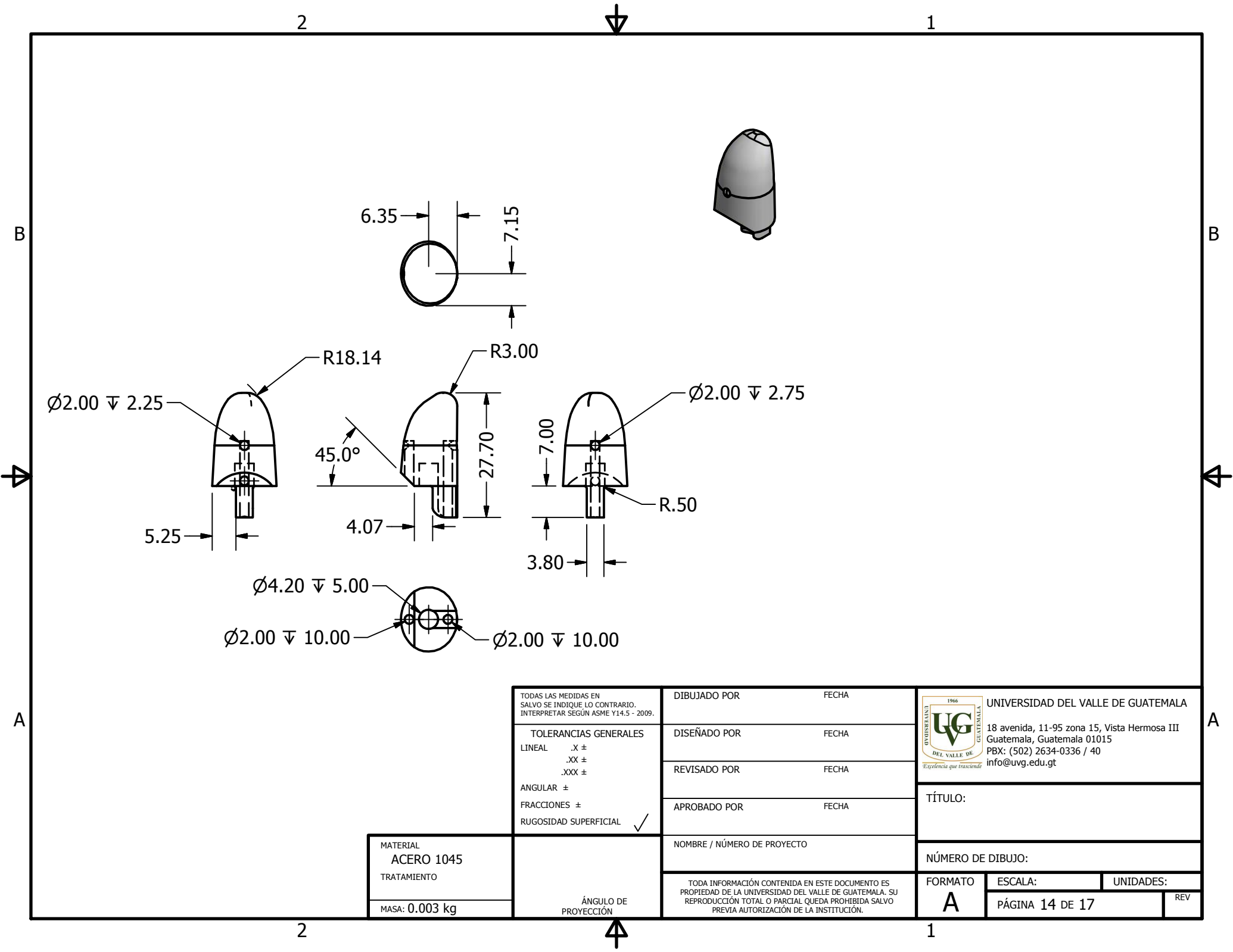


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±
.XX ±
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

MATERIAL
ACERO 1045

TRATAMIENTO

MASA: 0.003 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

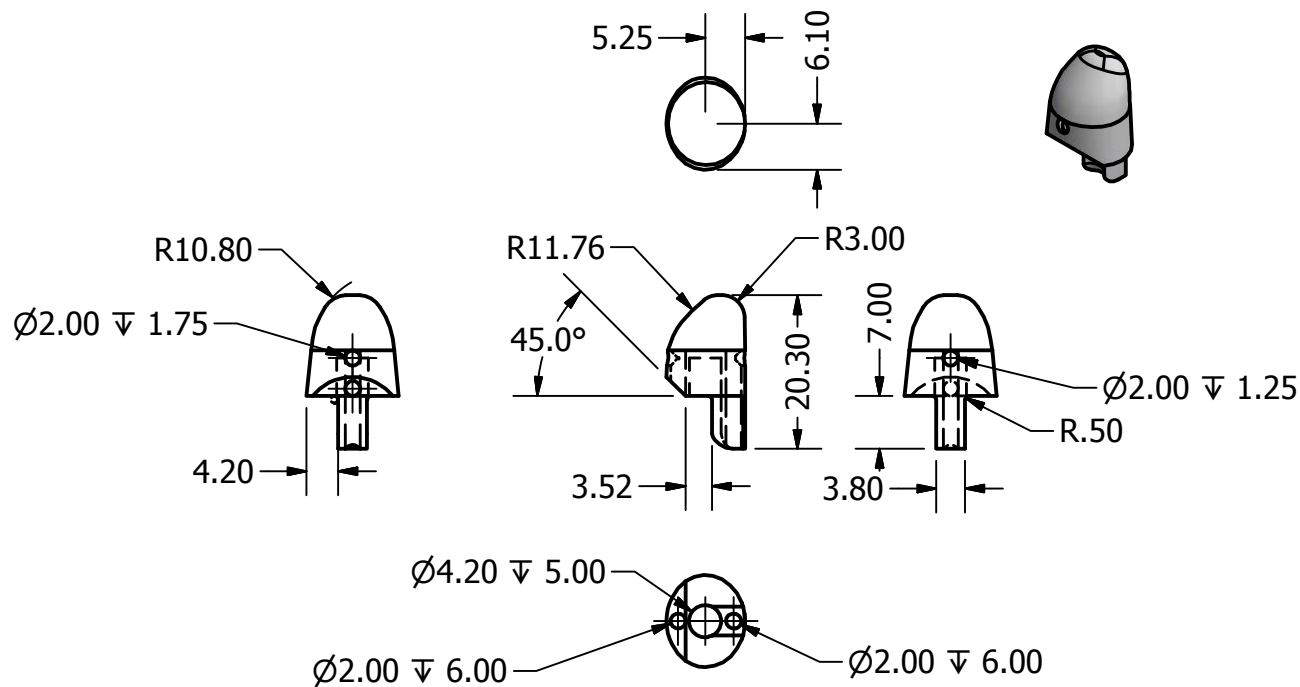
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
Guatemala, Guatemala 01015
PBX: (502) 2634-0336 / 40
info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



