

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño mecánico de cabeza humana robótica animatrónica

Trabajo de graduación presentado por Manolo Enrique Benegas Villeda
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2018

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Diseño mecánico de cabeza humana robótica animatrónica

Trabajo de graduación presentado por Manolo Enrique Benegas Villeda
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

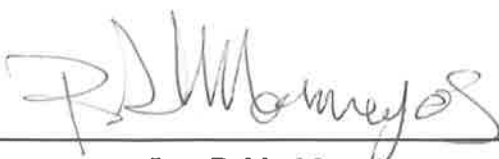
2018

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.

Quiero agradecer principalmente a Dios por la oportunidad de haber estudiado en esta Universidad a lo largo de estos 5 años, dándole cierre a mi carrera con este trabajo de graduación.

Le agradezco a mis padres, por su apoyo y amor incondicional durante todos estos años. A mi padre por sus consejos e ideas, por llevarme y traerme cuando fue necesario y a mi madre por acompañarme en mis desvelos, madrugadas y por haber financiado mi carrera.

Gracias a mis catedráticos por haberme enseñado todo lo que hasta hoy he aprendido, por haberme ayudado en cada curso de la carrera resolviendo dudas, compartiendo experiencias y conocimiento en cada área.

Agradezco a mi asesor y al encargado del proyecto por sus consejos que fueron de gran ayuda para poder llevar a cabo este trabajo de graduación.

A las amistades que formé durante estos años, que me ayudaron a poder salir adelante y que seguirán por muchos años más siendo importantes para mí.

Prefacio	V
Lista de figuras	XI
Lista de cuadros	XI
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	7
4. Objetivos	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
5. Alcance	11
6. Marco teórico	13
6.1. Anatomía de la cara	13
6.1.1. Ojos	13
6.1.2. Párpados	13
6.1.3. Cejas	15
6.1.4. Sonrisa	15
6.1.5. Boca	16
6.1.6. Cuello	17
6.2. Rangos de movimiento	18
6.2.1. Movimiento ocular	18
6.2.2. Boca	20
6.2.3. Párpados	20

6.2.4. Cuello	21
6.3. Actuadores	23
6.3.1. XL-320	23
6.3.2. AX-12A	24
6.3.3. HS-322HD	26
6.4. Mecanismos de cuatro barras	26
6.5. Materiales	28
6.5.1. Aluminio AISI 6061-T651	28
6.5.2. Delrin	29
7. Metodología	31
8. Diseño mecánico	33
8.1. Ojos	33
8.2. Párpados	37
8.3. Cejas	39
8.4. Sonrisa	39
8.5. Boca	41
8.6. Cuello	42
8.7. Selección de actuadores	43
8.7.1. Dynamixel XL-320 [6.3.1]	44
8.7.2. Dynamixel AX-12A [6.3.2]	44
8.7.3. Hitec HS-322HD [6.3.3]	44
9. Manufactura y ensamblaje	45
9.1. Cortado láser en MDF	45
9.2. Impresión 3D utilizando PLA	48
9.3. Ensamble de las piezas	50
10. Análisis de esfuerzos	55
10.1. Aluminio	55
11. Conclusiones	61
12. Recomendaciones	63
13. Bibliografía	65
14. Anexos	67
14.1. Planos de construcción	67

Lista de figuras

1.	Animatrónico de Confucio junto a Lincoln [1]	4
2.	Animatrónico de Avatar [3]	4
3.	Animatrónico DANI [4]	4
4.	Animatrónico de Calavera pirata [3]	5
5.	Músculos de los ojos [6]	14
6.	Músculos de la cara [6]	14
7.	Músculo elevador del párpado [6]	14
8.	Ubicación del músculo elevador del párpado [6]	15
9.	Ubicación músculo occipitofrontal [6]	15
10.	Ubicación músculo corrugador de la ceja [6]	16
11.	Ubicación de músculos cigomáticos [6]	16
12.	Ubicación músculos risorios [6]	16
13.	Ubicación del músculo masetero [6]	17
14.	Músculo masetero [6]	17
15.	Músculos esternocleidomastoideos [6]	18
16.	Músculos escalenos [6]	18
17.	Caracterización movimientos sacádicos [7]	19
18.	Movimientos voluntarios del ojo 1 [6]	19
19.	Movimientos voluntarios del ojo 2	19
20.	Movimientos voluntarios del ojo 3	20
21.	Movimientos voluntarios del ojo 4	20
22.	Movimiento normal de la mandíbula [9]	21
23.	Dimensiones del párpado [10]	21
24.	Flexión del cuello [9]	22
25.	Extensión del cuello [9]	22
26.	Rotación del cuello [9]	23
27.	Flexión lateral del cuello [9]	23
28.	Motor XL-320 [11]	24
29.	Ángulos de motor [11]	24
30.	Tabla de control motor XL-320 [11]	25
31.	Motor AX-12A [12]	26
32.	Tabla de control motor XL-320 [12]	27

33.	Motor HS-322HD [13]	28
34.	Mecanismo de cuatro barras [14]	28
35.	Mecanismo de cuatro barras con junta de pasador [14]	28
36.	Junta Universal [17]	34
37.	Diseño del ojo	35
38.	Cilindro del ojo	35
39.	Mecanismo de movimiento vertical de ojos	36
40.	Mecanismo de movimiento horizontal de ojos	36
41.	Columna con cojinete para ojos	37
42.	Ojo montados sobre base	37
43.	Mecanismo para parpadeo	38
44.	Párpado diseñado	38
45.	Mecanismos de cejas	39
46.	Párpado diseñado	39
47.	Mecanismo sonrisa	40
48.	Polea para sonreír	40
49.	Mecanismo boca	41
50.	Pieza para mover la boca	41
51.	Base de rotación del cuello	42
52.	Base para montar cabeza	43
53.	Junta universal para cuello	43
54.	Mecanismo para flexión, extensión y flexión lateral de cuello	44
55.	Anchura de la cabeza	46
56.	Altura de la cabeza	46
57.	Largura de la cabeza	46
58.	Revisiones estructura nivel superior	48
59.	Revisiones nivel medio de estructura	48
60.	Corte en láser	49
61.	Ensamblaje del nivel medio	50
62.	Ensamblaje del nivel superior	51
63.	Ensamblaje del nivel inferior	51
64.	Cabeza vista superior	52
65.	Cabeza vista lateral	52
66.	Cabeza vista frontal	52
67.	Cuello fabricado	53
68.	Cabeza armada	54
69.	Esfuerzos de Von Mises, nivel medio	56
70.	Desplazamiento, nivel medio	56
71.	Factor de seguridad, nivel medio	57
72.	Esfuerzos de Von Mises, nivel superior	57
73.	Desplazamiento, nivel superior	58
74.	Factor de seguridad, nivel superior	58
75.	Esfuerzos de Von Mises, cuello	59
76.	Desplazamiento, cuello	59
77.	Factor de seguridad, cuello	60

Lista de cuadros

1.	Propiedades del aluminio [15]	29
2.	Propiedades del delrin [16]	30

El siguiente trabajo de graduación consiste en el diseño mecánico de una cabeza robótica animatrónica que implemente distintos mecanismos para obtener movimiento de ojos, cejas, párpados, sonrisa, boca y cuello. Dichos mecanismos deben de permitir un movimiento fluido y realista que se asemeje lo más posible a los movimientos que realiza el ser humano.

Para lograr diseñar dichos mecanismos se investigó acerca de cada uno de los músculos involucrados en todos los movimientos del cuerpo humano a replicar. Además de investigar los músculos que provocan los movimientos, se investigó más a profundidad cuales eran los movimientos que se deseaba realizar. Con esto se pudo saber con exactitud que músculos o combinación de músculos hacían el movimiento, y cual es el rango de cada uno de estos movimientos.

Además de la investigación de los movimientos del cuerpo humano y de la anatomía de la cara se investigó acerca de los actuadores a utilizar y de los materiales que se consideraron para la fabricación de la cabeza.

Luego de haber realizado la investigación se diseñó cada uno de los mecanismos deseados. En su mayoría se escogieron mecanismos de cuatro barras ya que con estos se tiene una salida de un grado de libertad, así que se facilita el control sobre los grados de libertad de los movimientos deseados. El diseño se realizó en Autodesk Inventor 2017. Además de cada uno de los mecanismos también se diseñó la estructura que daba soporte a todos los mecanismos y actuadores a utilizar.

Al momento de iniciar con la manufactura con ayuda de las tecnologías de impresión 3D utilizando PLA y el corte láser en MDF, se lograron encontrar ciertas fallas de diseño que resultaron en rediseñar las piezas que contenían dicha falla. Al haber corregido cada una de estas fallas se procedió con el ensamblaje de las piezas manufacturadas y de esta forma se logró darle validación al diseño ya que se logró mover los mecanismos deseados con los grados de libertad que se esperaba.

Por último, se realizó un análisis de esfuerzos con los materiales de diseño y no los materiales del prototipo para de esta forma poder corroborar que no existe ninguna posibilidad de que el material falle debido a las cargas tan bajas con las que se está trabajando.

The following graduation work consists of the mechanical design of an animatronic robotic head that implements different mechanisms to obtain movement of eyes, eyebrows, eyelids, smile, mouth and neck. These mechanisms should allow a fluid and realistic movement that resembles as closely as possible the movements that the human being makes.

In order to design these mechanisms, we investigated each one of the muscles involved in all the movements of the human body to replicate. In addition to investigating the muscles that cause the movements, it was investigated more in depth what were the movements that were desired to perform. With this it was possible to know exactly which muscles or combination of muscles produced the movement, and what is the range of each of these movements.

In addition to the investigation of the movements of the human body and the anatomy of the face, it was investigated about the actuators to be used and the materials that were considered for the manufacture of the head.

After having carried out the research, each of the desired mechanisms were designed. In their majority, four-bar mechanisms were chosen, since with these there is an output of one degree of freedom, so the control over the degrees of freedom of the desired movements is easier. The design was carried out in Autodesk Inventor 2017. In addition to each of the mechanisms, the structure that supported all the mechanisms and actuators to be used was also designed.

At the time of starting manufacturing with the help of 3D printing technologies using PLA and laser cutting in MDF, we were able to find certain design flaws that resulted in redesigning the pieces that contained this failure. Having corrected each of these failures, the assembly of the manufactured parts was proceeded and, in this way, the design was validated since it was possible to move the desired mechanisms with the degrees of freedom that were expected.

Finally, a stress analysis was made with the design materials and not the materials of the prototype in order to corroborate that there is no possibility that the material fails due to the low loads with which it is working.

El uso de robots animatrónicos ha sido utilizado en gran manera desde hace años por industrias de entretenimiento, cine, publicidad, juguetes y atracciones varias. El propósito de estos robots es el de simular la apariencia, movimientos y gestos de una persona o un animal con fines demostrativos. El diseño de los animatrónicos convencionales se divide en diseño mecánico, electrónico y de control, y de cada uno de estos depende qué tan realista se ve su movimiento. Principalmente lo que logra un movimiento fluido y eficiente es un buen diseño mecánico ya que logrando esto se facilita tanto el diseño electrónico y de control al poder disminuir el torque necesario para mover las piezas, disminuyendo así la corriente necesaria, entre otros aspectos.

En la Universidad del Valle de Guatemala se ha trabajado previamente con robots de este tipo ya que ha habido varias fases de diseños de animatrónicos, sin embargo, aún se ha dejado bastante campo a mejorar en cuanto a diseño mecánico eficiente para obtener movimientos más fluidos y realistas. Este trabajo se enfocará principalmente en el diseño mecánico de la cabeza de un robot animatrónico humano, el cual se divide en varios mecanismos para realizar los distintos movimientos de la cabeza. Se propone realizar mecanismos que faciliten y agilicen el movimiento de las partes de la cabeza y cara, obteniendo así un mayor realismo a lo realizado en proyectos anteriores del mismo índole.

El diseño mecánico esperado para obtener el mejor realismo posible debe involucrar mecanismos eficientes para el movimiento de los ojos, párpados, cejas, boca, mejillas (para sonreír) y cuello, permitiendo así replicar más gestos, expresiones y asemejarse así más a una cabeza humana.

La industria de robots animatrónicos se popularizó gracias a el uso de estos robots en parques de atracciones, siendo Disney de los pioneros y principales promotores de las nuevas tecnologías implementadas en animatrónicos desde la década de los 60. El primer animatrónico humanoide de Disney en ser mostrado al público, con capacidad de coordinar el audio con el movimiento del habla, fue el del ex presidente de los Estados Unidos, Abraham Lincoln mostrado en la Feria Mundial de Nueva York en 1964 [1].

Se conoce que previo a Lincoln, a finales de la década de los 50, se habían realizado distintas pruebas para hacer una cabeza que pudiera moverse de acuerdo al sonido que este emitía, sin embargo, este tuvo problemas con la adhesión de la piel sintética alrededor de los ojos y parecía que este tenía procedencia asiática. Debido a que en esa época se tenía planeado realizar un restaurante chino como parte del proyecto de internacionalización de Disneyland, se decidió por aprovechar ese animatrónico y por lo tanto se creó una figura de Confucio. El show debía implementar un set de pájaros animatrónicos que cantaban, un dragón fijado a una pared que hablaba y que daba la introducción para la cabeza parlante de Confucio. A pesar de las distintas pruebas que se realizaron el animatrónico podía mover únicamente la cabeza, y aún así no lograron hacer que operara correctamente, descartando este proyecto e implementando únicamente los pájaros cantantes, los cuales fueron los primeros audio-animatrónicos que se mostraron al público. Estos avances ayudaron en el desarrollo del más avanzado animatrónico de Abraham Lincoln creado algunos años después [2].

Disney ha ido revolucionando cada vez más sus robots animatrónicos, mejorando grandemente en cuánto a realismo y fluidez de movimiento. Actualmente en Disney World se tiene el animatrónico más avanzado y realista del mundo, y este puede encontrarse en la atracción del Viaje por el Río de Na'vi. Es un animatrónico humanoide con apariencia de un alienígena de la película de Avatar [Figura 4], conocida como la Shaman de las canciones. Para la implementación de este animatrónico fue necesario aplicar las últimas tecnologías de robótica, además de la creación de más de 20 nuevas técnicas diseñadas específicamente para este animatrónico, como lo es su movimiento de labios que se mueve con perfección al

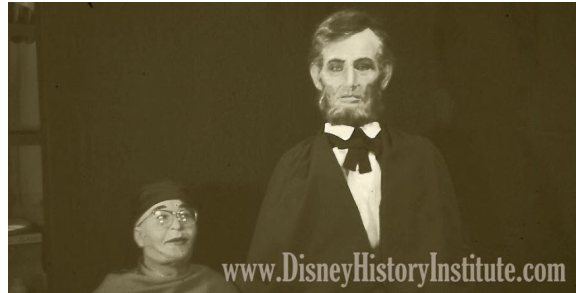


Figura 1: Animatrónico de Confucio junto a Lincoln [1]

emitir sonidos de habla [3].



Figura 2: Animatrónico de Avatar [3]

Previamente se han realizado proyectos enfocados al diseño de robots animatrónicos en la Universidad del Valle de Guatemala. El megaproyecto DANI (Dragón Animatrónico Interactivo [4]) se especializó en el diseño de un robot animatrónico capaz de realizar movimiento mecánico de ojos, cejas, boca, párpados y orejas para emular los gestos faciales del robot.



Figura 3: Animatrónico DANI [4]

Este proyecto cumplió con sus objetivos y expectativas de implementar un animatrónico interactivo capaz de emular gestos faciales, y logró implementar los mecanismos diseñados para mover cada una de las partes de la cara.

Otro megaproyecto con un enfoque similar fue el de Animatronics del año 2016, en especial el módulo de la Calavera Animatrónica [5]. Esta calavera contaba con movimiento de los ojos, boca y cuello, y todo el cráneo esta contenido dentro de un cofre de pirata que de igual forma cuenta con mecanismo de apertura y cierre. Además se implemento un mecanismo para lograr que la calavera saliera y entrara dentro del cofre.

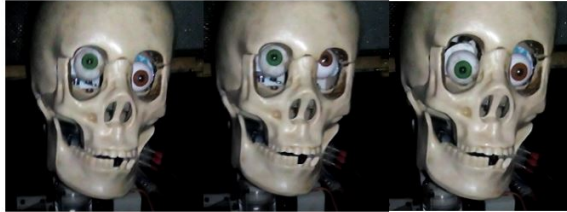


Figura 4: Animatrónico de Calavera pirata [3]

En Guatemala ya se ha implementado con anterioridad el uso de robots animatrónicos para el entretenimiento, en especial en parque de diversiones y como atracciones en restaurantes y centros comerciales. A pesar de haber ya varios animatrónicos, estos no han tenido la necesidad de mostrar el realismo de la cabeza y cara humanas, la mayoría de los robots instalados en Guatemala han sido de animales y únicamente cuentan con movimientos simples.