MATERIAL
ACERO 1045
TRATAMIENTO
MASA: 0.001 kg

TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±
.XX ±
.XXX ±


ANGULAR ±

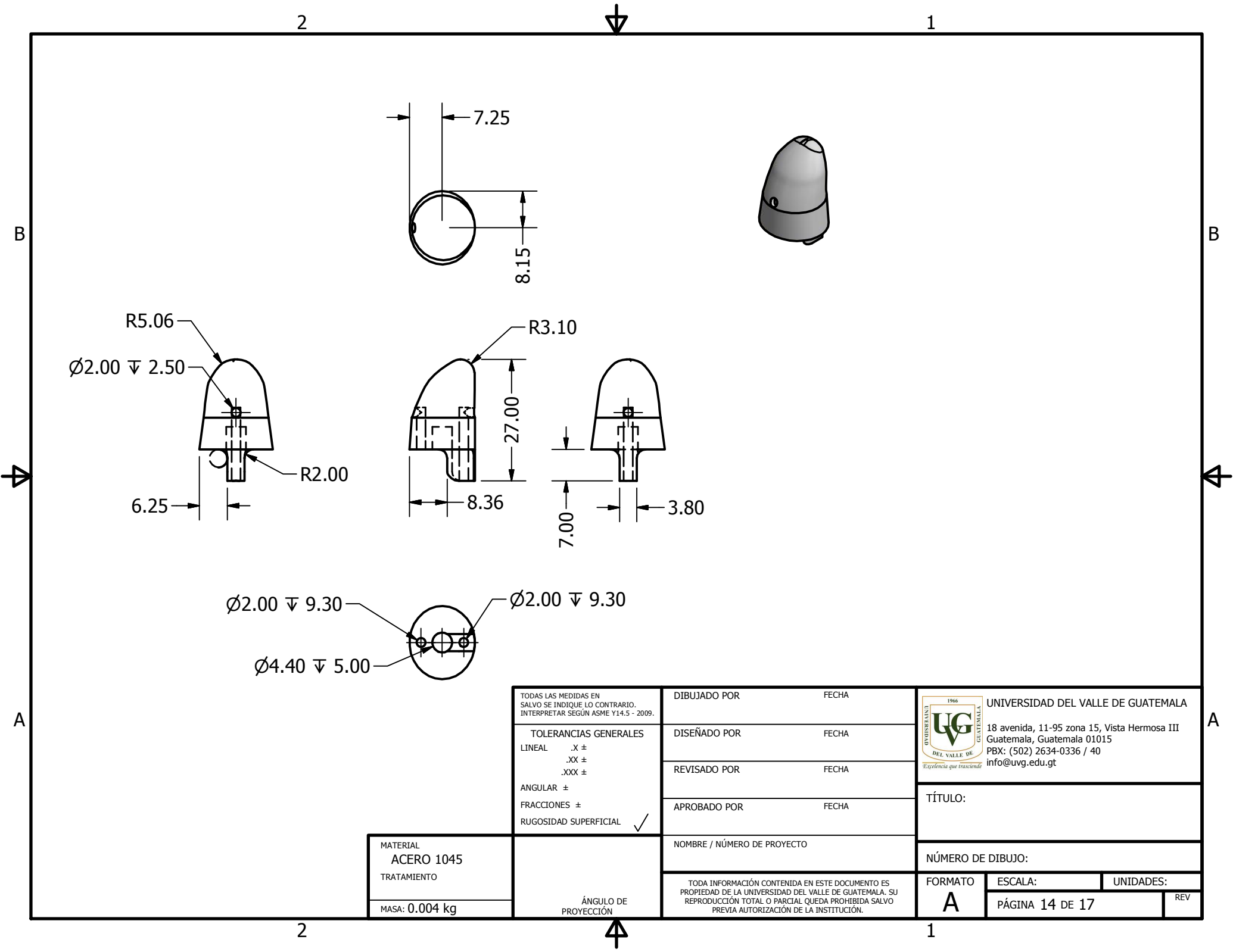
FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.	

	UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA	
	18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt	
TÍTULO:		
NÚMERO DE DIBUJO:		
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±
.XX ±
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓


MATERIAL
ACERO 1045

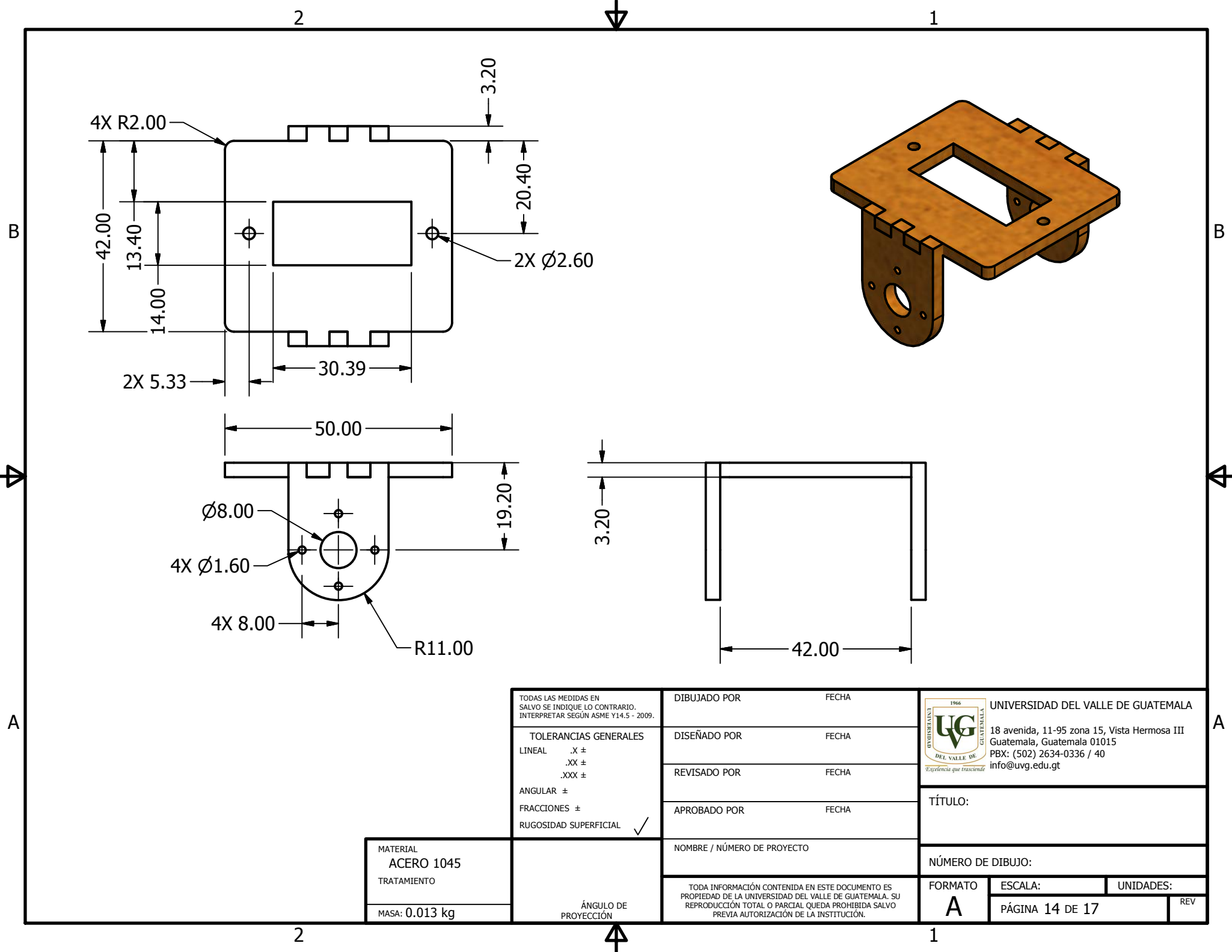
TRATAMIENTO

MASA: 0.004 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.	

 <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015</p> <p>PBX: (502) 2634-0336 / 40</p> <p>info@uvg.edu.gt</p>	TÍTULO:	
	NÚMERO DE DIBUJO:	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.


TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

MATERIAL	ACERO 1045
TRATAMIENTO	
MASA:	0.013 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

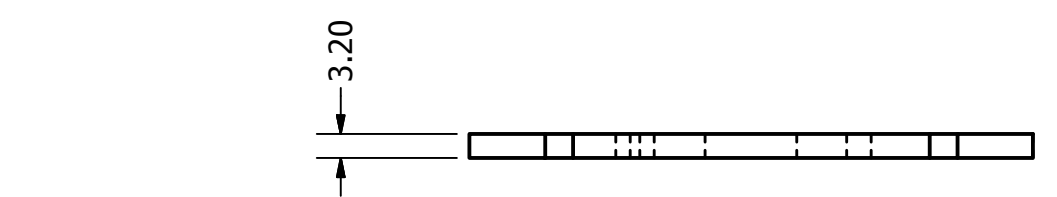
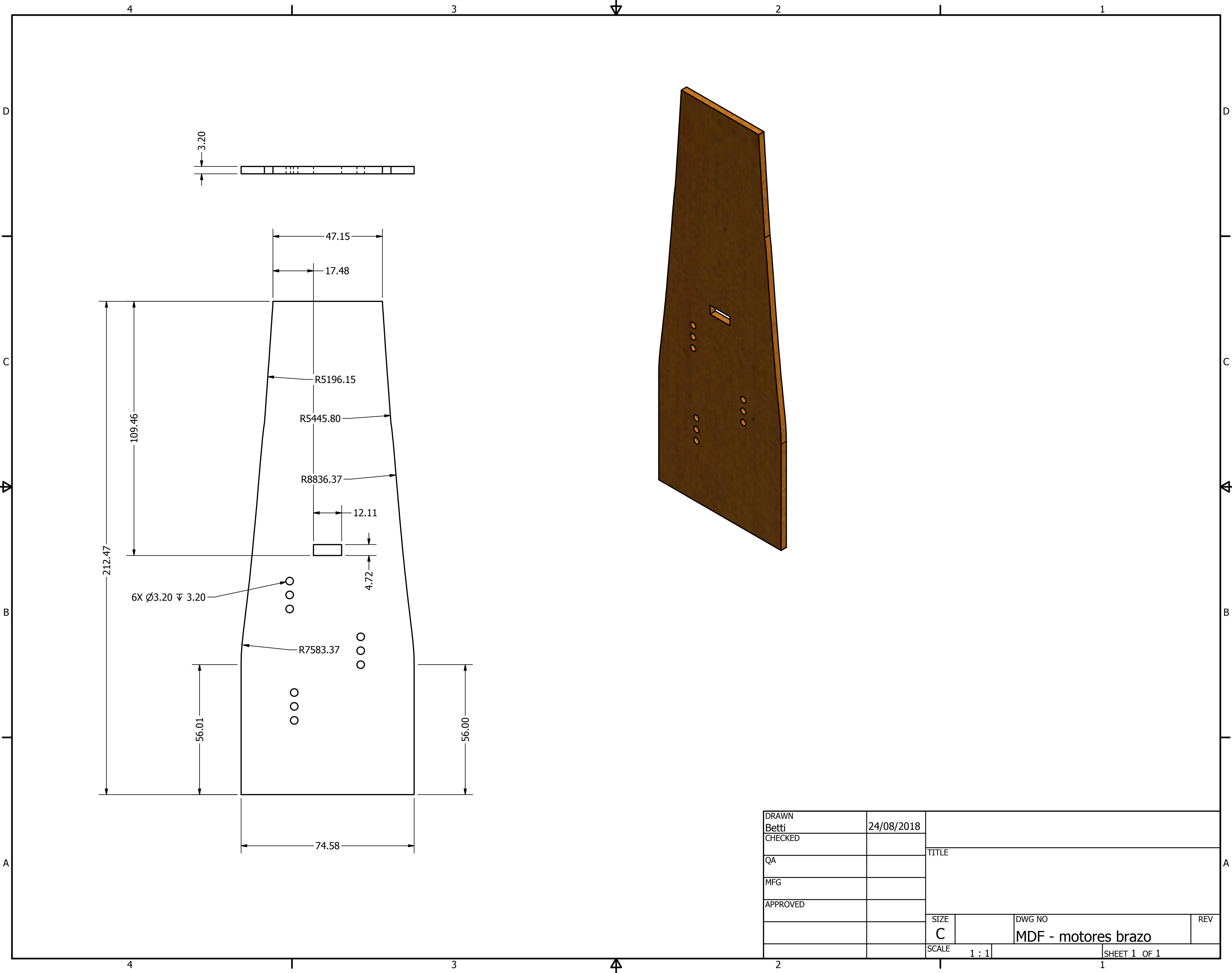
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

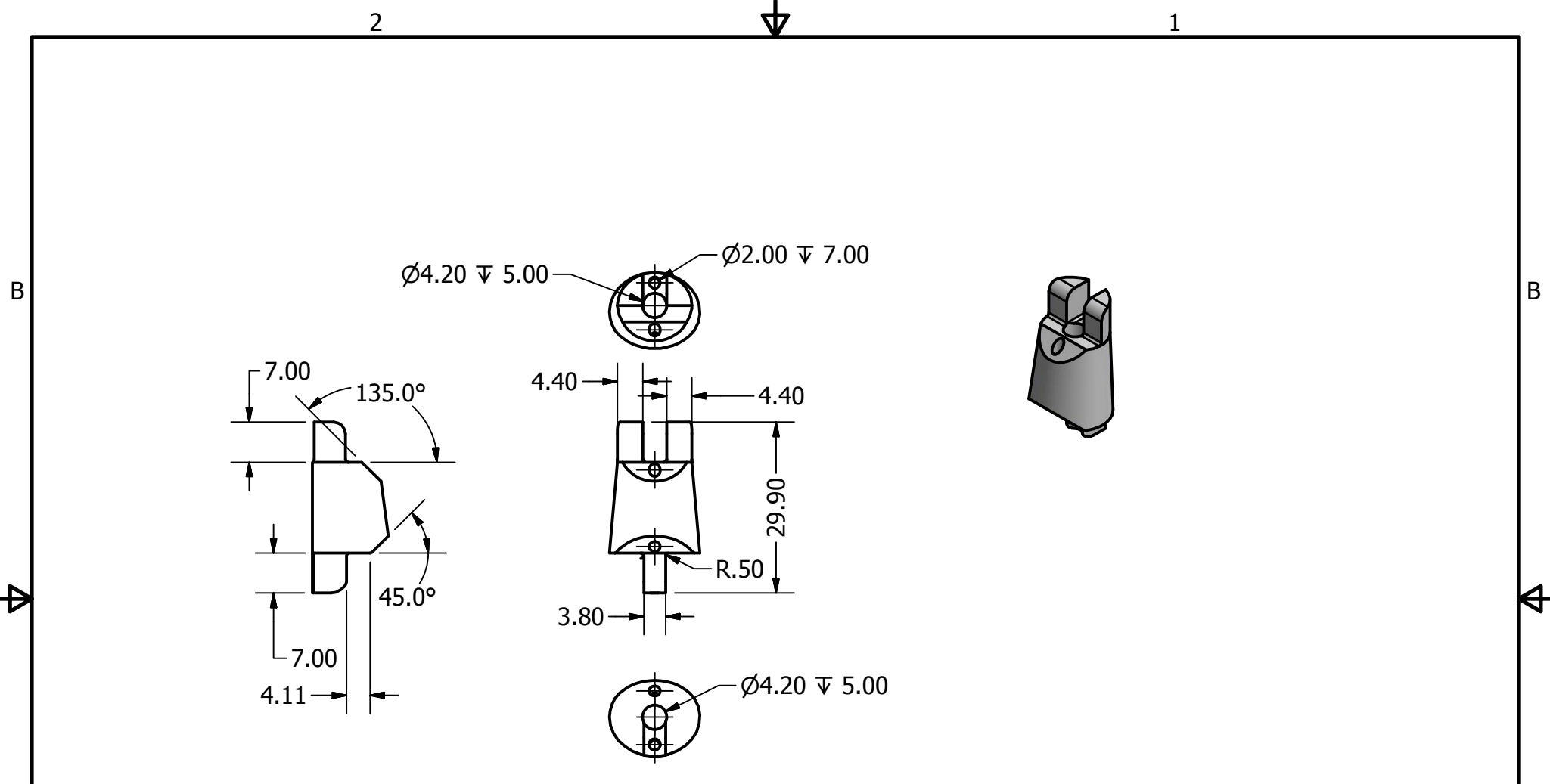
TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A		
PÁGINA 14 DE 17		REV



DRAWN	Betti	24/08/2018		
CHECKED			TITLE	
QA				
MFG				
APPROVED				
		SIZE	DWG NO	REV
		C	MDF - motores brazo	
		SCALE	1 : 1	SHEET 1 OF 1



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±
.XX ±
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR	FECHA
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

1966
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
Guatemala, Guatemala 01015
PBX: (502) 2634-0336 / 40
info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