Al momento de realizar un animatrónico humano el reto es mayor ya que únicamente con realizar movimiento de cabeza de un lado a otro, o de los brazos hacia arriba y hacia abajo no representan lo que el ser humano es capaz de hacer, por lo que un diseño así quedaría bastante corto. De ahí se ve la necesidad de implementar los mecanismos más eficientes posibles. Debido a que el enfoque de este trabajo es el de llevar a cabo el diseño de los mecanismos que logren los movimientos de una manera fluida y que tengan el número de grados de libertad necesarios. Esto es relevante debido a que la cara y cabeza de un animatrónico es la principal fuente de interacción con su ambiente y con los usuarios que interactúan con el.

Un diseño eficiente de estos mecanismos es de vital importancia para así lograr reducir el número de actuadores a utilizar, implementándolos únicamente dónde sea necesario. Reducir el número de actuadores se traduce en una reducción de la corriente a consumir, y un diseño eficiente para los mecanismos significa reducir el torque necesario para poder moverlos.

Con este proyecto se logrará implementar conocimiento de diversas áreas de interés de la carrera, desde el diseño mecánico hasta la parte de programación para la realización de pruebas. Esto me permite consolidar dichos conocimientos en algo práctico que funcionará como un reto para demostrar que, como estudiante a punto de graduarse, poseo las competencias necesarias para cumplirlo.

4.1. Objetivo general

Realizar el diseño mecánico e implementación de una cabeza animatrónica que replique movimientos humanos de una forma fluida, realista y eficiente.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar mecanismo para movimiento vertical, lateral y de rotación de los ojos.
- Diseñar mecanismo para realizar movimiento de parpadear.
- Diseñar mecanismo para realizar elevación de cejas.
- Diseñar mecanismo para el movimiento de sonreír.
- Diseñar mecanismo para abrir y cerrar boca.
- Diseñar mecanismo para flexión, extensión y rotación de cuello.
- Seleccionar materiales adecuados para estructura de cabeza y cuello.
- Diseño de cráneo que contenga los actuadores y mecanismos.
- Selección de actuadores para cada mecanismo realizado.
- Selección de microcontrolador para pruebas de los movimientos de la cabeza.
- Diseño de planos de cada mecanismo utilizado y estructuras.
- Fabricación de prototipo de la cabeza animatrónica.

Este proyecto ha sido diseñado con el fin de ser capaz de realizar los movimientos faciales de un rostro humano, desde el movimiento de ojos, cejas, párpados, sonrisa, boca y cuello. Con esto se logrará implementar un robot animatrónico interactivo cuyo propósito es el de poder emular de una manera realista y fluida los movimientos de la cara, logrando asemejarse lo más posible al movimiento humano y que se pueda apreciar desde un punto de vista académico, interactivo y demostrativo lo que es capaz de lograrse con distintos mecanismos y actuadores.

El alcance en cuanto al diseño de los mecanismos es el de poder realizar todos los movimientos previamente mencionados implementando servo motores como actuadores y mecanismos de cuatro barras para conseguir dichos movimientos, sin embargo, no se espera lograr implementar todos los movimientos al mismo tiempo ya que esto es más una necesidad que se cubre con la programación de las distintas rutinas para mover los mecanismos y no del diseño de los mecanismos en sí.

En cuanto a la selección de los materiales adecuados para la estructura y los mecanismos, esta es una decisión que se toma según a los análisis de esfuerzos realizados en Inventor para cada uno de los materiales propuestos. Con base en dichos análisis se considera cual de los materiales soporta de mejor manera los esfuerzos a los que está sometida la estructura.

6.1. Anatomía de la cara

6.1.1. Ojos

El ojo humano cuenta con 6 músculos que permiten su movilidad en varias direcciones [Figura 5]. Están los músculos rectos superior e inferior que permiten la movilidad vertical del ojo, siendo el inferior el que se contrae para ver hacia abajo y el superior el que logra ver hacia arriba. También existen los músculos recto medial y recto lateral que permiten que el ojo se mueva horizontalmente, siendo el medial el que mueve el ojo hacia dentro, y el lateral el que lo mueve hacia afuera. Por último, se tienen los músculos oblicuos superior e inferior, los cuales son los encargados de permitir la rotación de los ojos, siendo el superior el encargado de la rotación en dirección de las agujas del reloj, y el inferior en contra de las agujas del reloj. El globo ocular tiene un diámetro transversal de 23.5mm; diámetro vertical de 23mm y diámetro anteroposterior entre 22 y 24mm. Además, se conoce que la distancia promedio entre los ojos es de 6.2cm. [6]

6.1.2. Párpados

El movimiento de los párpados se da únicamente por un músculo que se llama músculo elevador del párpado [Figura 7], el cual como su nombre lo dice se contrae elevando el párpado y descubriendo así la córnea y esclerótica. El párpado humano no permanece totalmente inmóvil hasta el momento de parpadear, este se mueve juntamente con el ojo, algo que es claro de entender al momento de voltear a ver hacia arriba o hacia abajo, donde el párpado sigue el movimiento del ojo. [6]

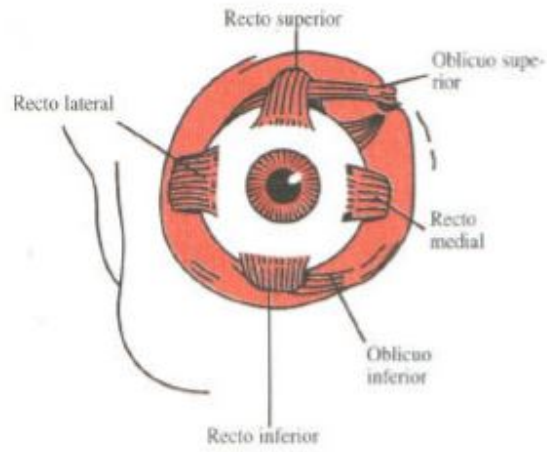


Figura 5: Músculos de los ojos [6]



Figura 6: Músculos de la cara [6]

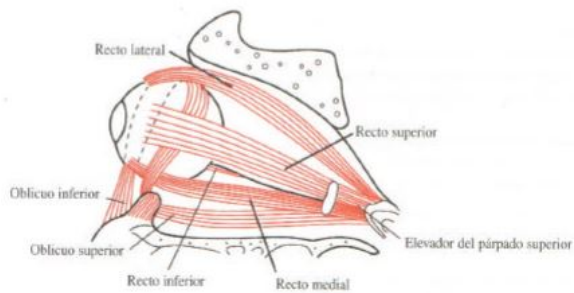


Figura 7: Músculo elevador del párpado [6]



Figura 8: Ubicación del músculo elevador del párpado [6]

6.1.3. Cejas

En el cuerpo humano el encargado de elevar las cejas es el músculo occipitofrontal [Figura 6], el cual forma parte del cuero cabelludo. Está ubicado debajo de los músculos frontal y orbicular de los párpados. Este músculo permite además del movimiento de las cejas, el arrugar la frente y mover el cuero cabelludo sin necesidad de mover la cabeza.

Además de el músculo occipitofrontal se tiene el músculo superciliar [Figura 6] o corrugador de la ceja, el cual es el inverso del músculo occipitofrontal y es el que se encarga, como su nombre lo indica, de acercar las cejas entre sí arrugando o frunciendo el ceño. La ubicación de ambos se pueden apreciar en las Figuras 9 y 10 [6].



Figura 9: Ubicación músculo occipitofrontal [6]

6.1.4. Sonrisa

Los músculos encargados de realizar la expresión facial de la sonrisa es una combinación de los músculos risorios y los cigomáticos mayor y menor [Figura 6]. Los músculos risorios son los encargados de extenderse lateralmente desde el ángulo de la boca, dígase de forma transversal a los extremos de la boca; los músculos cigomáticos se extienden hacia arriba y lateralmente sobre la mejilla desde un ángulo lateral a la boca [6].



Figura 10: Ubicación músculo corrugador de la ceja [6]



Figura 11: Ubicación de músculos cigomáticos [6]



Figura 12: Ubicación músculos risorios [6]

6.1.5. Boca

El músculo masticador, o encargado de elevar la mandíbula es el músculo masetero. Es un músculo grueso que se localiza a la par de la mandíbula, y es el encargado de, al contraerse, elevar la mandíbula y apretar los dientes. Este músculo hace el movimiento de elevar el maxilar, lo cual se refleja como el cerrar la mandíbula [6].



Figura 13: Ubicación del músculo masetero [6]

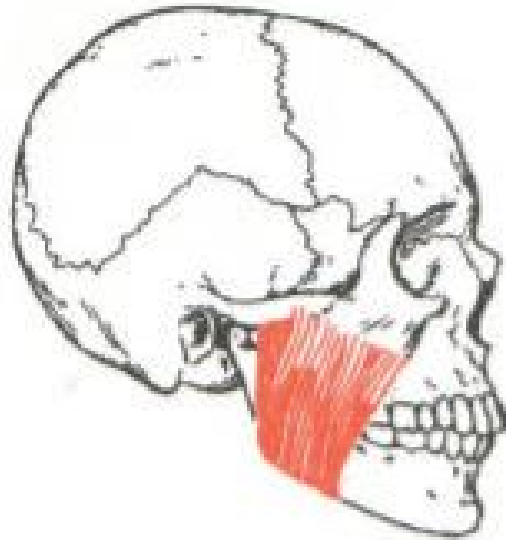


Figura 14: Músculo masetero [6]

6.1.6. Cuello

El cuello tiene un movimiento en los tres planos, por lo que requiere de varios músculos para lograr dichos movimientos. Los músculos de la región anterior son los que mantienen la cabeza en su lugar y permiten los movimiento de inclinar la cabeza hacia adelante, atrás y lateralmente, además de la rotación de la misma.

Los esternocleidomastoideos localizados a ambos lados del cuello ayudan a flexionar la cabeza cuando ambos se contraen, mientras que la contracción de uno solo de ellos causa la rotación hacia su respectivo lado. Los músculos recto anterior mayor y menor ayudan con el movimiento de flexión de la cabeza, específicamente logrando inclinar la cabeza hacia adelante. Los músculos escalenos y recto lateral son los encargados del movimiento de inclinación lateral de la cabeza [6].

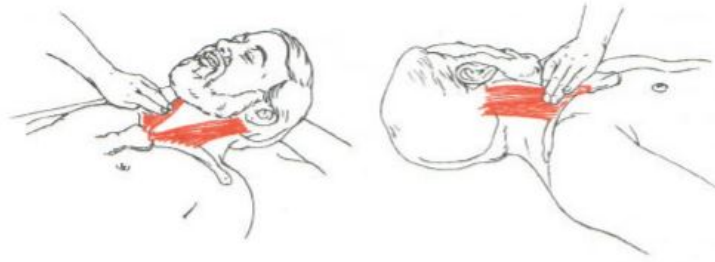


Figura 15: Músculos esternocleidomastoideos [6]

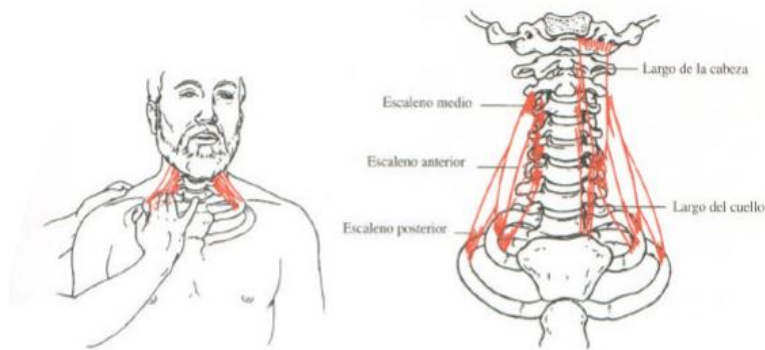


Figura 16: Músculos escalenos [6]

6.2. Rangos de movimiento

Se realizó la investigación de los rangos de movimiento de varios de los mecanismos del cuerpo que se replicarán, para de esta forma configurar cada uno de los respectivos actuadores para moverse dentro del rango permitido. Además del rango de movimiento se investigaron las distintas posiciones o aperturas normales de la boca y párpados.

6.2.1. Movimiento ocular

Existen distintos tipos de movimientos oculares y estos pueden clasificarse según su función. Se tienen los siguientes tipos de movimientos:

- Movimientos automáticos: Estos son utilizados para compensar el movimiento de la cabeza (reflejos vestibulo-oculares) o para poder enfocar el entorno o algún objetivo en específico (reflejos opto cinéticos).
- Movimientos voluntarios: Es el tipo de movimiento que uno realiza voluntariamente para trasladar la mirada de un punto fijo a otro (movimientos de re-fijación, sacádicos, sacadas) o para poder seguir un objeto que se encuentra en movimiento (movimientos de seguimiento y de vergencia).
- Micro-movimientos: Este tipo de movimientos están asociados a la fijación ocular y pueden ser temblores, micro-sacadas o derivas.

Movimientos sacádicos	
Amplitud máxima	30° desplazamientos superiores requieren movimiento de la cabeza
Duración	30-120 ms según la amplitud del desplazamiento
Velocidad máxima	Alcanzada durante la sacada: hasta 700°/s
Main relation	Relación constante entre amplitud y velocidad máxima: a mayor amplitud del movimiento mayor velocidad máxima. La dirección y la velocidad no se pueden modificar una vez lanzado el movimiento
Latencia o tiempo de reacción sacádica	Tiempo entre la aparición de un estímulo y el inicio de la sacada: 180-300 ms. En condiciones normales se producen movimientos de menor latencia (80-100 ms) llamados sacádicos <i>express</i> . Dependen de un predominio de los mecanismos reflejos de respuesta a estímulos
Periodo refractario motor	100-200 ms siguientes al término de una sacada durante los cuales no puede iniciarse voluntariamente un nuevo movimiento sacádico
Tiempo mínimo de fijación	200-350 ms, comprende el periodo refractario motor y un tiempo de procesamiento cognitivo del objeto enfocado (50 ms mínimo). Existe una relación directa duración de la fijación y la amplitud de la sacada precedente: la fijación es más larga cuanto mayor ha sido el desplazamiento sacádico anterior
Micromovimientos asociados a la fijación ocular	
Derivas o fluctuaciones (<i>drifts</i>)	Irregulares, lentos (0,1°/s), centrífugos y de 2-5 minutos de arco de amplitud.
Microsacadas (<i>flicks</i>)	Muy rápidos, amplitud < 1°, para corregir la posición cuando las derivas han alejado excesivamente la imagen del centro de la fovea o cuando la fijación en un punto estacionario excede los 300-500 ms
Tembler (<i>tremor</i>)	Oscilaciones de alta frecuencia (30-150 Hz) y muy baja amplitud (24 segundos) que se superponen a los otros micromovimientos

Figura 17: Caracterización movimientos sacádicos [7]



Figura 18: Movimientos voluntarios del ojo 1 [6]

Figura 19: Movimientos voluntarios del ojo 2



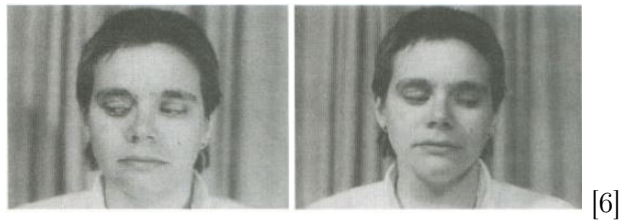
[6]

Los movimientos de interés y que se replicarán serán los movimientos voluntarios ya que únicamente se desea poder mover los ojos de un punto de visión a otro y poder seguir objetos en movimiento. Para los movimientos automáticos se tiene los reflejos vestibulo-oculares los cuales se generan cuando los receptores de aceleración angular de los canales semicirculares del laberinto posterior detectan el movimiento de la cabeza y mandan, con un delay de aproximadamente 16ms, la señal a los ojos para contrarrestar dicho movimiento y así seguir teniendo una imagen estable. [7]

Figura 20: Movimientos voluntarios del ojo 3



Figura 21: Movimientos voluntarios del ojo 4



Movimientos sacádicos o de re-fijación

Son movimientos rápidos que permiten fijar la visión de un punto a otro, una sucesión de estos movimientos es lo que permite el rastreo de una imagen, escena u objeto. Una persona realiza en promedio un total de 200,000 movimientos sacádicos por día. Gila define una tabla [Figura 17] en su documento para caracterizar los movimientos sacádicos por distintos parámetros, cómo el ángulo de movimiento, velocidad, duración, etc. [7].

6.2.2. Boca

Se ha definido como la apertura normal mandibular o de boca como la distancia vertical que hay desde el borde de los incisivos superiores hasta donde empiezan los incisivos inferiores. Se han realizado distintos estudios en una gran cantidad de países para determinar lo que es una apertura normal y se ha encontrado que dentro del rango de lo normal puede ir desde una apertura de 32mm hasta 77mm en adultos. La apertura promedio va de 40-50mm.[8] Se dice que esta dimensión debe ser lo suficientemente amplia para poder introducir los dedos índice, medio y anular de forma vertical sin ningún esfuerzo mayor.[9]

6.2.3. Párpados

La distancia máxima entre el borde del párpado inferior y el borde del párpado superior se conoce como apertura palpebral. En la Figura 23 se aprecian las distintas dimensiones relacionadas al párpado. El dato de interés es el de la apertura palpebral ya que únicamente se cuenta con el movimiento vertical del párpado. La apertura palpebral que se puede considerar como normal está en un rango entre 8 y 11mm, esto debido a que las dimensiones verticales de la córnea del ojo de un adulto promedio está entre 11 y 12mm.