MATERIAL
ACERO 1045
TRATAMIENTO

MASA: 0.003 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

NÚMERO DE DIBUJO:		
FORMATO A	ESCALA:	UNIDADES:
	PÁGINA 14 DE 17	REV

A

A

2

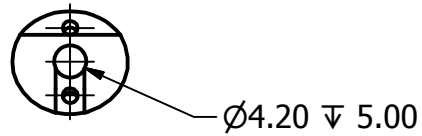
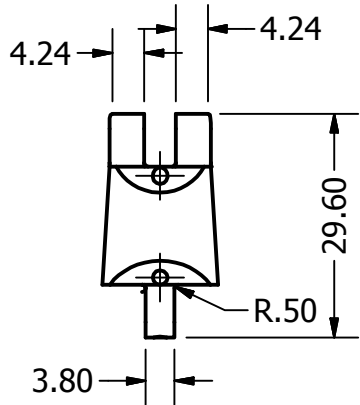
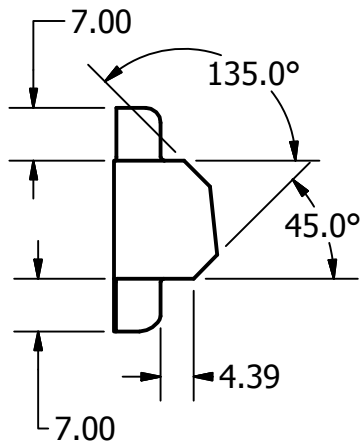
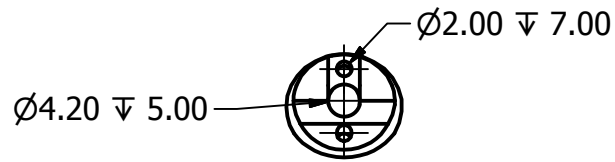
1

2

1

B

B



A

A

TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
 LINEAL .X ±
 .XX ±
 .XXX ±
 ANGULAR ±
 FRACCIONES ±
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

MATERIAL
ACERO 1045
 TRATAMIENTO
 MASA: 0.003 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR FECHA

DISEÑADO POR FECHA

REVISADO POR FECHA

APROBADO POR FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A		
PÁGINA 14 DE 17		REV

2

1

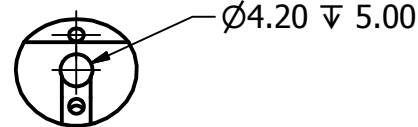
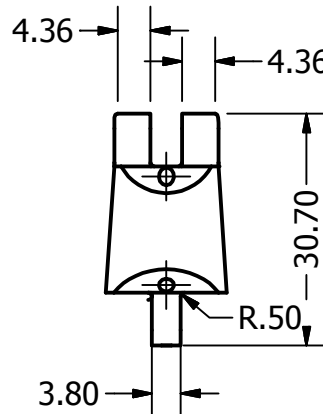
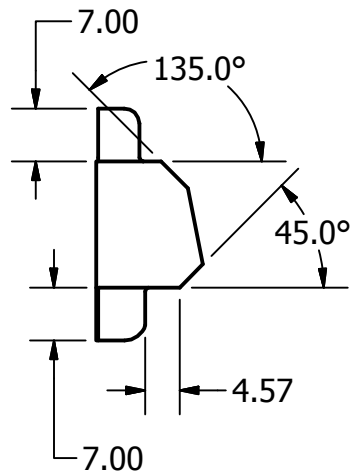
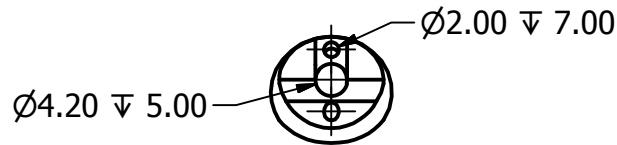
1

2

1

B

B



A

A

A

A

TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
 LINEAL .X ±
 .XX ±
 .XXX ±
 ANGULAR ±
 FRACCIONES ±
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

DIBUJADO POR FECHA

DISEÑADO POR FECHA

REVISADO POR FECHA

APROBADO POR FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

MATERIAL
ACERO 1045
 TRATAMIENTO
 MASA: 0.004 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

FORMATO
A

ESCALA:
 PÁGINA 14 DE 17

UNIDADES:
 REV

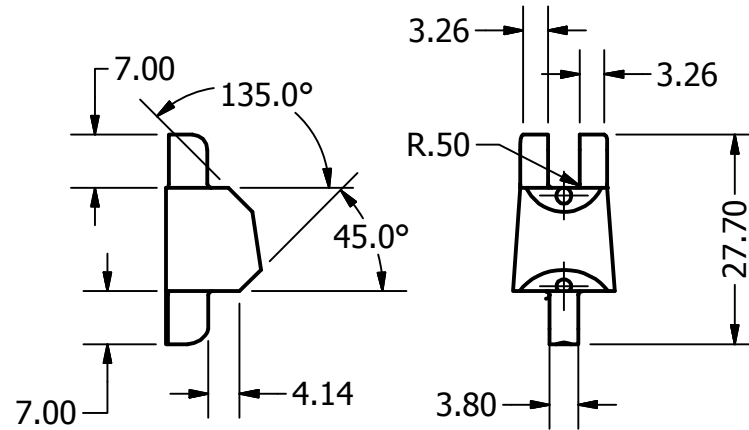
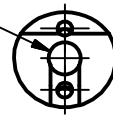
2

1

A

2

1

 $\varnothing 2.00 \sqrt{7.00}$
 $\varnothing 4.20 \sqrt{5.00}$

 $\varnothing 4.20 \sqrt{5.00}$


TODAS LAS MEDIDAS EN
SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO,
INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES

LINEAL .X ±
.XX ±
.XXX ±

ANGULAR ±

FRACCIONES ±

RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

MATERIAL
ACERO 1045
TRATAMIENTO
MASA: 0.002 kg

ÁNGULO DE
PROYECCIÓN

DIBUJADO POR FECHA

DISEÑADO POR FECHA

REVISADO POR FECHA

APROBADO POR FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES
PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU
REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO
PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
Guatemala, Guatemala 01015
PBX: (502) 2634-0336 / 40
info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO

ESCALA:

UNIDADES:

A

PÁGINA 14 DE 17

REV

2

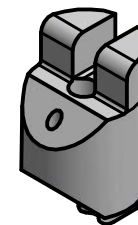
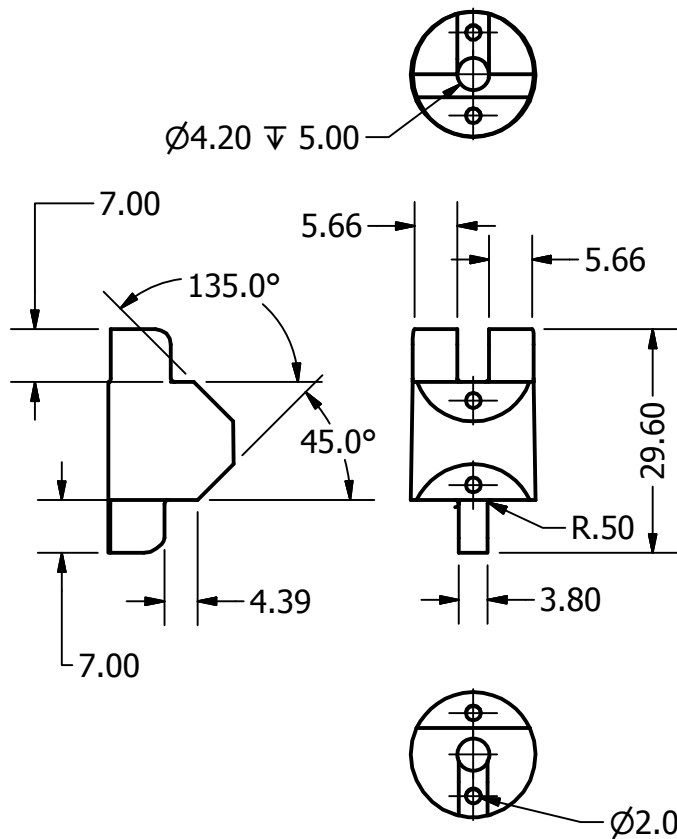
1

2

1

B

B



A

A

TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
 LINEAL .X ±
 .XX ±
 .XXX ±
 ANGULAR ±
 FRACCIONES ±
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