Figura 22: Movimiento normal de la mandíbula [9]

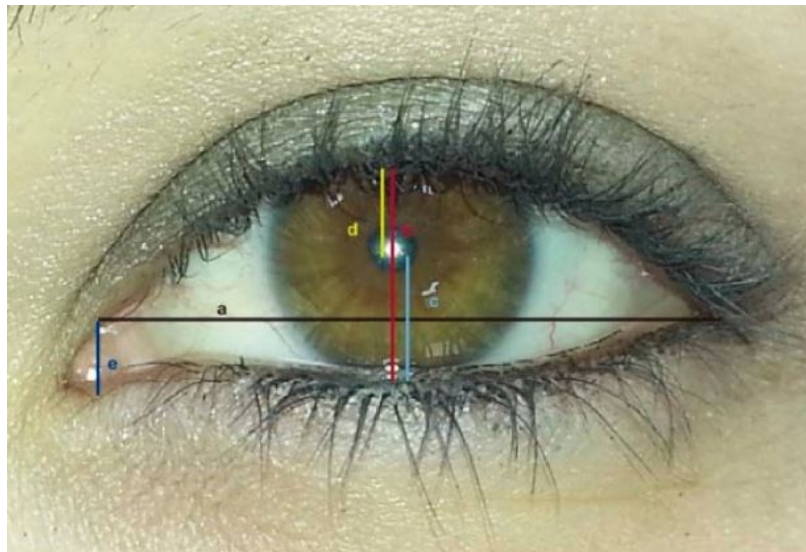


Figura 23: a) Fisura palpebral; b)Apertura palpebral;c)Reflejo pupila-margen inferior; d)Reflejo pupila-margen superior; e)canto interno localizado 2mm inferior al canto externo [10]

La función elevadora es la apertura extrema que puede existir entre el párpado inferior y superior al momento en el que la mirada se encuentra en elevación extrema puede ser de 13 a 17mm.

6.2.4. Cuello

El cuello al poder moverse en todos los planos, se define su restricción de rango de movimiento en función del movimiento que se esté realizando. Los movimientos que el cuello puede realizar y que se replicarán son el de flexión, extensión, rotación y flexión lateral.

Flexión

Para la flexión del cuello se tiene un arco normal de movilidad que debería permitirnos tocar el pecho con la barbilla, estando la cabeza inclinada a un ángulo de aproximadamente 45° hacia delante desde la vertical.[9]



Figura 24: Flexión del cuello [9]

Extensión

En cuanto a la extensión del cuello se tendrá que la cabeza se encuentra a un ángulo de casi 90° de inclinación hacia atrás, siempre desde la vertical.[9]



Figura 25: Extensión del cuello [9]

Rotación

La rotación de la cabeza se da hasta un punto máximo donde la barbilla se alinea con el hombro, esto hacia ambos lados, permitiendo así un rango de movilidad de casi 180° en total, 90° hacia cada lado [9].

Flexión lateral

En condiciones normales, este movimiento puede alcanzar hasta un máximo de casi 45° de inclinación, desde la vertical, hacia cada uno de los lados. Este movimiento se puede describir como el acercar lo más posible la oreja hacia el hombro, en ambas direcciones.[9]



Figura 26: Rotación del cuello [9]



Figura 27: Flexión lateral del cuello [9]

6.3. Actuadores

Los actuadores seleccionados para el diseño fueron los motores inteligentes Dynamixel XL-320 y Dynamixel AX-12A, además de un servo regular de alto torque Hitec HS-322HD.

6.3.1. XL-320

El motor Dynamixel XL-320 [Figura 28] es un actuador inteligente especial para robótica que incorpora un motor DC, una caja reductora, un controlador PID, un driver y comunicación dentro de un solo servo. Es un motor con una gran alta calidad y precisión para su tamaño, y posee un tipo de conector TTL con posibilidad de conectarse en cadena para de esta forma poder armar robots compactos. Su gran precisión en cuanto a la posición se da debido a su controlador PID incorporado, el cual puede ser modificado cambiando las respectivas variables K_p , K_d o K_i . A diferencia de un servo convencional cuyo funcionamiento es variando el ancho de una señal PWM, estos utilizan un protocolo de comunicación serial asíncrona half-duplex, de 8 bits con un bit de alto y sin paridad, y al acceder a distintos bloques de memoria que este contiene se puede realizar distintas acciones.[11]

Este motor cuenta con las direcciones de memoria de la Figura 30 que cumplen con su respectiva función ahí mencionada y con un rango igualmente ahí descrito para variables como velocidad, torque, posición, color de LED, constantes de PID, etc. Para poder acceder a estas direcciones de memoria se utilizó un microcontrolador Arduino y la librería específica para dicho motor.



Figura 28: Motor XL-320 [11]

El motor cuenta con dos modos de operación que son el modo wheel y el modo joint. El modo de interés es el modo joint que es el que permite operar el servo indicándole ángulos específicos de movimiento, mientras en el modo wheel se puede usar como una rueda que gira libremente. Este movimiento puede ir desde 0° hasta 300° . [11]

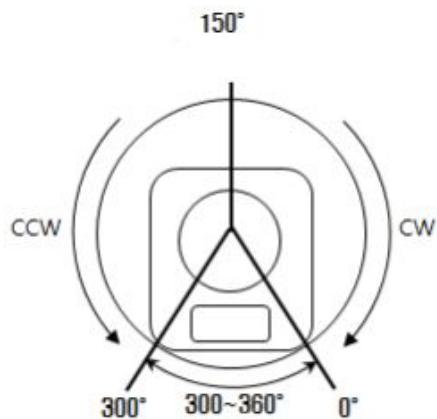


Figura 29: Ángulos de motor [11]

6.3.2. AX-12A

El servo inteligente AX-12A [Figura 31] es el motor de robótica más avanzado en el mercado según su precio. Este servo tiene la habilidad de poder alterar o monitorear su

Area	Address (Hexadecimal)	Size(byet)	Name	Description	Access	Initial Value	Min	Max
EEPROM	0	2	Model Number	Model number	R	350	-	-
	2	1	Version of Firmware	Information on the version of firmware	R	-	-	-
	3	1	ID	ID of Dynamixel	RW	1	0	252
	4	1	Baud Rate	Baud Rate of Dynamixel	RW	3	0	3
	5	1	Return Delay Time	Return Delay Time	RW	250	0	254
	6	2	CW Angle Limit	clockwise Angle Limit	RW	0	0	1023
	8	2	CCW Angle Limit	counterclockwise Angle Limit	RW	1023	0	1023
	11	1	Control Mode	Control Mode	RW	2	1	2
	12	1	Limit Temperature	Internal Limit Temperature	RW	65	0	150
	13	1	lower Limit Voltage	Lowest Limit Voltage	RW	60	50	250
	14	1	Upper Limit Voltage	Upper Limit Voltage	RW	90	50	250
	15	2	Max Torque	Lowest byte of Max. Torque	RW	1023	0	1023
	17	1	Return Level	Return Level	RW	2	0	2
	18	1	Alarm Shutdown	Shutdown for Alarm	RW	3	0	7
R7A M	24	1	Torque Enable	Torque On/Off	RW	0	0	1
	25	1	LED	LED On/Off	RW	0	0	7
	27	1	D Gain	D Gain	RW	0	0	254
	28	1	I Gain	I Gain	RW	0	0	254
	29	1	P Gain	P Gain	RW	32	0	254
	30	2	Goal Position	Goal Position	RW	-	0	1023
	32	2	Moving Speed	Goal Speed	RW	-	0	2047
	35	2	Torque Limit	Goal Torque	RW	-	0	1023
	37	2	Present Position	Current Position	R	-	-	-
	39	2	Present Speed	Current Speed	R	-	-	-
	41	2	Present Load	Current Load	R	-	-	-
	45	1	Present Voltage	Current Voltage	R	-	-	-
	46	1	Present Temperature	Present temperature	R	-	-	-
	47	1	Registered Instruction	Registered Instruction	R	0	-	-
49	1	Moving	Moving	R	0	-	-	
50	1	Hardware Error Status	Hardware error status	R	0	-	-	
51	2	Punch	Punch	RW	32	0	1023	

Figura 30: Tabla de control motor XL-320 [11]

velocidad, torque, temperatura, posición, voltaje, carga, etc. Para poder acceder a cada uno de estas variables, al igual que con el XL-320, se tiene una tabla de funciones [Figura 32] y las respectivas direcciones de memoria, además del rango en el que estas variables pueden ser modificadas.

El algoritmo de control puede ser utilizado para ajustar la respuesta de velocidad y fuerza del motor. Este motor, al igual que el XL-320, funciona con comunicación serial half-duplex de 8 bits, asíncrono con 1 bit de alto y sin paridad, y una conexión por un cable TTL, pero es un protocolo 1.0 a diferencia del 2.0 que utiliza el XL-320. Para poder acceder a los espacios de memoria de este motor se utilizó un Arduino y la librería específica de este motor.

El motor cuenta con dos modos de operación al igual que el motor XL-320.[12]



Figura 31: Motor AX-12A [12]

6.3.3. HS-322HD

Este motor es un servo estándar de trabajo pesado, con un tren de engranes de Karbonite que es un polímero utilizado en motores marca Hitec, los cuales son hasta cuatro veces más fuerte que los engranes convencionales de nylon. Este tipo de engranes pueden hacer hasta cientos de miles de ciclos de trabajo sin desgastarse. [13]

Este tipo de servos funcionan con un motor DC, una caja reductora, un potenciómetro y un circuito de control. Al servo se le manda un pulso de ancho variable, donde el ancho de dicho pulso define la posición al que este se moverá. Se debe mandar un pulso de un periodo de 20ms, y según el ancho del pulso de subida se puede ir desde 0° a 180° , siendo 1ms el mínimo y 2ms el máximo que este acepta. Debido al circuito de control que incluye el servo es que puede ir hacia una posición deseada y ofrecer resistencia al intentar cambiar la posición del servo a la fuerza. Para el movimiento de este motor se utilizó la librería de arduino para control de servos.[13]

6.4. Mecanismos de cuatro barras

Un mecanismo es un dispositivo mecánico que se utiliza para obtener un patrón deseable en base a un movimiento, cuyo fin no es el de transmitir potencia ya que transmite muy poca y maneja fuerzas bajas. Por lo regular una máquina esta compuesta por varios mecanismos distintos.

Depende de la simplicidad del diseño de la máquina a realizar, se puede implementar un mecanismo de cuatro barras. La ventaja de este tipo de mecanismos es que es uno de los más simples posibles de 1 grado de libertad. Este está compuesto, como su nombre lo indica, por cuatro eslabones y cuatro juntas. El tipo convencional de mecanismo de cuatro barras [Figura 34] está compuesto por 4 juntas revolutas, un eslabón que provoca el movimiento, otro que es el eslabón de salida o el que recibe el movimiento, un eslabón superior que interconecta estos dos, y un eslabón fijo el cuál es imaginario y es únicamente la bancada o tierra formada entre la junta del eslabón de movimiento y la junta del eslabón de salida. El otro tipo de mecanismo de cuatro barras es el mecanismo de cuatro barras con juntas de pasador, el cuál tiene una salida que se aproxima muy bien a una línea recta, además es el más simple de los mecanismos con salida en línea recta e 1 grado de libertad que hay. Este mecanismo tiene una junta de corredera en lugar de una revoluta [Figura 35]. [14]

Area	Address (Hexadecimal)	Name	Description	Access	Initial Value (Hexadecimal)
E E P R O M	0 (0X00)	Model Number(L)	Lowest byte of model number	R	12 (0X0C)
	1 (0X01)	Model Number(H)	Highest byte of model number	R	0 (0X00)
	2 (0X02)	Version of Firmware	Information on the version of firmware	R	-
	3 (0X03)	ID	ID of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	4 (0X04)	Baud Rate	Baud Rate of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	5 (0X05)	Return Delay Time	Return Delay Time	RW	250 (0XFA)
	6 (0X06)	CW Angle Limit(L)	Lowest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	7 (0X07)	CW Angle Limit(H)	Highest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	8 (0X08)	CCW Angle Limit(L)	Lowest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	255 (0XFF)
	9 (0X09)	CCW Angle Limit(H)	Highest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	3 (0X03)
	11 (0X0B)	the Highest Limit Temperature	Internal Limit Temperature	RW	70 (0X46)
	12 (0X0C)	the Lowest Limit Voltage	Lowest Limit Voltage	RW	60 (0X3C)
	13 (0X0D)	the Highest Limit Voltage	Highest Limit Voltage	RW	140 (0XBE)
	14 (0X0E)	Max Torque(L)	Lowest byte of Max. Torque	RW	255 (0XFF)
	15 (0X0F)	Max Torque(H)	Highest byte of Max. Torque	RW	3 (0X03)
	16 (0X10)	Status Return Level	Status Return Level	RW	2 (0X02)
	17 (0X11)	Alarm LED	LED for Alarm	RW	36(0x24)
	18 (0X12)	Alarm Shutdown	Shutdown for Alarm	RW	36(0x24)
R A M	24 (0X18)	Torque Enable	Torque On/Off	RW	0 (0X00)
	25 (0X19)	LED	LED On/Off	RW	0 (0X00)
	26 (0X1A)	CW Compliance Margin	CW Compliance margin	RW	1 (0X01)
	27 (0X1B)	CCW Compliance Margin	CCW Compliance margin	RW	1 (0X01)
	28 (0X1C)	CW Compliance Slope	CW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	29 (0X1D)	CCW Compliance Slope	CCW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	30 (0X1E)	Goal Position(L)	Lowest byte of Goal Position	RW	-
	31 (0X1F)	Goal Position(H)	Highest byte of Goal Position	RW	-
	32 (0X20)	Moving Speed(L)	Lowest byte of Moving Speed (Moving Velocity)	RW	-
	33 (0X21)	Moving Speed(H)	Highest byte of Moving Speed (Moving Velocity)	RW	-
	34 (0X22)	Torque Limit(L)	Lowest byte of Torque Limit (Goal Torque)	RW	ADD14
	35 (0X23)	Torque Limit(H)	Highest byte of Torque Limit (Goal Torque)	RW	ADD15
	36 (0X24)	Present Position(L)	Lowest byte of Current Position (Present Velocity)	R	-
	37 (0X25)	Present Position(H)	Highest byte of Current Position (Present Velocity)	R	-
	38 (0X26)	Present Speed(L)	Lowest byte of Current Speed	R	-
	39 (0X27)	Present Speed(H)	Highest byte of Current Speed	R	-
	40 (0X28)	Present Load(L)	Lowest byte of Current Load	R	-
	41 (0X29)	Present Load(H)	Highest byte of Current Load	R	-
	42 (0X2A)	Present Voltage	Current Voltage	R	-
	43 (0X2B)	Present Temperature	Current Temperature	R	-
	44 (0X2C)	Registered	Means if Instruction is registered	R	0 (0X00)
	46 (0X2E)	Moving	Means if there is any movement	R	0 (0X00)
	47 (0X2F)	Lock	Locking EEPROM	RW	0 (0X00)
	48 (0X30)	Punch(L)	Lowest byte of Punch	RW	32 (0X20)
49 (0X31)	Punch(H)	Highest byte of Punch	RW	0 (0X00)	

Figura 32: Tabla de control motor XL-320 [12]



Figura 33: Motor HS-322HD [13]

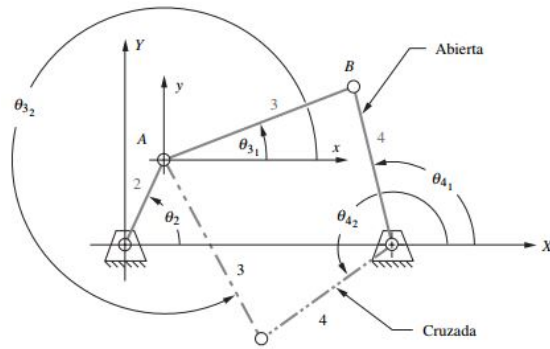


Figura 34: Mecanismo de cuatro barras [14]

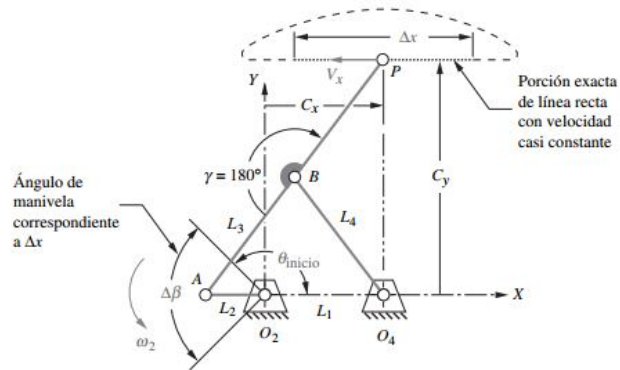


Figura 35: Mecanismo de cuatro barras con junta de pasador [14]

6.5. Materiales

Es necesario considerar tanto los materiales a utilizar en el prototipo como los materiales que podrían ser utilizados para una versión final.

6.5.1. Aluminio AISI 6061-T651

El aluminio es un metal no ferroso muy utilizado en distintas industrias como:

- Construcción
- Transporte
- Moldes de inyección
- Soplado
- Industria alimenticia
- Sector aeroespacial
- Sector médico [15]

Este metal es muy utilizado principalmente por sus características más distintivas que son la baja densidad, bajo peso, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, buena conductividad térmica y eléctrica y excelente maquinabilidad [15].

El aluminio AISI 6061-T651 es un material laminado o extruido aleado al manganeso-silicio, ampliamente utilizado para uso general, en la fabricación de piezas, repuestos o moldes. Es un material fácil de maquinar y se utiliza cuando se desea obtener un bajo peso, y excelentes propiedades mecánicas [Cuadro 1].

Propiedades mecánicas		
Aluminio 6061-T651		
Propiedad @ 20°C	Valor	
Carga de rotura Rm	310	[N/mm ²]
Límite elástico Rp	270	[N/mm ²]
Límite a la fatiga	190	[N/mm ²]
Módulo elástico	70,000	[N/mm ²]
Peso específico	2,70	[g/cm ³]

Cuadro 1: Propiedades del aluminio [15]

6.5.2. Delrin

El delrin está formado por una resina acetálica, y es un termoplástico muy cristalino considerado como un plástico de ingeniería muy versátil con propiedades similares a las de los metales [16].

Este material tiene propiedades positivas [Cuadro 2], como buena estabilidad dimensional, alta dureza, rigidez, resistencia y tenacidad, buena resistencia química y buenas propiedades de deslizamiento y abrasión. Este material puede ser fácilmente maquinado. Las características de este material son:

- Rango de temperatura de trabajo -40°C +90°C.
- Alta resistencia mecánica, rigidez, y dureza.

- Buena resistencia a la fluencia.
- Buenas propiedades de deslizamiento.
- Gran facilidad de mecanización.
- Alta resistencia a los choques[16].

Este material tiene aplicaciones en la fabricación de engranes, bujes, roldanas, tornillos, poleas, entre muchas otras cosas más [16].

Propiedades mecánicas		
Delrin		
Propiedad @ 23°C	Valor	
Resistencia a la tracción	700	[Kg/cm ²]
Resistencia a la compresión	160/300	[Kg/cm ²]
Resistencia a la flexión	1200	[Kg/cm ²]
Módulo elástico	33,000	[Kg/cm ²]
Peso específico	1.42	[g/cm ³]
Coef. de roce estático	0.35-0.45	
Coef. de roce dinámico	0.25-0.4	

Cuadro 2: Propiedades del delrin [16]

Este trabajo de graduación se realizó a lo largo de tres semestres siguiendo el proceso descrito a continuación, iniciando con un proceso de investigación descrito en el Capítulo 6, luego diseñando los mecanismos necesarios para cada uno de los movimientos a replicar, seguido de la manufactura de cada uno de estos mecanismos diseñados. Por último se hizo la realización de un análisis de esfuerzos en los mecanismos realizados para de esta forma darle validación al diseño que se realizó.

- Investigación:

- Principalmente se realizó investigaciones en internet acerca de los movimientos del cuerpo humano que se desean replicar, entendiendo de mejor manera cómo estos funcionan para poder diseñar los mecanismos adecuados.
- También fue necesario investigar acerca de los actuadores que se espera utilizar para tomar en consideración el torque y velocidad con el que se podrá trabajar, además de las corrientes y voltajes.
- Fue necesario, luego de un análisis de esfuerzos, investigar los materiales que logren soportar sin fallar los esfuerzos a los que las piezas de la cabeza estarán sometidas y de esta forma seleccionar lo más adecuado.

- Diseño:

- Ya conociendo los movimientos que se deseaba replicar, se identificó que tipo de mecanismo lograría efectuar dicho movimiento.
- Para cada uno de los mecanismos diseñados se buscó obtener el número de grados de libertad que permitiera el movimiento deseado.
- Identificación de las piezas necesarias para diseñar cada mecanismo (actuadores, materiales y piezas adicionales).

- Manufactura: Se realizó una división de las piezas que pueden ser realizadas por cuenta propia y cuáles deben ser maquinadas o elaboradas por medio de un tercero. Las piezas que se puedan realizar por cuenta propia serán manufacturadas con las herramientas a las que se tiene acceso en la Universidad.
- Análisis:
 - Se analizó los esfuerzos a las que las piezas de los mecanismos estarán sometidas, la cual puede ser realizada por software al tener el diseño en CAD de las piezas.
 - Análisis de las fuerzas que los motores necesitan para mover las piezas de los mecanismos (pesos de las piezas y fuerzas de tensión necesarias para el movimiento).

Luego de haber realizado la investigación preliminar de cada uno de los movimientos que hace la cara, y de conocer los distintos músculos que controlan cada uno de estos movimientos, se realizó el análisis de cada uno de estos para saber la cantidad de actuadores y mecanismos necesarios para emular cada movimiento.

Extrapolando estos mecanismos biológicos a algo mecánico es posible lograr el mismo movimiento utilizando menos actuadores que reemplacen estos músculos, ya que tenemos la posibilidad de simular el movimiento de la contracción del músculo y también se puede relajar o “empujar” en sentido contrario, a diferencia de los músculos que únicamente pueden contraerse.

8.1. Ojos

Es posible realizar estos movimientos similares de contracción de los músculos de los ojos con ayuda de motores servos, uno para el movimiento horizontal y otro para el vertical, que combinados permiten otros movimientos como la rotación y diagonales, teniendo así cada posición deseada.

El ojo humano cuenta con tres grados de libertad respecto a la cabeza, y 6 grados de libertad respecto al espacio. Considerándolo respecto al espacio se tienen 3 grados de libertad relacionados a la rotación y tres grados de libertad de traslación. Para el diseño de los mecanismos se considera únicamente los movimientos respecto a la cabeza ya que los mecanismos de movimiento de ojos estarán de igual forma montados sobre la cabeza, la cuál implementará por aparte su propio mecanismo de movilidad.

Para el movimiento de los ojos se encontró que era necesario implementar mecanismos de

forma que se obtuvieran dos grados de libertad para así lograr los movimientos de rotación del ojo combinando movimientos verticales y horizontales. Los mecanismos que se decidió implementar en los ojos fueron mecanismos de cuatro barras [Sección 6.4] ya que estos permiten un movimiento con una salida de un grado de libertad, por lo que se necesitaría un mecanismo para el movimiento horizontal y otro para el movimiento vertical. Cada uno de estos mecanismos estarán actuados por un motor XL-320.

Se decidió implementar dos mecanismos iguales conectados a un solo motor para el movimiento horizontal de los ojos, reduciendo así el número de actuadores utilizados y por lo tanto el peso total de la cabeza. Para el movimiento vertical sí se implementó un mecanismo independiente para cada uno de los ojos, por lo que se utilizó un actuador para cada uno. En total se necesitaron tres actuadores para replicar los movimientos del ojo, y lograr así los dos grados de libertad deseados.

Para poder asegurar que el ojo se moviera en las dos direcciones deseadas, vertical y horizontal, este se montó sobre una junta universal [Figura 36] el cual es un par cinemático con dos grados de libertad formado por dos horquillas unidas entre sí por una cruz, donde cada horquilla está articulada con cada aspa de la cruz. [17]



Figura 36: Junta Universal [17]

Se diseñó un ojo como el visto en la Figura 37, el cual se hizo en base a las mediciones de un ojo humano adulto promedio [Sección 6.1.1]. No se realizó una esfera completa ya que de uno de los extremos del ojo se fijó hacia la junta universal que serviría de pivote para el movimiento del ojo. Se realizó una figura equivalente a una esfera hueca con un corte transversal en uno de sus extremos, y dentro se colocó un cilindro [Figura 38] el cual sería introducido dentro de una de las horquillas de la junta universal y fijada con un tornillo.

Además se agregaron cuatro agujeros de 2.5mm de diámetro en el extremo donde el ojo estaría pivotado, para de esta forma poder colocarle una de las barras del mecanismo que jalaría o empujaría el ojo para que este se mueva tanto horizontal como verticalmente.

El mecanismo diseñado para el movimiento vertical de los ojos se puede ver en la Figura 39, el cual consta únicamente del motor XL-320, donde su eje de rotación (O_2) está anclado a la bancada que se considera el primer eslabón, una rueda que actúa como el segundo eslabón (O_2A), una barra metálica que va desde dicha rueda hacia el agujero del ojo que sería el tercer eslabón (AB), y desde el ojo que se encuentra fijo a la junta, hasta el eje de rotación



Figura 37: Diseño del ojo

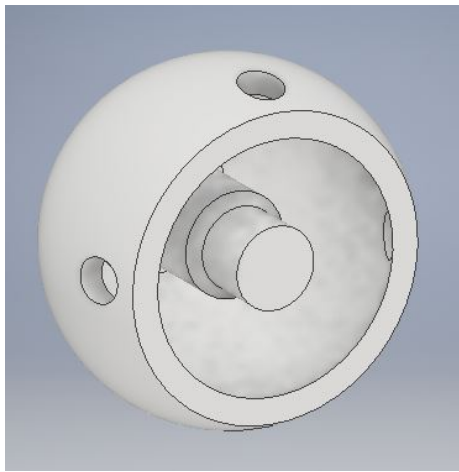


Figura 38: Cilindro del ojo

de la misma (BO_4) se considera como el cuarto eslabón. El punto O_4 también se encuentra anclado a tierra, así que desde el punto O_2 hasta el O_4 es considerada la tierra o bancada. Se colocó la punta del eje como la salida del mecanismo (P).

Para el movimiento horizontal de los ojos se realizó la combinación de dos mecanismos de cuatro barras iguales anclados a un solo actuador como se ve en la Figura 40. Para lograr esto se realizaron dos columnas con un cojinete montado en la parte superior [Figura 41], y a cada uno de estos cojinetes se les colocó una rueda que se encuentra anclada al motor, logrando así tener dos mecanismos actuados respecto al eje de rotación del cojinete ya que estos giraban en conjunto con la rueda del motor XL-320. Cada uno de los mecanismos de cuatro barras utilizados tienen una tierra o bancada O_2O_4 que es el primer eslabón, un segundo eslabón desde el eje de rotación del cojinete hasta la rueda donde se ancla la barra (O_2A), el tercer eslabón que es la barra que jala o empuja el ojo (AB) y por último el cuarto eslabón BO_4 que va desde el ojo hasta el eje de rotación de la junta universal.

Para lograr mantener el ojo pivotado correctamente y lograr así moverlo era necesario que el otro extremo de la junta universal se mantuviera fijo, por lo que se diseñó una pequeña pieza con un cilindro que sale del mismo para poder introducirlo en el otro extremo de la

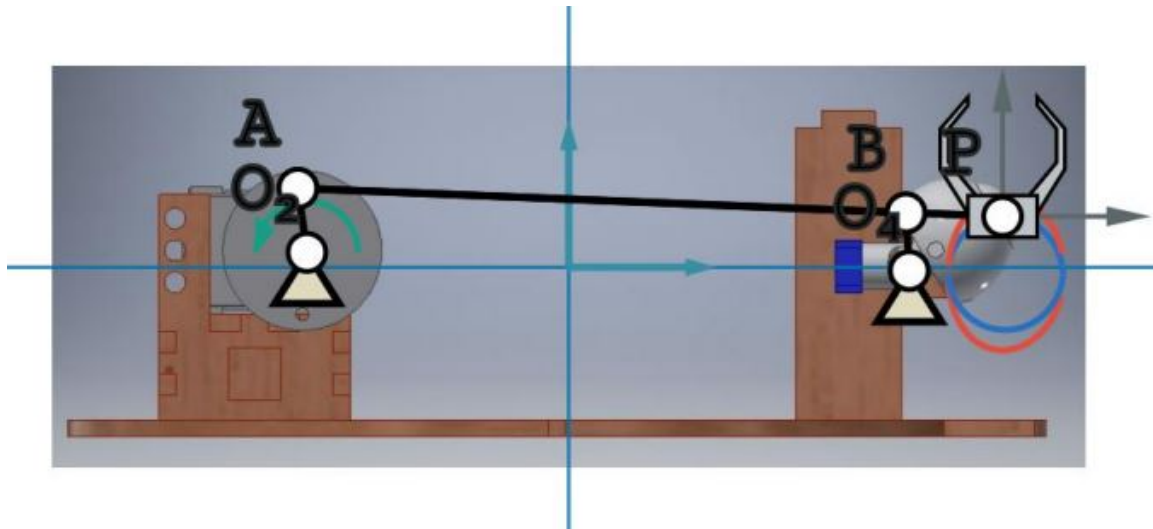


Figura 39: Mecanismo de movimiento vertical de ojos

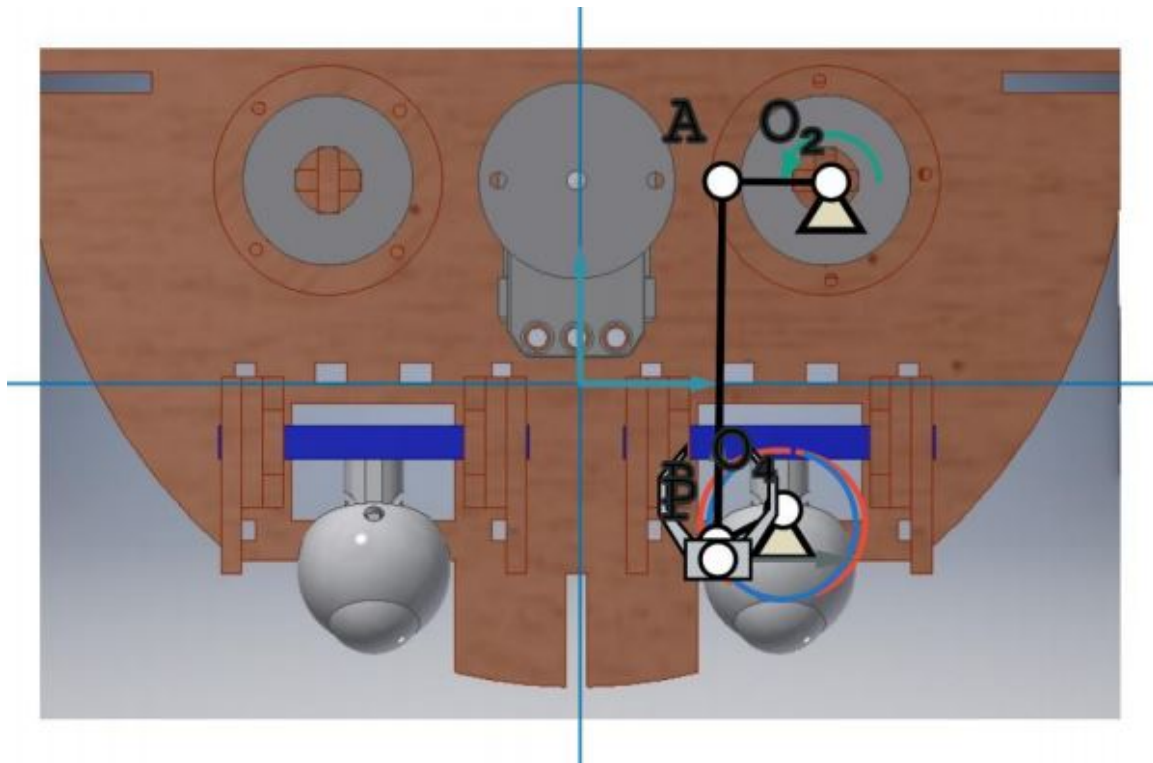


Figura 40: Mecanismo de movimiento horizontal de ojos

junta universal. Esta pieza diseñada se fijó a dos columnas que se encuentran ancladas a la cabeza [Figura 42].