MATERIAL
ACERO 1045
 TRATAMIENTO
 MASA: 0.005 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR FECHA

DISEÑADO POR FECHA

REVISADO POR FECHA

APROBADO POR FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

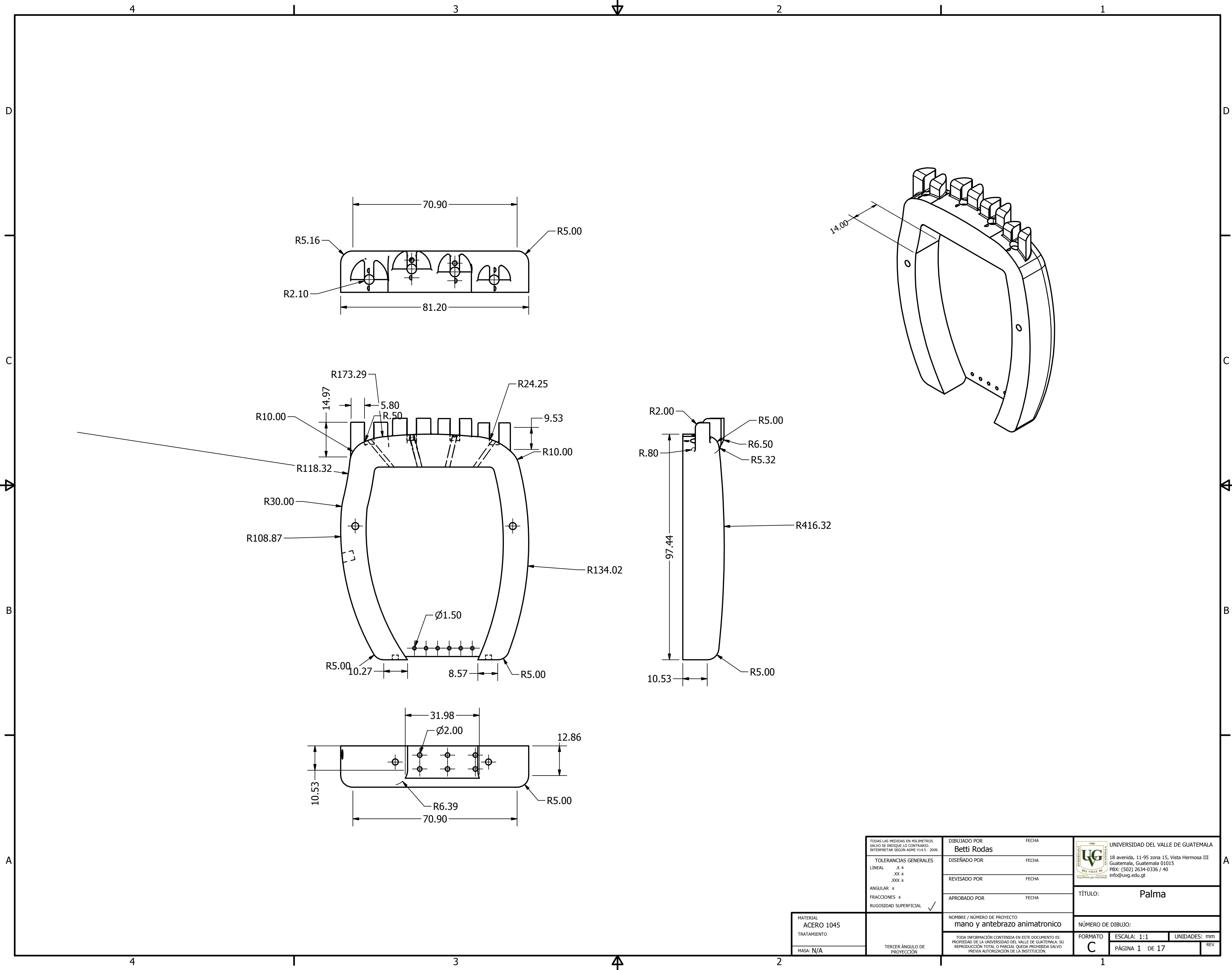
NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A		
	PÁGINA 14 DE 17	REV