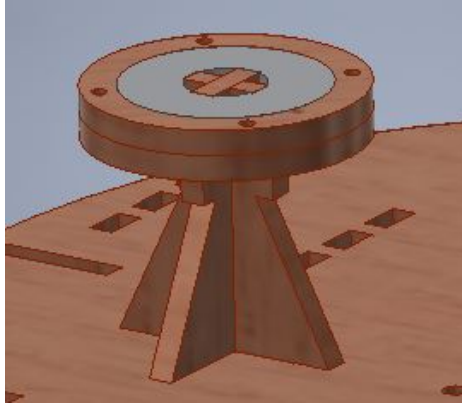


Figura 41: Columna con cojinete para ojos

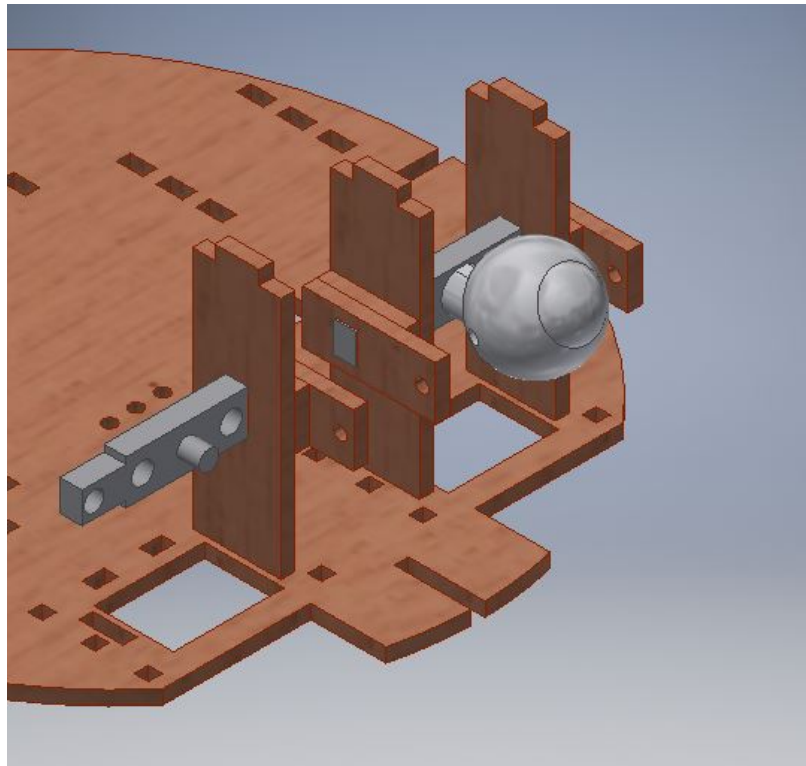


Figura 42: Ojo montados sobre base

8.2. Párpados

Para el parpadeo únicamente se necesita un motor servo XL-320 por cada ojo, que con ayuda de un mecanismo logre cerrar y abrir los párpados. Para lograr tener más realismo a este movimiento se debe incluir un movimiento de seguimiento del ojo, es decir, si el ojo ve hacia arriba el párpado superior se abrirá más, y de voltear a ver hacia abajo se cerrará un poco, siguiendo el ojo, sin embargo esta consideración no es parte del diseño mecánico.

Para poder abrir y cerrar los párpados se decidió que era necesario implementar nuevamente un mecanismo de cuatro barras, ya que únicamente se desea un grado de libertad, el

cual es la rotación del párpado respecto a un eje. Se implementó un mecanismo similar al utilizado para el movimiento vertical de los ojos, resultando en el mecanismo que se ve en la Figura 43.

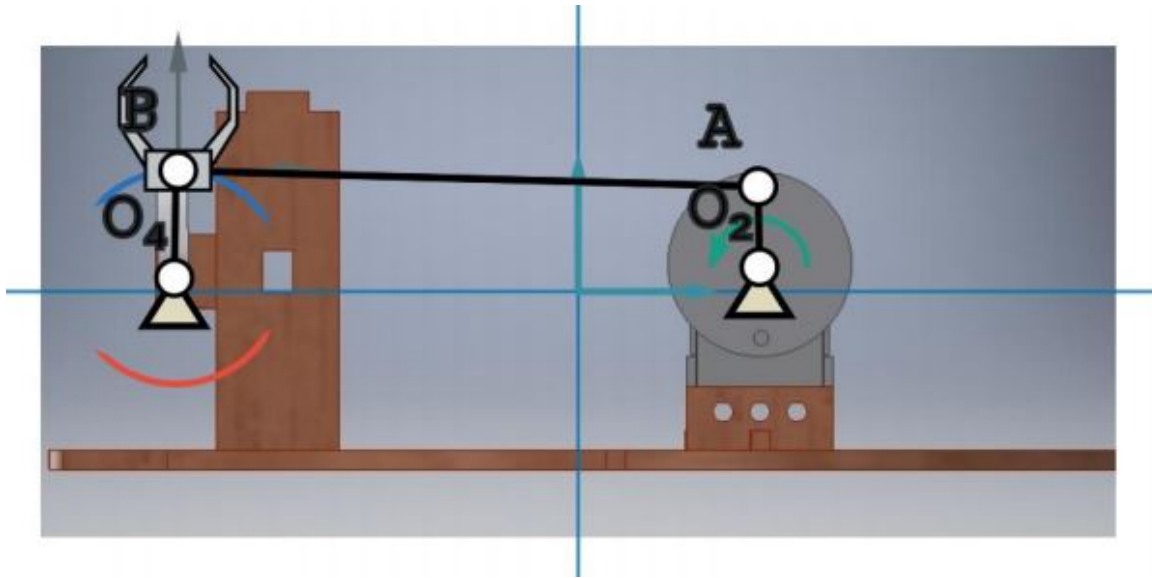


Figura 43: Mecanismo para parpadeo

Se diseñó un párpado como el que se ve en la Figura 44, el cual tiene cuatro agujeros. Dos de los agujeros están diseñados para montar el párpado sobre un eje de rotación (O_4), y cualquiera de los otros dos es para anclar la barra que se encuentra anclada al motor (AB). Los otros dos eslabones son la bancada (O_2O_4) y la rueda montada sobre el motor (O_2A). Las dimensiones de este párpado se hicieron de forma que fuera más grande que el ojo, para que al momento en el que este rote no colisione con el ojo. Se implementó únicamente el párpado superior ya que este es el que tiene la movilidad más importante y notoria al parpadear, y se consideró un párpado tan delgado ya que este no pretende cubrir todo el ojo, sino que únicamente moverá la piel del párpado que se colocaría encima del mismo.

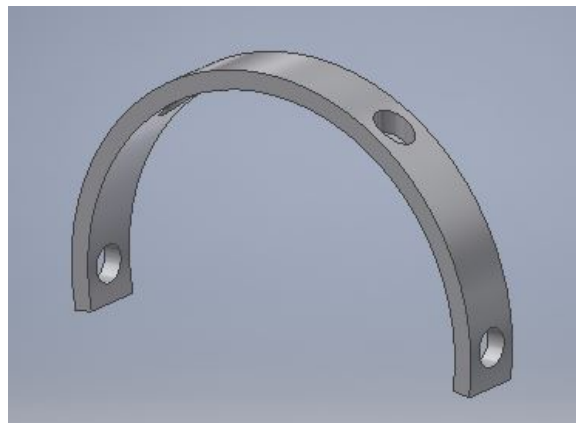


Figura 44: Párpado diseñado

8.3. Cejas

Este movimiento es posible con un motor servo XL-320 por cada ceja, con ayuda de un mecanismo de barras que adjunta la ceja al motor. Al igual que los demás mecanismos de barras implementados donde todos eran de cuatro barras y cada una de ellas se encontraba articulada, en este caso, se estableció que eso era lo que se requería para este movimiento y así obtener una salida de un grado de libertad dada por la rotación de la ceja respecto a un eje. El mecanismo [Figura 45] está conformado por la rueda montada sobre el motor (O_2A), la barra que va desde la rueda hacia la ceja (AB), la distancia desde el agujero que tiene la ceja [Figura 46] hasta su eje de rotación (BO_4) y la bancada (O_2O_4). Las dimensiones de la ceja diseñada fueron en base a mediciones de mi propia ceja.

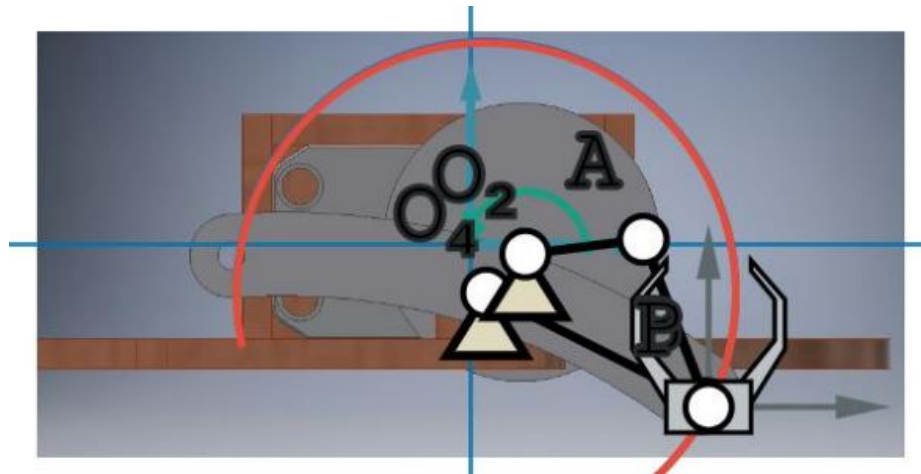


Figura 45: Mecanismos de cejas

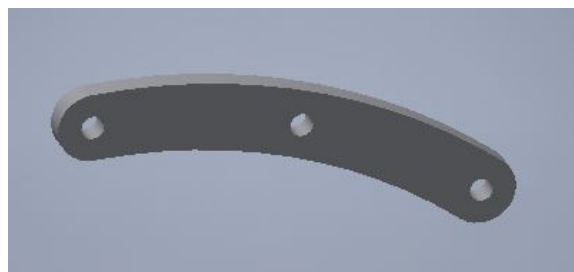


Figura 46: Párpado diseñado

8.4. Sonrisa

De igual forma que para el mecanismo de las cejas, se utilizarán dos motores servos XL-320 para realizar el movimiento de la sonrisa, logrando así darle mayor expresión al rostro y por lo tanto más realismo. Estos simplemente se colocan a la altura de los pómulos, y al moverlos simulan la contracción de los músculos faciales que logran la sonrisa. Simulará un movimiento que sea la combinación de los músculos cigomáticos y risorios. El mecanismo

que se implementará [Figura 47] tendrá únicamente un grado de libertad, que será dado por la pura rotación del motor.

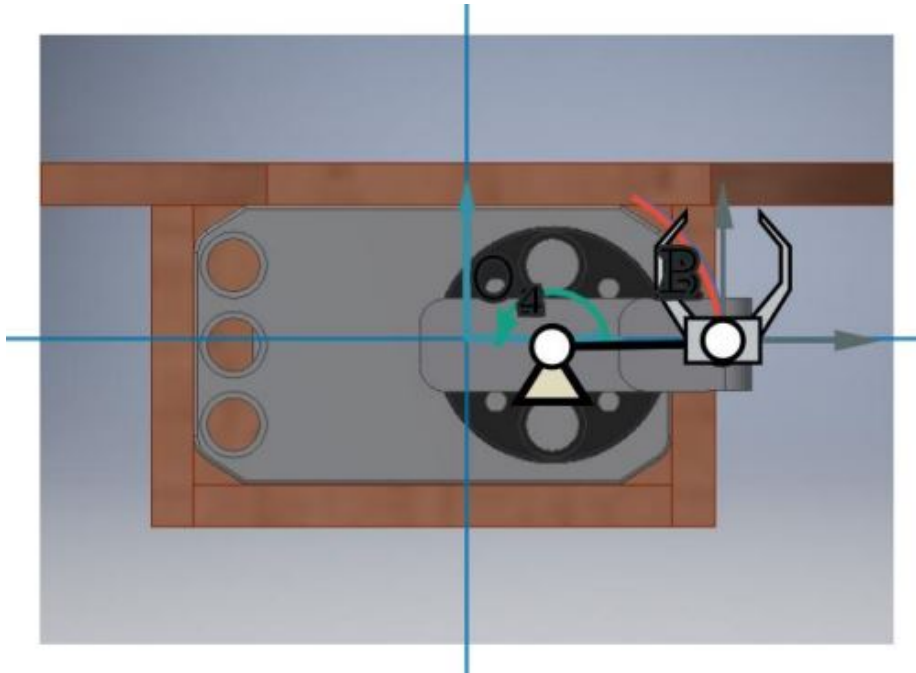


Figura 47: Mecanismo sonrisa

Se diseñó una estructura capaz de contener el motor XL-320 a la altura deseada, y un efector final [Figura 48] que pueda montarse sobre el motor y tenga un extremo que al girar pueda ser capaz de jalar la piel que tendría encima y así simular la sonrisa.

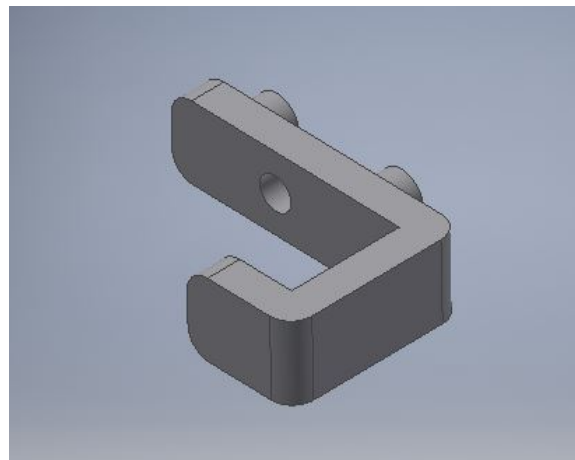


Figura 48: Polea para sonreír

8.5. Boca

El mecanismo utilizado para la boca es únicamente para abrirla y cerrarla, simulando el movimiento que tiene la mandíbula humana, con la singularidad de que se tiene únicamente un grado de libertad ya que no se realizará el movimiento horizontal de la mandíbula. Para esto se utilizará un solo motor servo de alto torque Hitec HS-322HD y un mecanismo de cuatro barras.

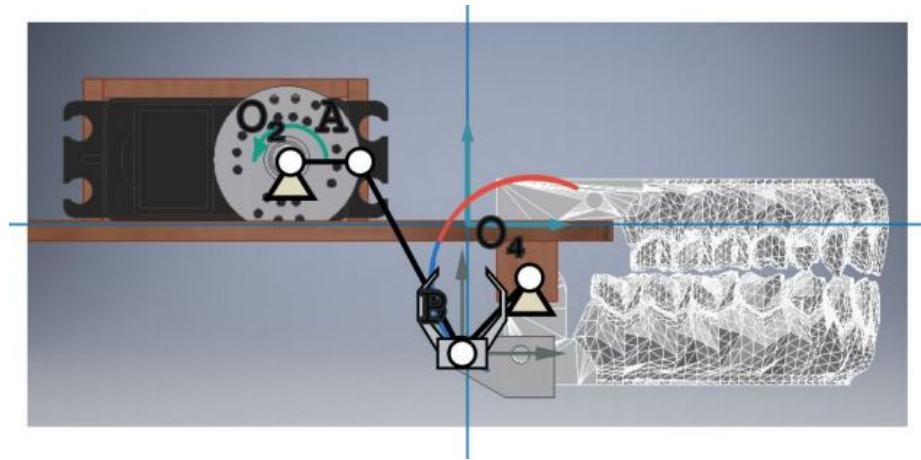


Figura 49: Mecanismo boca

Para diseñar el mecanismo de cuatro barras utilizado [Figura 49], fue necesario tener el motor en un punto fijo, y la mandíbula o parte inferior de la boca montada sobre un eje en su parte trasera para de esta forma poder girar sobre el mismo y lograr el movimiento de abrir y cerrar la boca. Además, era necesario poder acoplar la boca a una barra AB , para que esta barra sea la que eleve un extremo de la boca. Al elevar este extremo de la boca, esta rotaría alrededor de su eje, abriéndose respecto a la otra parte de la boca que se encuentra fija. Se diseñó una pieza que estuviera anclada a la boca [Figura 50], pero que a la vez esta tuviera un pivote que se encontrara fuera de la boca, para así lograr rotarla sobre su eje y para poder realizar la unión entre la boca (BO_4) y la rueda del motor (O_2A).

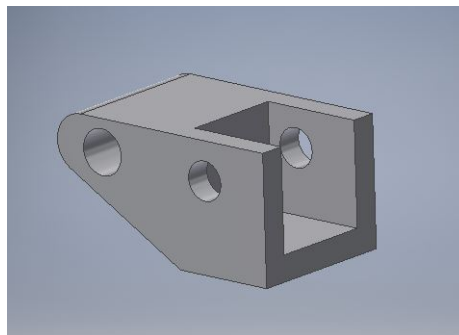


Figura 50: Pieza para mover la boca

8.6. Cuello

El mecanismo el cuello es más complejo que los anteriores, ya que estos soportan cargas mayores al necesitar mover el peso de la cabeza completa con todos los otros motores y cualquier parte adicional como el cráneo y la piel. Para esto se utilizarán tres motores servo de alto torque AX-12A, dos de los cuales logran el movimiento libre de la cabeza en todas las direcciones que la cabeza humana puede, flexión, extensión y otro motor encargado de la rotación de la cabeza. Este diseño implementará 3 distintos mecanismos de 1 grado de libertad cada uno, dándole así una movilidad con 3 grados de libertad a la cabeza montada sobre el cuello. Se necesita un grado de libertad para la flexión y extensión [Sección 6.1.6], otro para la flexión lateral, y otro para la rotación.

Se identificó que para la rotación del cuello se utilizaría un solo motor AX-12A, y se lograría montando toda la cabeza con sus mecanismos sobre el eje de rotación del AX-12A, así que la rotación de la cabeza iría junto a la rotación del motor. Para esto se diseñó una pieza [51] donde iría montado el resto de mecanismos del cuello que soportan la cabeza, además de cuatro agujeros los cuales cumplen con la función de poder atornillar dicha pieza con el motor encargado de la rotación.