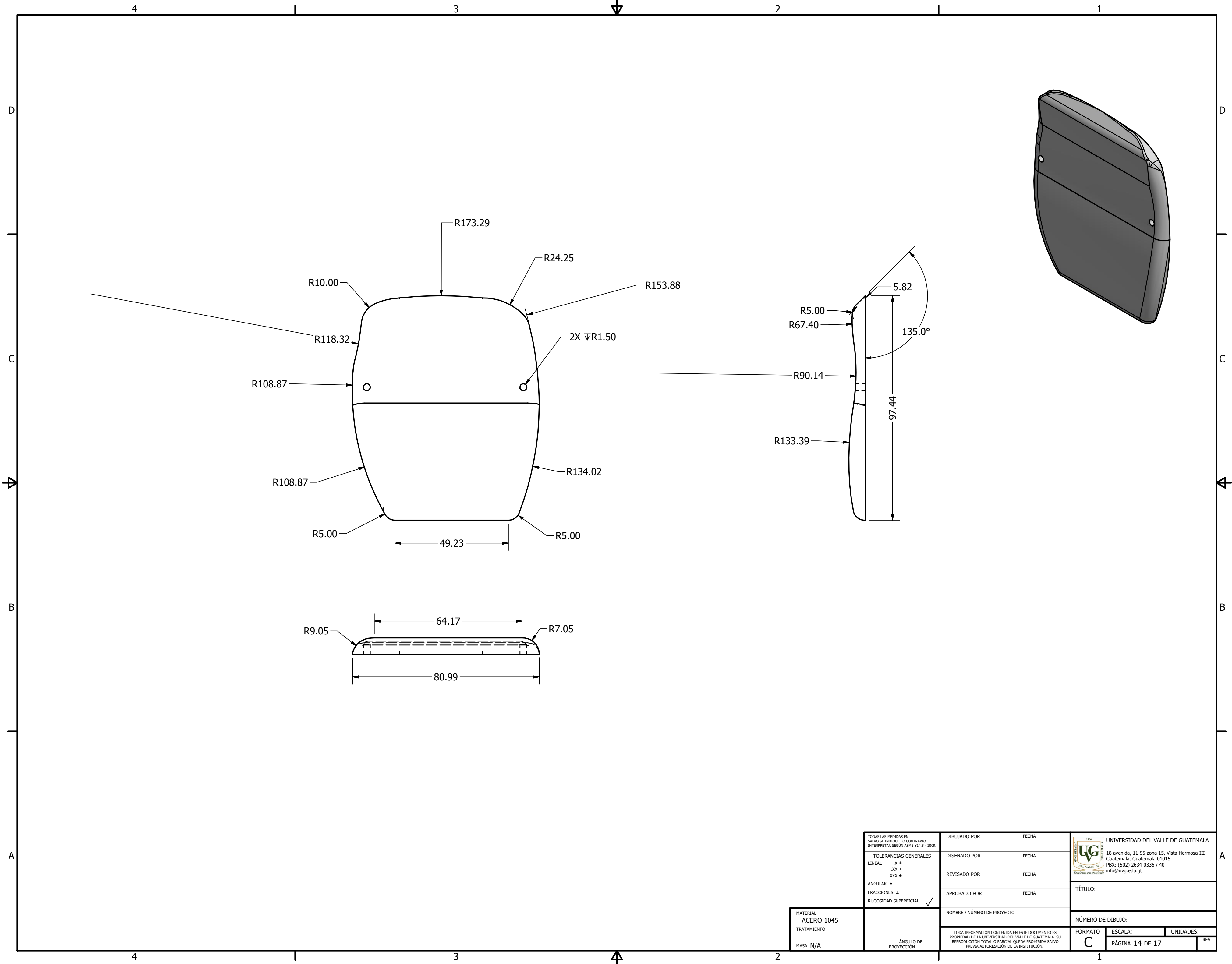
2


1

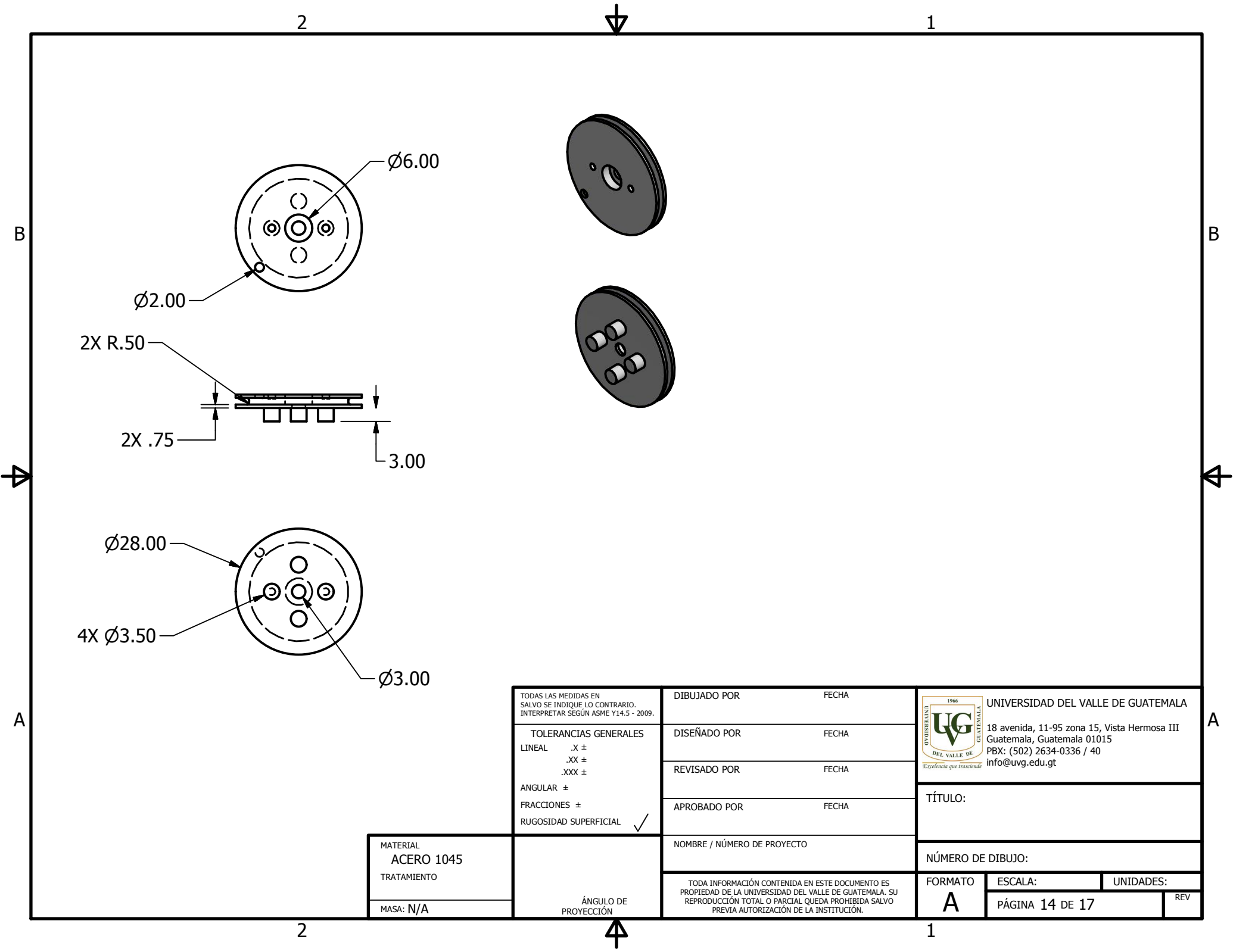




<small>TODAS LAS MEDIDAS EN MILIMETROS SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.</small>		DIBUJADO POR Betti Rodas		FECHA
TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓		DISEÑADO POR		FECHA
		REVISADO POR		FECHA
		APROBADO POR		FECHA
MATERIAL ACERO 1045 TRATAMIENTO MASA: N/A		NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO mano y antebrazo animatronico		
TERCER ÁNGULO DE PROYECCIÓN		<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</small>		
		UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA <small>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvvg.edu.gt</small>		
		TÍTULO: Palma		
		NÚMERO DE DIBUJO:		
		FORMATO C	ESCALA: 1:1	UNIDADES: mm
		PÁGINA 1 DE 17		REV



TOLERANCIAS GENERALES LINAL .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓	DIBUJADO POR	FECHA	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvvg.edu.gt
	DISEÑADO POR	FECHA	
	REVISADO POR	FECHA	
	APROBADO POR	FECHA	
MATERIAL ACERO 1045 TRATAMIENTO	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO		TÍTULO:
MASA: N/A	ÁNGULO DE PROYECCIÓN		NÚMERO DE DIBUJO:
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.		FORMATO C	ESCALA: PÁGINA 14 DE 17
		UNIDADES:	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES	
LINEAL	.X ±
	.XX ±
	.XXX ±
ANGULAR	±
FRACCIONES	±
RUGOSIDAD SUPERFICIAL	✓

MATERIAL	ACERO 1045
TRATAMIENTO	
MASA:	N/A

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR _____ FECHA _____

DISEÑADO POR _____ FECHA _____

REVISADO POR _____ FECHA _____

APROBADO POR _____ FECHA _____

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO _____

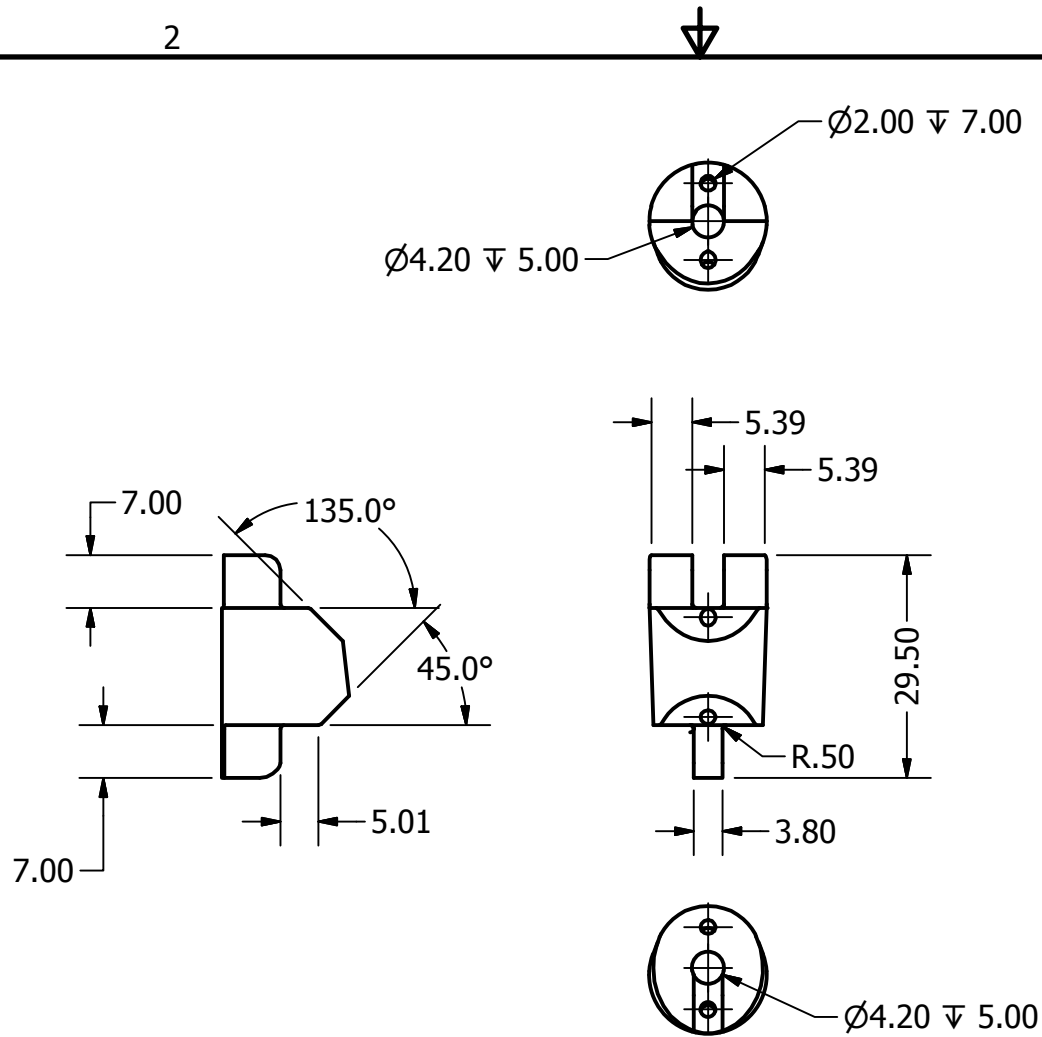
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO: _____

NÚMERO DE DIBUJO: _____

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
 LINEAL .X ±
 .XX ±
 .XXX ±
 ANGULAR ±
 FRACCIONES ±
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

MATERIAL
ACERO 1045
 TRATAMIENTO
 MASA: 0.005 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR _____ FECHA _____


DISEÑADO POR _____ FECHA _____

REVISADO POR _____ FECHA _____

APROBADO POR _____ FECHA _____

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO _____

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

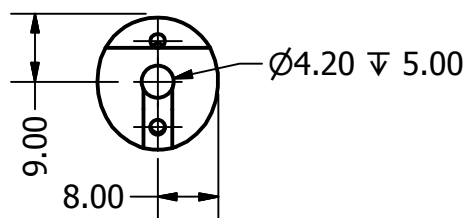
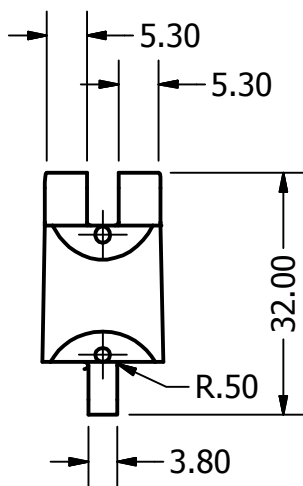
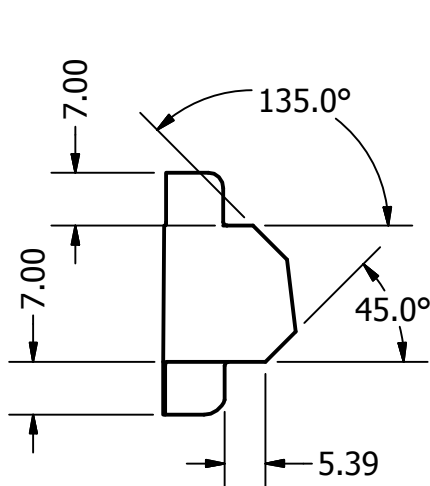
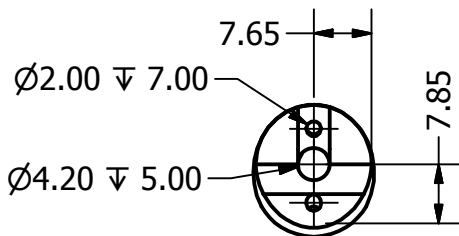
TÍTULO: _____

NÚMERO DE DIBUJO: _____

FORMATO A	ESCALA: _____	UNIDADES: _____
	PÁGINA 14 DE 17	REV _____

2

1




B

B

A

A

<p>TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.</p> <p>TOLERANCIAS GENERALES</p> <p>LINEAL .X ± .XX ± .XXX ±</p> <p>ANGULAR ±</p> <p>FRACCIONES ±</p> <p>RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓</p>	DIBUJADO POR	FECHA	 <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt</p>	
	DISEÑADO POR	FECHA		
	REVISADO POR	FECHA		
	APROBADO POR	FECHA		
	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO			
<p>MATERIAL ACERO 1045</p> <p>TRATAMIENTO</p> <p>MASA: 0.006 kg</p>	<p>ÁNGULO DE PROYECCIÓN</p>		<p>TÍTULO:</p>	
<p>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</p>			<p>NÚMERO DE DIBUJO:</p>	
		<p>FORMATO A</p>	<p>ESCALA:</p>	<p>UNIDADES:</p>
		<p>PÁGINA 14 DE 17</p>		<p>REV</p>

2

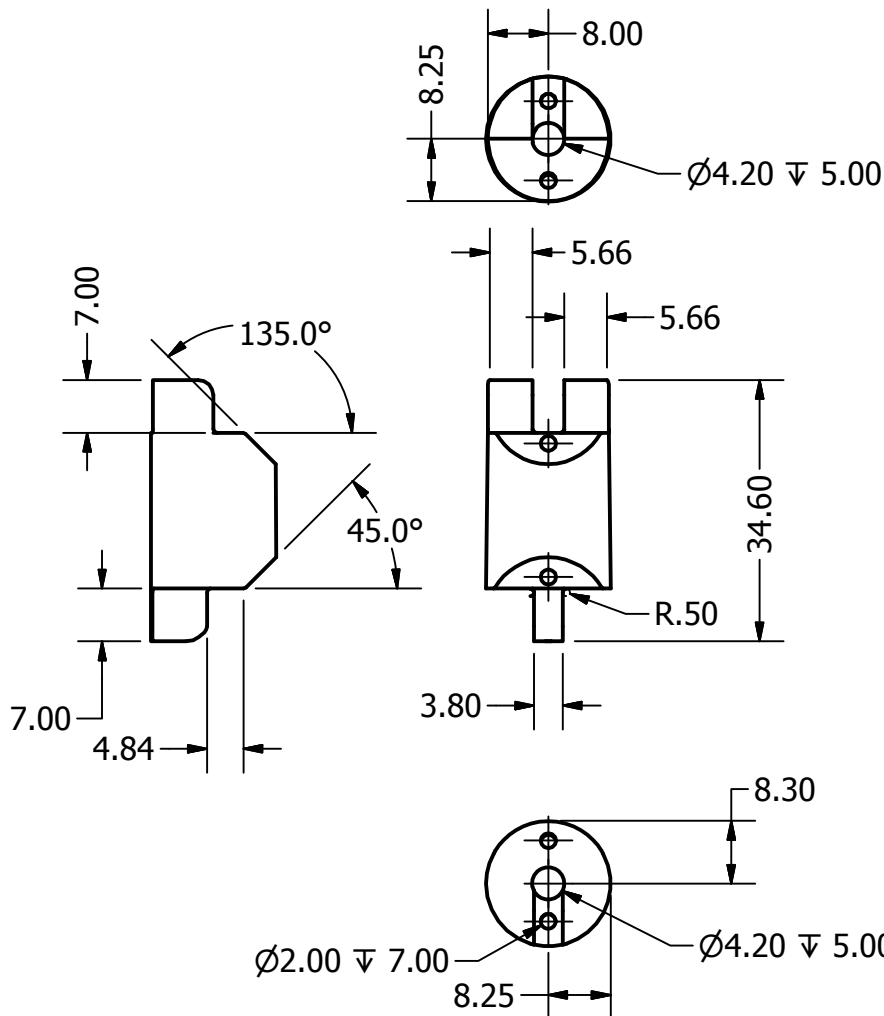
1

2

1

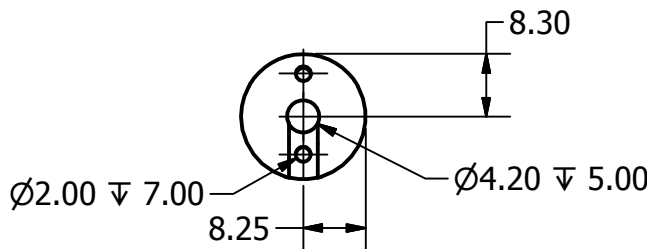
B

B



A

A



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.