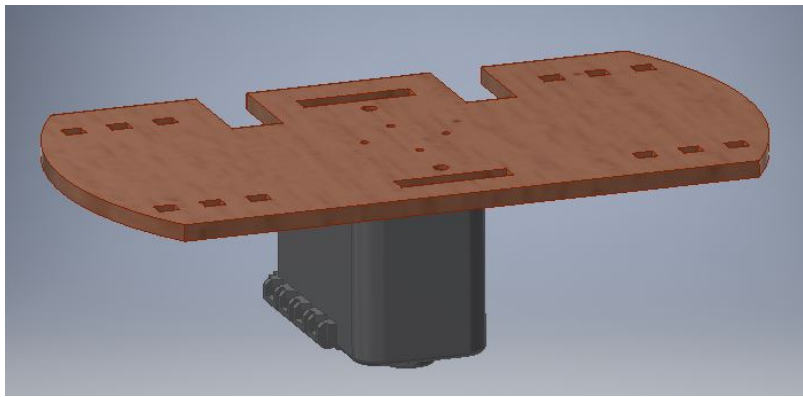


Figura 51: Base de rotación del cuello

Además del mecanismo de rotación del cuello se implementaron dos mecanismos de cuatro barras para lograr el movimiento libre de la cabeza. Ya que cada uno de estos mecanismos posee un grado de libertad, se logra un total de dos grados de libertad para la cabeza. La cabeza se encuentra anclada a una base [Figura 52] que funciona como el cuello, que a su vez se encuentra anclada a una junta universal [Figura 53] diseñada especialmente para soportar el peso de la cabeza, y como se mencionó en la Sección 8.1, estas juntas cuentan con dos grados de libertad. El otro extremo de esta junta está incrustada sobre una pieza cilíndrica que a la vez esta sobre una columna que se coloca encima de la base del cuello [Figura 51] y se sujeta con dos tornillos. Para la misma base, se diseñaron dos estructuras que van sobre dicha base para sujetar los motores AX-12A que actuarán los mecanismos de cuatro barras que mueven la cabeza.

La base donde está montada la cabeza está articulada gracias a la junta universal que se encuentra al centro de la base, para girar alrededor de este punto. Para poder mover esta base respecto a este pivote se le colocaron dos agujeros en cada uno de los extremos laterales, puntos en los que se anclaría una barra (AB) que movería la base hacia arriba o

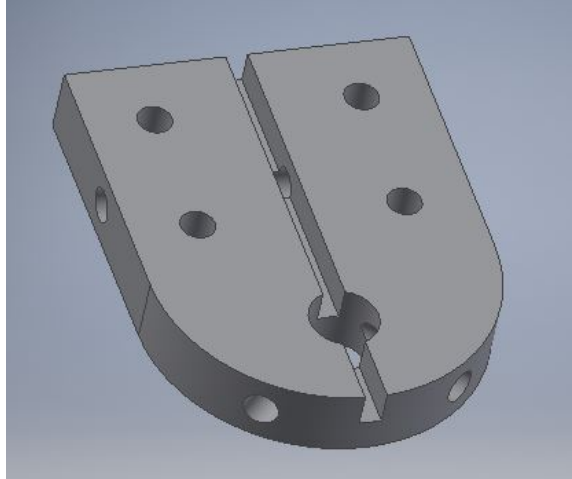


Figura 52: Base para montar cabeza

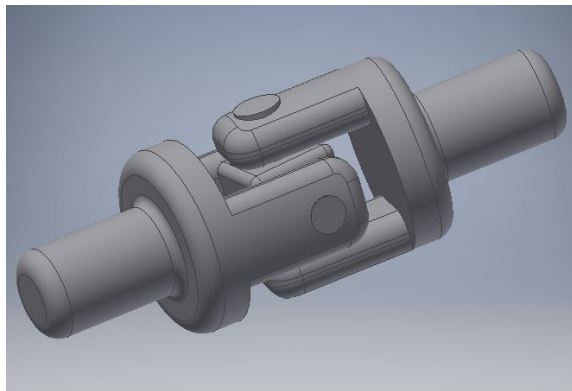


Figura 53: Junta universal para cuello

hacia abajo al mover el eslabón conectado al motor (O_2A). Este mecanismo [Figura 54] está conformado por el eslabón montado sobre el motor (O_2A), la barra que conecta dicha pieza con la base de la cabeza (AB), un tercer eslabón que va desde donde se une la barra AB hasta el pivote de la junta universal (BO_4) y la tierra o bancada (O_2O_4). De tener uno solo de estos mecanismos se conseguiría un solo grado de libertad para toda la cabeza, obteniendo un movimiento en el que la cabeza se haría hacia adelante y hacia atrás en una diagonal respecto al eje vertical del cuello. Por lo mismo se necesita otro mecanismo igual para darle ese otro grado de libertad que la cabeza necesita, y así al combinar ambos movimientos se lograría el movimiento libre de la cabeza.

8.7. Selección de actuadores

Al haber decidido los tipos de mecanismos y cantidad de actuadores necesarios se procede a seleccionar los actuadores adecuados para cada uno de los mecanismos, basándose en la velocidad, torque y en la disponibilidad de actuadores en el departamento. Las propiedades técnicas de cada uno de los motores se incluyen a continuación.

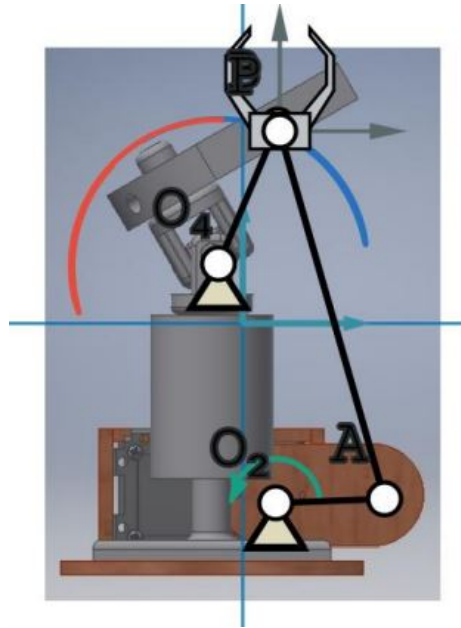


Figura 54: Mecanismo para flexión, extensión y flexión lateral de cuello

8.7.1. Dynamixel XL-320 [6.3.1]

- Velocidad: 114 RPM
- Torque: 0.39 Nm @ 7.4V
- Función: Ojos, cejas, sonrisa y párpados
- Cantidad: 9

8.7.2. Dynamixel AX-12A [6.3.2]

- Velocidad: 59 RPM
- Torque: 1.5 Nm @ 12V
- Función: Cuello
- Cantidad: 3

8.7.3. Hitec HS-322HD [6.3.3]

- Velocidad: 0.15s/60° @ 6V
- Torque: 3.7kg/cm @ 6V
- Función: Boca
- Cantidad: 1

Luego de haber diseñado cada uno de los mecanismos necesarios se prosiguió con la manufactura de cada uno de ellos. Para realizar el prototipo se tomó principalmente en consideración las herramientas que se encontrasen disponibles a mi alcance, en especial aquellas dentro de la Universidad del Valle de Guatemala. Por lo mismo se escogió una estructura a base de MDF de 3.2mm cortado en láser, y piezas impresas en 3D, específicamente en PLA.

9.1. Cortado láser en MDF

Ya que se tenían diseñados los mecanismos para cada uno de los movimientos era necesario crear una estructura donde estos estuviesen montados, además de los actuadores y toda la estructura. La estructura donde todo estaría montado sería la misma de la cabeza por lo que fue necesario tomar mediciones de una cabeza humana para poder estimar las dimensiones requeridas. Para poder tomar estas mediciones adecuadamente se siguió un manual de antropometría. Las dimensiones de interés fueron las de anchura [Figura 55], altura [Figura 56] y largura [Figura 60] de la cabeza. La anchura de la cabeza se mide de un extremo lateral de la cabeza hasta el otro extremo, midiendo por encima de la pabellón auricular. La altura se mide desde el mentón o el límite inferior de la cabeza hasta la parte superior más prominente. La largura es la distancia es la horizontal desde la frente hasta el punto más prominente de la parte trasera de la cabeza, el occipucio. [18]

Ya con estas dimensiones se diseñó una estructura para la cabeza, la cual tendría forma elíptica tanto vista de perfil como vista desde arriba. Esta estructura está conformada por tres niveles unidos por el medio por dos estructuras verticales, una en la parte frontal y otra en la parte trasera. Cada uno de estos niveles está diseñado para sostener los distintos mecanismos y actuadores. El nivel superior para las cejas, el intermedio para los ojos, párpados y sonrisa, y el inferior para la boca. Debido a que cada uno de estos niveles se encontraba

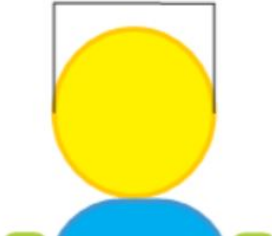


Figura 55: Anchura de la cabeza

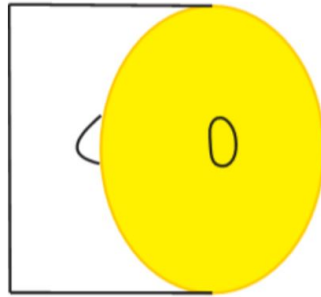


Figura 56: Altura de la cabeza

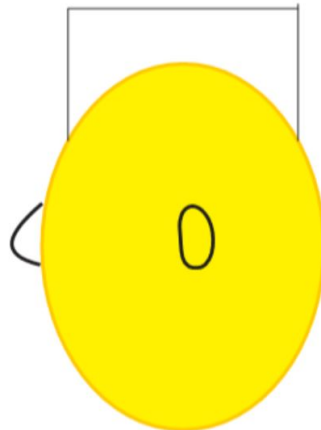


Figura 57: Largura de la cabeza

sujeto únicamente desde el centro, fue necesario la incorporación de columnas laterales para darle estabilidad a esta estructura, además de cuatro columnas en la parte del frente las cuales además de darle estabilidad a la cabeza sirven para poder fijar los ojos a la cabeza.

Además de la estructura principal de la cabeza se diseñaron distintas bases y cajas para sujetar cada uno de los motores a la cabeza.

Para los XL-320 encargados del movimiento vertical de los ojos era necesario realizar una estructura que lo elevara a un mismo nivel que el punto superior del ojo. Esta estructura es similar a una caja con una pestaña que sale de la parte superior, y esta tiene tres agujeros

para poder fijar los motores con tornillos a esta base. Se utilizaron tornillos de 4mm de diámetro por 30mm de largo.

Para anclar el XL-320 encargado del movimiento horizontal de los ojos a la cabeza, se agregaron tres agujeros en el segundo nivel de la cabeza, donde con tornillos de 4mm por 30mm de largo, se sujetaría el motor. A ambos lados de este motor se encuentran dos columnas también cortadas en láser sobre las cuales están montados los cojinetes. Sobre estos cojinetes se montaron dos anillos también de MDF cuya función es el ser un eslabón en el mecanismo de cuatro barras que mueven el ojo horizontalmente.

Otra base que se realizó fue la de los XL-320 de los párpados. Era necesario realizar esta base debido a que se necesitaba colocar este motor en posición vertical, de manera que no había forma de sujetarlo directamente. Se hizo una base con tres agujeros para atornillar el motor con tres agujeros de 4mm por 30mm de largo.

Para los motores de la sonrisa y de las cejas se diseñó una misma estructura para sujetar el motor. Se realizó una caja completa que contuviera al motor, y que tuviera un extremo libre para la salida del motor, y otro para poder anclarla a su respectiva superficie.

De manera similar a las cajas diseñadas para los XL-320, se diseñó una caja para poder sujetar los motores AX-12A a su respectiva base. Además, se realizó un eslabón que serviría como efector del AX-12A, teniendo un agujero para colocar la barra que acciona el mecanismo, y otros cuatro agujeros para poder anclar la pieza al motor.

La columna vertical trasera de la cabeza cuenta con una ranura para introducir una pieza de MDF que estará unida a la base del cuello por medio de cuatro tornillos. Esta pieza será la principal unión entre la cabeza y el cuello.

Otra pieza realizada en MDF fue la base rotatoria del cuello sobre la cual se encuentra montada la estructura del cuello/cabeza, y los mecanismos del cuello. Esta pieza es simétrica para que su centro de gravedad se mantenga en el mismo eje de rotación. Se colocaron cuatro agujeros para atornillarla al motor AX-12A encargado de la rotación del cuello. Además de otros dos agujeros para sujetar la columna que sujeta la cabeza, la cual además de los tornillos cuenta dos extremos que ingresan en las ranuras realizadas a la base. También se cuenta con ranuras para poder colocar las cajas de los AX-12A.

Por último se realizó una caja para el motor AX-12A encargado de la rotación, distinto a la hecha para el otro par de AX-12A. Esta sería para sostener al motor con su eje viendo hacia arriba, y para poder acoplarse a una plancha grande de MDF que le serviría como una base con un gran área de soporte para poder mantener la cabeza fija en una mesa. o cualquier otra superficie plana.

El nivel superior de la cabeza se realizó de forma elíptica al igual que los otros dos. Esta pieza contiene los agujeros necesarios para colocar las cajas de los XL-320 de las cejas, además de una pequeña pieza de MDF que sirve para montar el eje de rotación de la ceja. Para tratar de eliminar la mayor cantidad de peso posible, se realizaron agujeros en toda la pieza dónde no fuera necesario el material. Además cuenta con dos ranuras laterales dónde ingresan las columnas estabilizadoras de la cabeza, y cuatro ranuras frontales dónde entran las columnas frontales. Se realizó un par de versiones hasta conseguir la pieza como se deseaba [Figura 58].

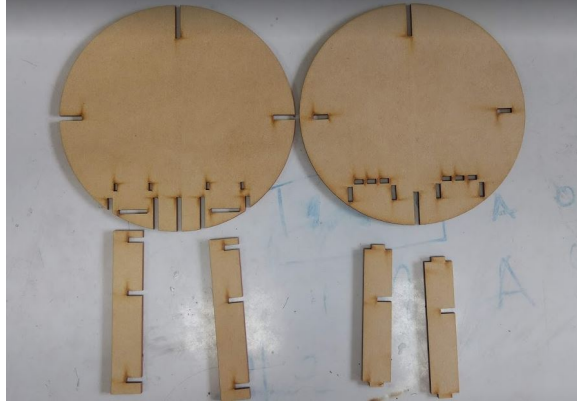


Figura 58: Revisiones estructura nivel superior

El nivel intermedio cuenta con las ranuras para su jetar las cajas de los XL-320 del movimiento vertical de los ojos, las bases de los motores de los párpados, las columnas donde se montan los cojinetes del movimiento horizontal de los ojos, el motor que acciona dicho movimiento y las columnas de sujeción laterales y frontales. Además cuenta con la ranura para las cajas de los motores utilizados para la sonrisa. Esta pieza tuvo varias revisiones como se puede ver en la Figura 59.

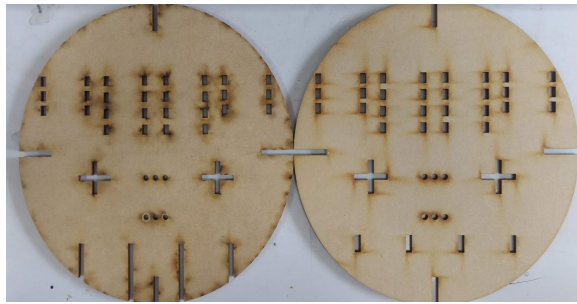


Figura 59: Revisiones nivel medio de estructura

El nivel inferior era el encargado de contener las ranuras relacionadas al mecanismo de apertura y cierre de boca. Se agregaron ranuras para la caja del motor HS-322HD, para la barra del mecanismo de la boca, para las bases donde iría montado el eje de rotación de la mandíbula y para la sujeción de las columnas laterales de la estructura.

9.2. Impresión 3D utilizando PLA

La impresión 3D fue utilizada para aquellas piezas que tuvieran una geometría un poco más compleja y que no se pudiera realizar en MDF cortado en láser. Todas las piezas impresas fueron impresas en PLA a excepción de las cejas.

Las primeras piezas que se realizaron fueron los ojos y la base donde estos estarían montados. Para la manufactura de los ojos se realizó una impresión con PLA de color blanco, y se colocó material de soporte con el mismo PLA para garantizar que se fabricara correctamente la impresión, en especial se colocó material de soporte en el área de los agujeros

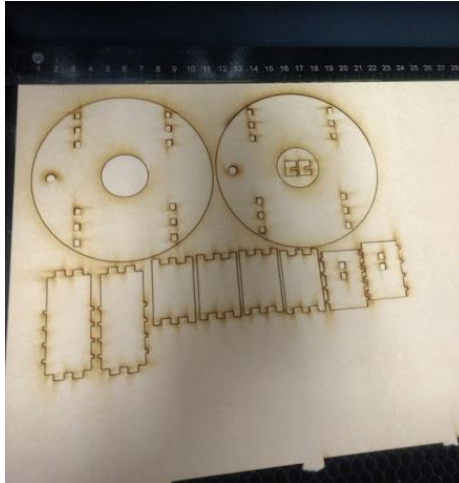


Figura 60: Corte en láser

del ojo donde se sujeta la barra, y en el interior del mismo para que no se cayera el material debido a la curvatura que el ojo tiene. Se realizaron varios ojos debido a que estos sufrían la posibilidad de romperse al momento de ensamblarse. La base donde se monta la junta universal del ojo se realizó con PLA azul, y esta se imprimió sin mayor dificultad ya que no contaba con geometrías muy complejas. Además de los ojos se imprimieron los párpados, los cuales se hicieron con material de soporte debido a los agujeros que estos tienen, y se imprimieron con PLA color amarillo.

Debido a que no era posible acoplar directamente al motor ningún tipo de barra o eslabón, era necesario diseñar una pieza que se montara encima del motor, y que contara con agujeros del tamaño requerido para introducir las barras deseadas. Esta pieza tiene forma circular y cuenta con cuatro cilindros que salen de si misma, los cuales entran sin ningún tipo de juego en la rueda que ya incluye los XL-320. Se imprimieron estas ruedas para los motores utilizados en los mecanismos de los ojos, párpados y cejas. Se realizaron en PLA color plateado.

Otras piezas que fueron impresas en 3D fueron los eslabones diseñados para la sonrisa. Estas se realizaron con material de soporte ya que era necesario debido a que los cilindros que se introducen en el motor quedaban en el aire. Estas piezas fueron realizadas con PLA color plateado.

Se mencionó en la Sección 8.5 que se había diseñado una pieza para poder anclar la boca a la barra que actúa el mecanismo. Esta pequeña pieza fue impresa en 3D, al igual que la boca completa. La boca se encuentra dividida en dos partes. Se le colocó material de soporte a dicha impresión debido a los agujeros donde pasaría el eje de rotación de la parte inferior de la boca.

En la parte del cuello fueron impresas varias partes para poder anclar la cabeza a los respectivos mecanismos del cuello. Para empezar se imprimió una base donde con ayuda de tornillos y una pequeña pieza de MDF se acoplaría la cabeza en su totalidad. Esta base se encuentra pivotada por una junta universal igualmente impresa en 3D. Una de las horquillas de la junta se introduce en la base del cuello, y la otra se coloca en un cilindro con un

agujero pasado que servirá como unión entre la junta y el resto del cuello. Del otro lado de este cilindro se introdujo una columna cilíndrica, cuya base es rectangular y en cada uno de los extremos de dicha base se tiene una pestaña que entra en la base de rotación del cuello.

Las cejas también fueron hechas con impresión 3D, sin embargo, estas se imprimieron en policarbonato en vez de PLA. Esto no se debió a ningún requerimiento de diseño, fue debido a la disponibilidad de equipo y material al momento de fabricar dichas piezas.

9.3. Ensamble de las piezas

Luego de haber cortado en láser e impreso en 3D todas las piezas necesarias se llevo un proceso de ensamblaje, donde cada una de las piezas diseñadas debía encajar con su lugar correspondiente. Se tuvo varias correcciones de diseño debido a errores encontrados al momento de ensamblar las piezas, errores que no se habían logrado identificar en la etapa de diseño.

Para el ensamblaje se dividió por módulos distintas partes de la cabeza, facilitando así el unir la cabeza en su totalidad posteriormente.

Cada uno de los niveles de la cabeza se armó por separado. Primero se ensambló el nivel intermedio. Se colocaron los ojos sobre una de las horquillas de la junta universal con ayuda de un tornillo incorporado en la junta, y se unió la otra horquilla al cilindro de la base de los ojos. Esta base se introdujo en los agujeros de las columnas frontales de la cabeza dejando ya completo todo lo relacionado con el ojo como tal. Luego se armaron las distintas bases de los motores de los ojos y párpados y se unieron a la base que es el nivel intermedio. Luego de haber montado los motores se prosiguió a colocar las barras desde los actuadores, hasta su respectivo lugar de salida, ya sean los ojos o los párpados. Los párpados por su parte se colocaron montados sobre un eje rotatorio acoplado a un agujero en una de las pestañas salientes de las columnas frontales.

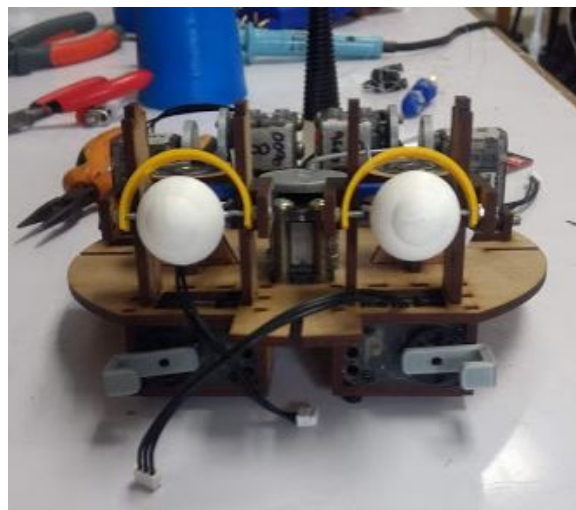


Figura 61: Ensamblaje del nivel medio

Para el nivel de las cejas, dígame el nivel superior, se colocaron los respectivos motores

XL-320 dentro de sus cajas, las cuales se unieron en dicha base. Además se colocó la pieza que serviría como el agujero para el pivote de la ceja. Luego sobre dicho agujero se montó un eje de rotación, y sobre este la ceja siendo pivotado por un agujero en su centro. Luego se colocó la barra que uniría cada motor XL-320 con su respectiva ceja.



Figura 62: Ensamblaje del nivel superior

Para el nivel inferior se colocó la caja con su motor HS-322HD dentro, fijando así dicho motor a la base. Además, se introdujo la parte superior de los dientes en los agujeros donde quedaría fijo. Se montaron dos piezas con un agujero al centro por donde pasaría el eje de rotación sobre el cual estaría pivotada la parte inferior de la boca. De igual forma se colocó la pequeña pieza que une la boca con una barra al motor. Para terminar se colocó la barra que une la boca con el motor HS-322HD la cual cuenta con un "rod-end" en cada uno de sus extremos para ayudar con el movimiento de la articulación.

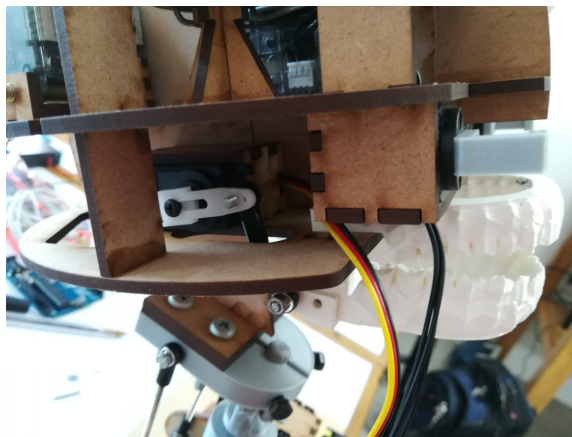


Figura 63: Ensamblaje del nivel inferior

Al tener cada uno de los tres niveles armados de forma independiente, se unieron entre sí por medio de las columnas laterales, las columnas frontales, y las secciones verticales que sujetan a cada uno de los niveles en su lugar. En la parte trasera de una de estas secciones verticales que sujetan la cabeza se colocó la pieza de MDF que iría anclada a la base del cuello, y se unieron ambas piezas con sus respectivos tornillos.

Antes de realizar esta unión entre la cabeza y el cuello fue necesario armar los mecanismos

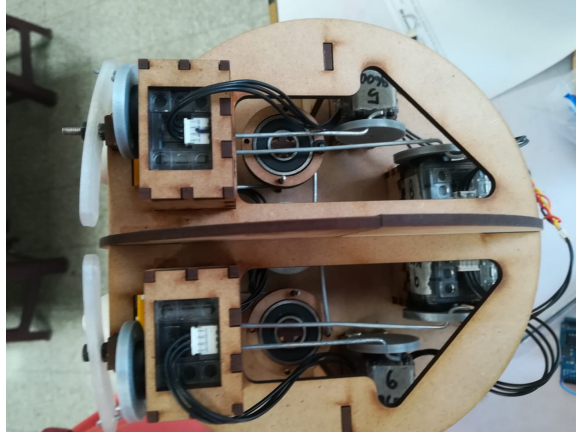


Figura 64: Cabeza vista superior

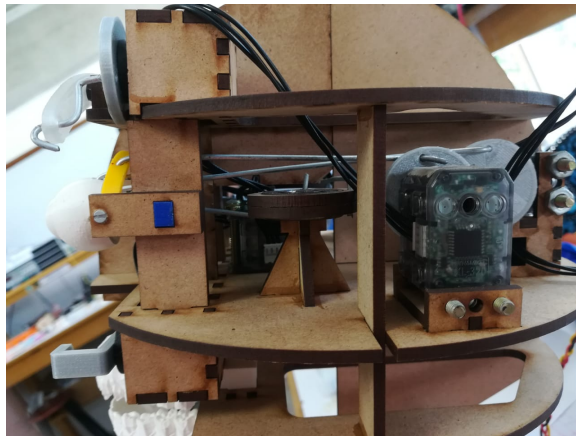


Figura 65: Cabeza vista lateral

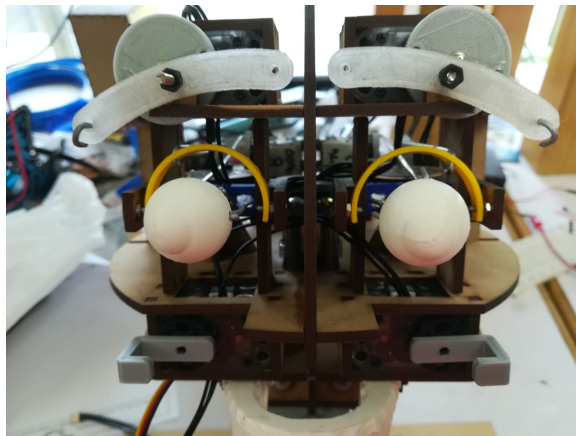


Figura 66: Cabeza vista frontal

del cuello por aparte, de igual forma que se hizo con cada módulo de la cabeza. Para empezar se armó la junta universal ya que esta fue impresa en varias partes. Luego una de las horquillas se metió a presión a la base del cuello y la otra se introdujo en el cilindro que va hacia la columna del cuello. Esta columna se inserta en el otro extremo del cilindro,

y luego la base de esta columna ingresa a presión en la base rotatoria del cuello hecha en MDF, la cual además prescinde de unos tornillos para asegurar la sujeción.

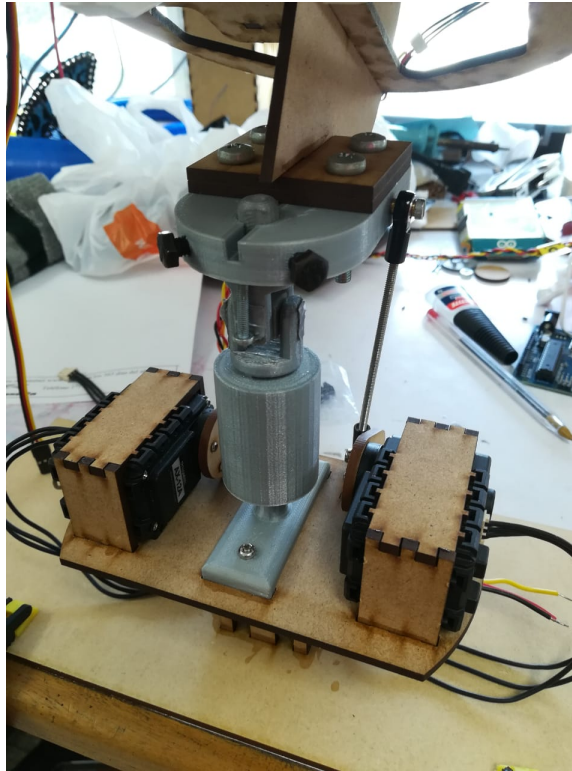


Figura 67: Cuello fabricado

Se realizaron las cajas de los motores AX-12A y se montaron encima de la base rotacional del cuello. Luego se acopló cada motor con barra hacia la base del cuello, dejando estos dos mecanismos finalizados. Por último se colocó el motor de rotación del cuello atornillado a la base de rotación.

Al ya tener el cuello y la cabeza completa e independientemente armados, se prosiguió con la unión entre ambas partes.

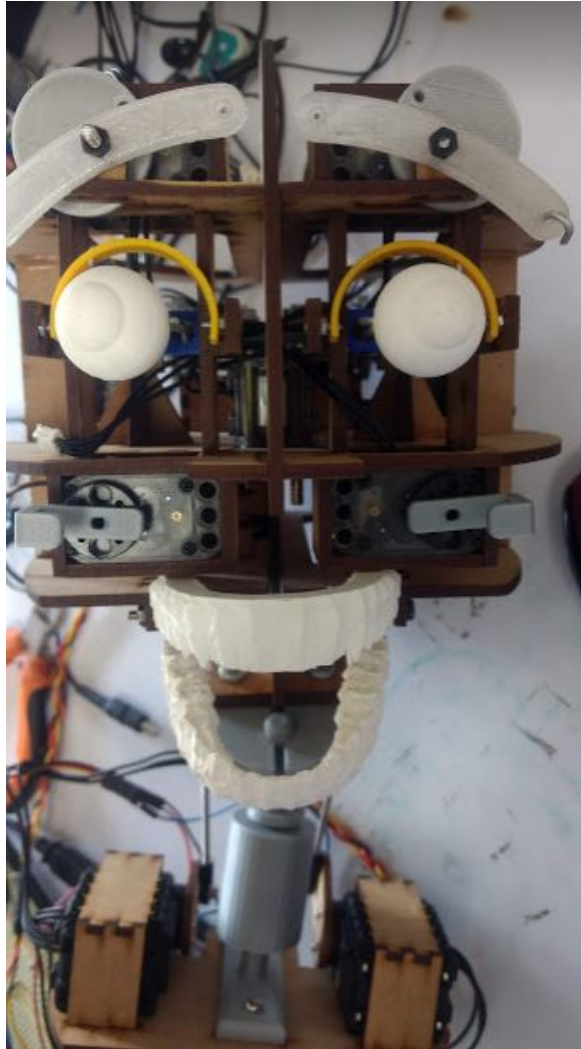


Figura 68: Cabeza armada

Los siguientes análisis de esfuerzos para cada una de las piezas de interés se realizaron considerando los torques máximos que los motores pueden proporcionar.

10.1. Aluminio

Se realizó el análisis de esfuerzo para piezas de aluminio y se obtuvo los siguientes resultados donde se puede apreciar que aún aplicando los torques máximos que los motores pueden dar no se ve afectada la estructura debido a que los esfuerzos son muy pequeños. En cada uno de los casos se obtuvo un factor de seguridad de 15 lo cual es muy alto y garantiza que la estructura no falla.