TOLERANCIAS GENERALES
 LINEAL .X ±
 .XX ±
 .XXX ±
 ANGULAR ±
 FRACCIONES ±
 RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓

MATERIAL
ACERO 1045
 TRATAMIENTO
 MASA: 0.007 kg

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

DIBUJADO POR FECHA

DISEÑADO POR FECHA

REVISADO POR FECHA

APROBADO POR FECHA

NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336 / 40
 info@uvg.edu.gt

TÍTULO:

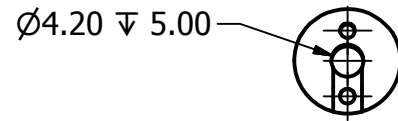
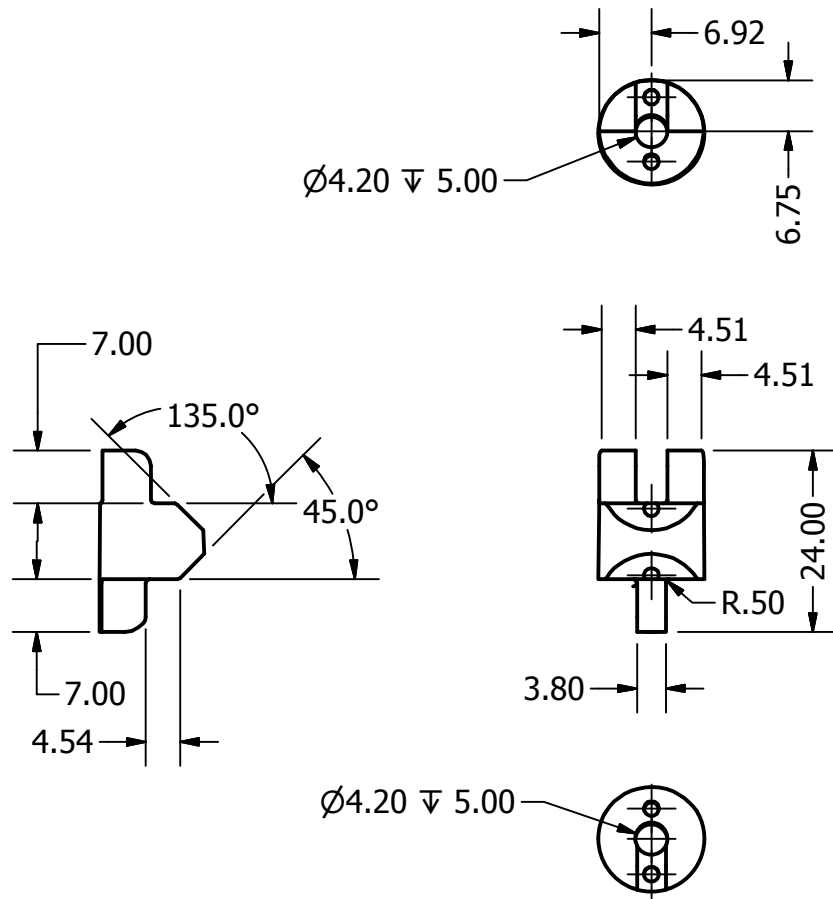
NÚMERO DE DIBUJO:

FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A		
	PÁGINA 14 DE 17	REV

2


1

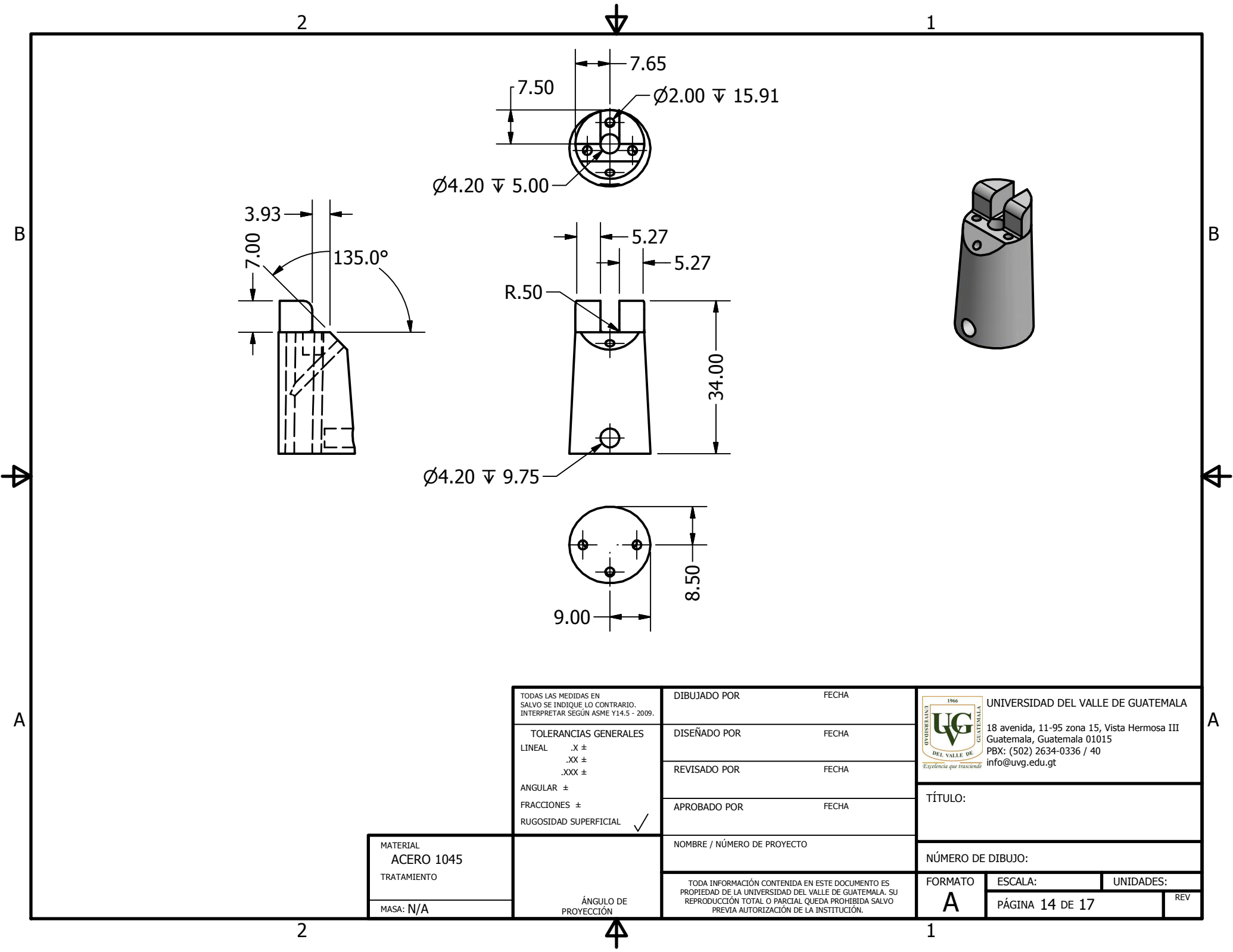





<p>TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.</p> <p>TOLERANCIAS GENERALES</p> <p>LINEAL .X ± .XX ± .XXX ±</p> <p>ANGULAR ±</p> <p>FRACCIONES ±</p> <p>RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓</p>	DIBUJADO POR	FECHA
	DISEÑADO POR	FECHA
	REVISADO POR	FECHA
	APROBADO POR	FECHA
	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	
<p>ÁNGULO DE PROYECCIÓN</p>		
<p>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</p>		

MATERIAL ACERO 1045
TRATAMIENTO
MASA: 0.002 kg

 <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt</p>	TÍTULO:	
	NÚMERO DE DIBUJO:	
FORMATO A	ESCALA:	UNIDADES:
	PÁGINA 14 DE 17	REV



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009. TOLERANCIAS GENERALES LINEAL .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR ± FRACCIONES ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓	DIBUJADO POR	FECHA
	DISEÑADO POR	FECHA
	REVISADO POR	FECHA
	APROBADO POR	FECHA
	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt	TÍTULO:	
	NÚMERO DE DIBUJO:	
FORMATO	ESCALA:	UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17	REV

MATERIAL	ACERO 1045
TRATAMIENTO	
MASA:	N/A

TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

daisy-chain Esquema de cableado de enlaces sucesivos donde no se forman redes. La conexión va de A a B, B a C, y así sucesivamente; sin embargo, C no puede ser conectado a A. 51

ecuación de Gruebler Criterio para mecanismos planos que permite calcular el número de grados de libertad del mecanismo en cuestión. 34