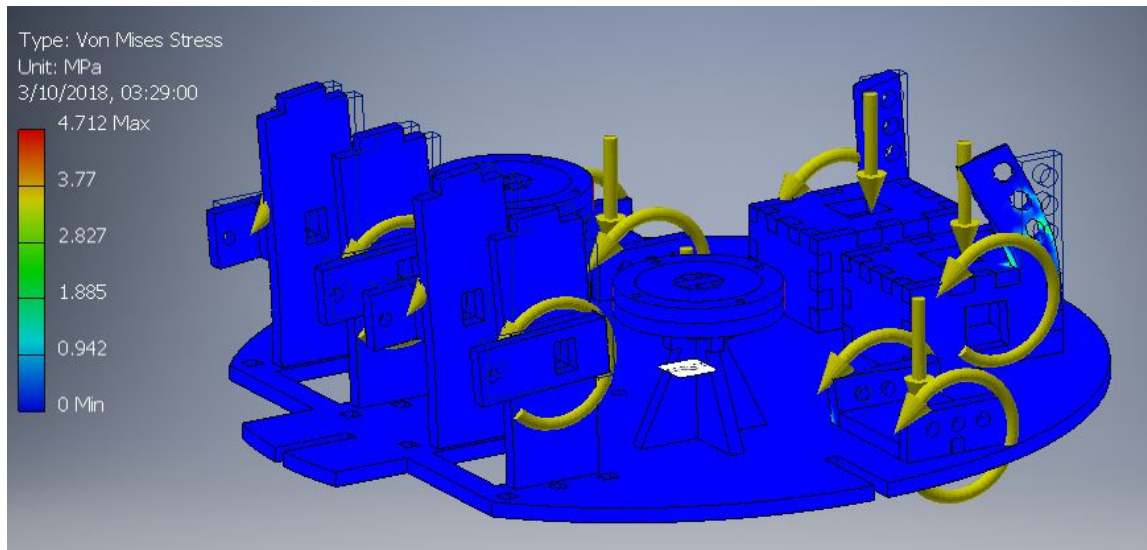


Figura 69: Esfuerzos de Von Mises, nivel medio

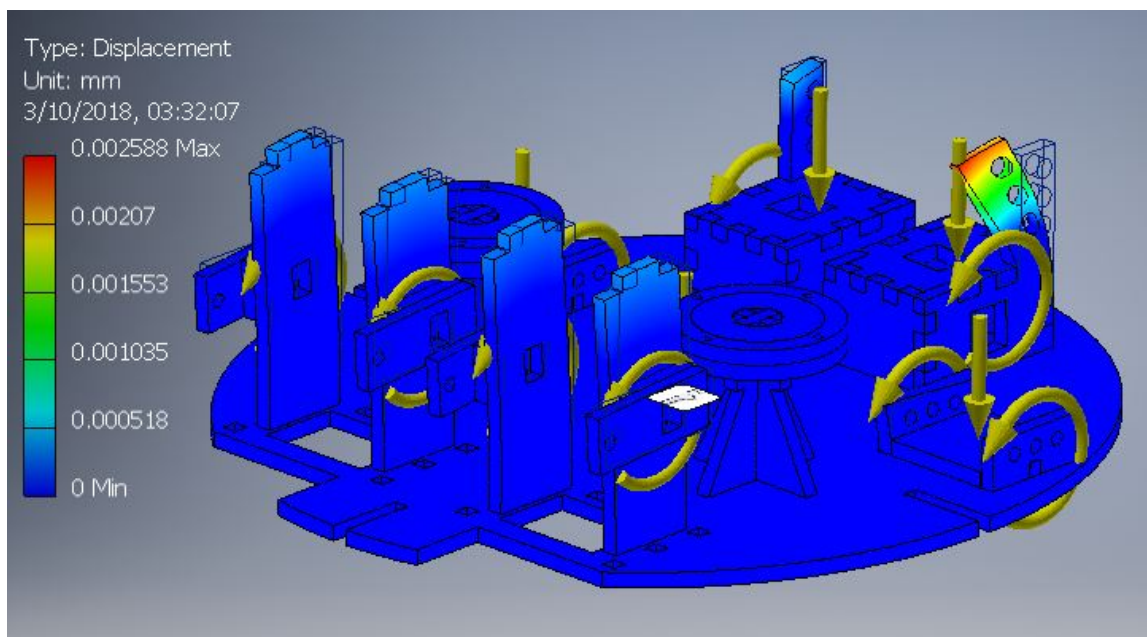


Figura 70: Desplazamiento, nivel medio

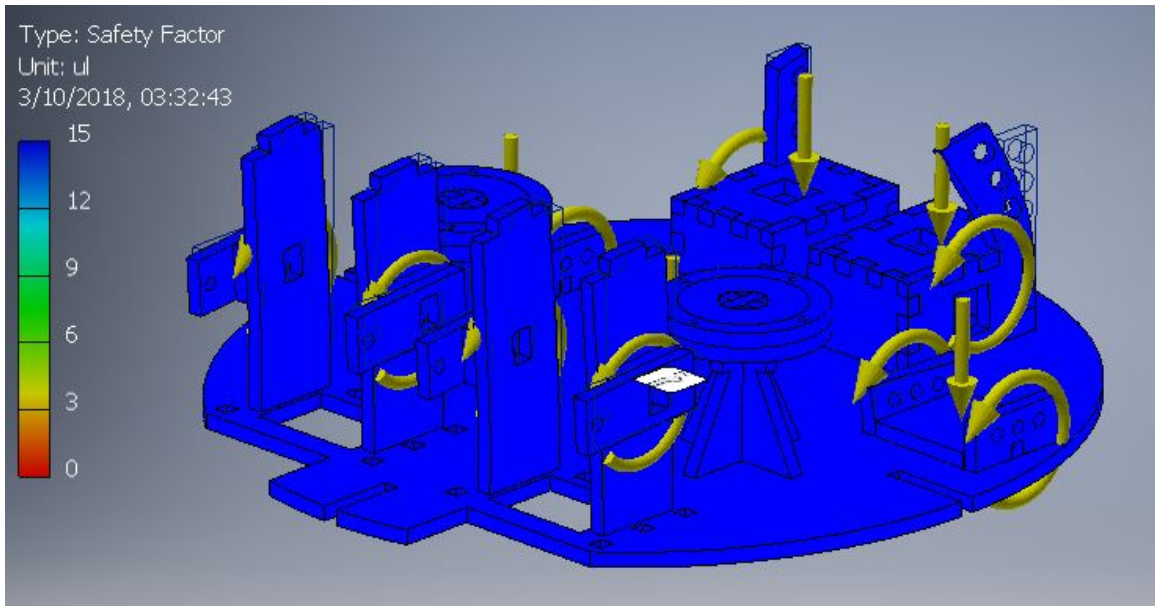


Figura 71: Factor de seguridad, nivel medio

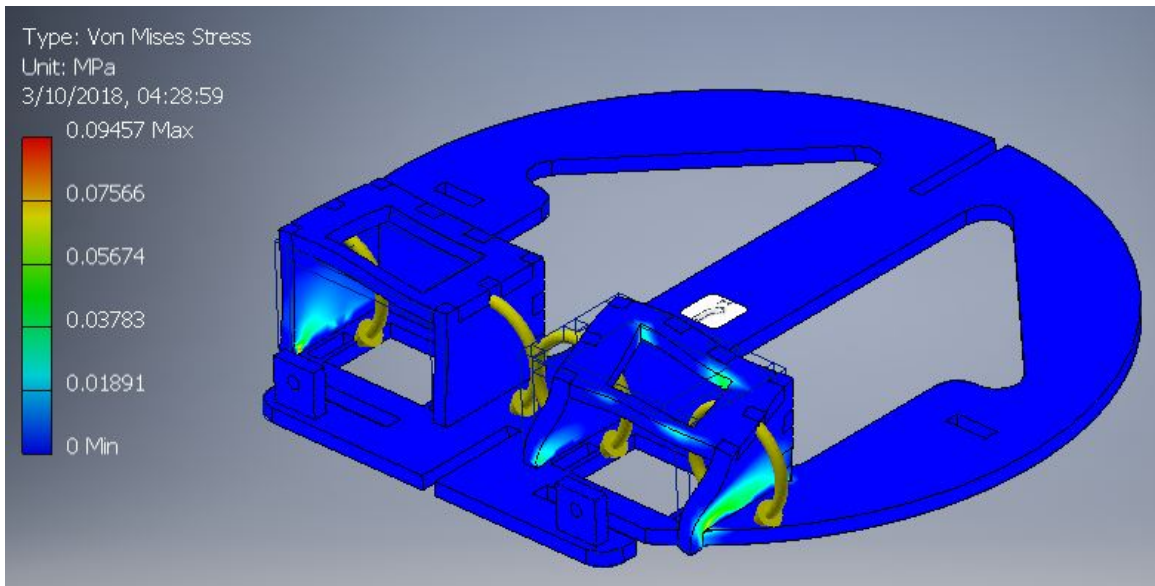


Figura 72: Esfuerzos de Von Mises, nivel superior

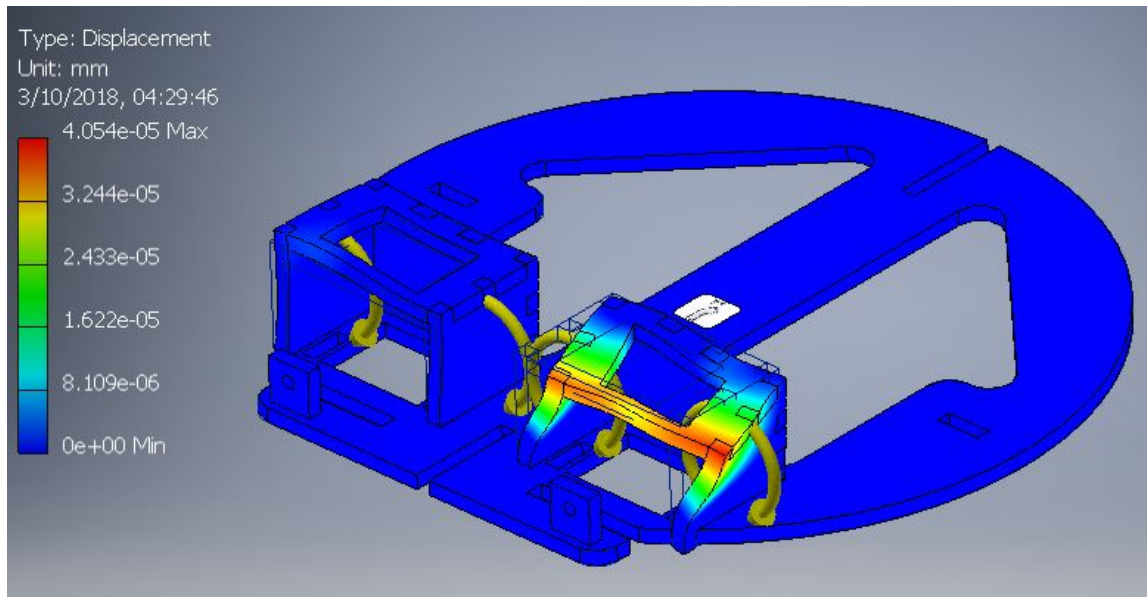


Figura 73: Desplazamiento, nivel superior

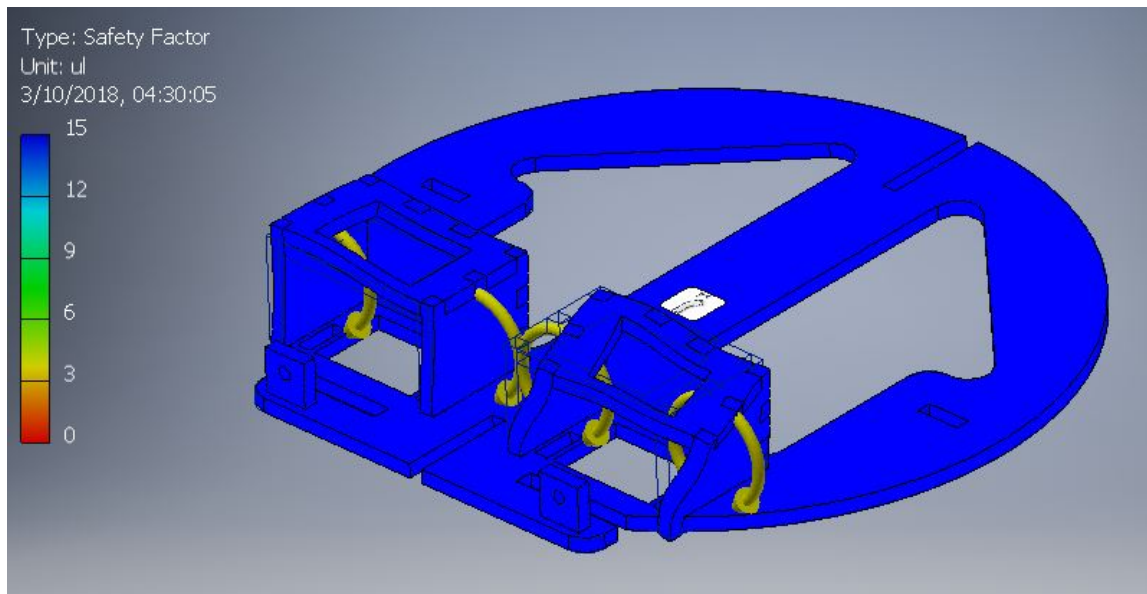


Figura 74: Factor de seguridad, nivel superior

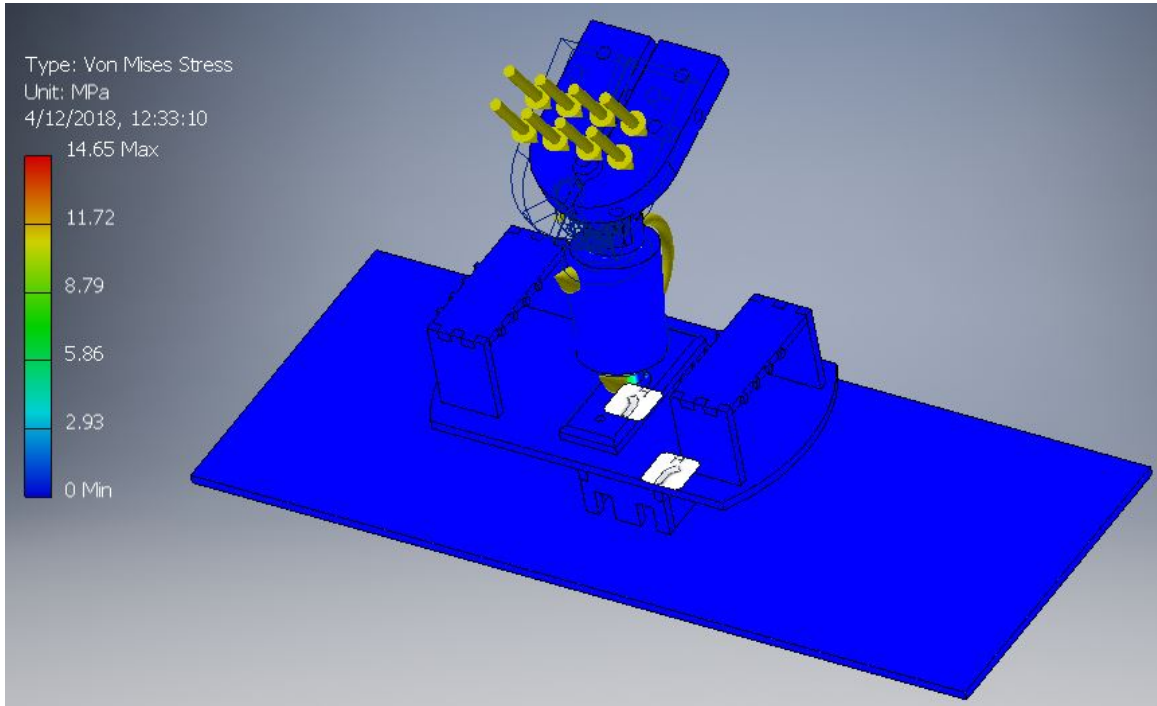


Figura 75: Esfuerzos de Von Mises, cuello

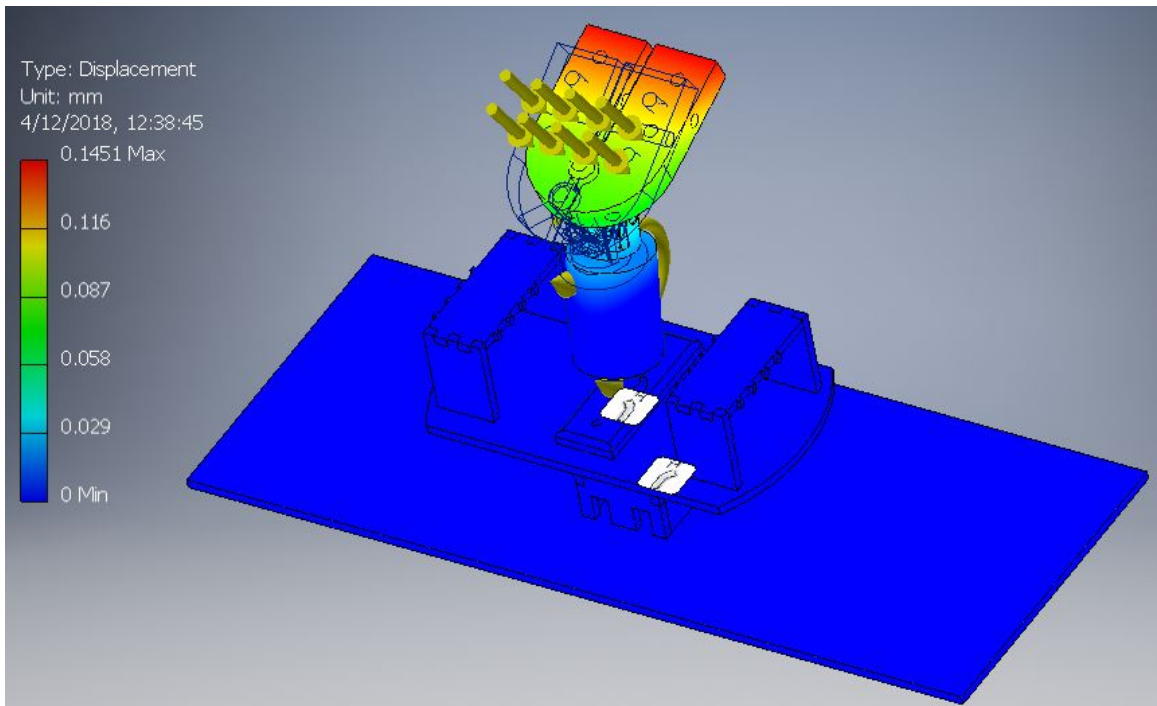


Figura 76: Desplazamiento, cuello

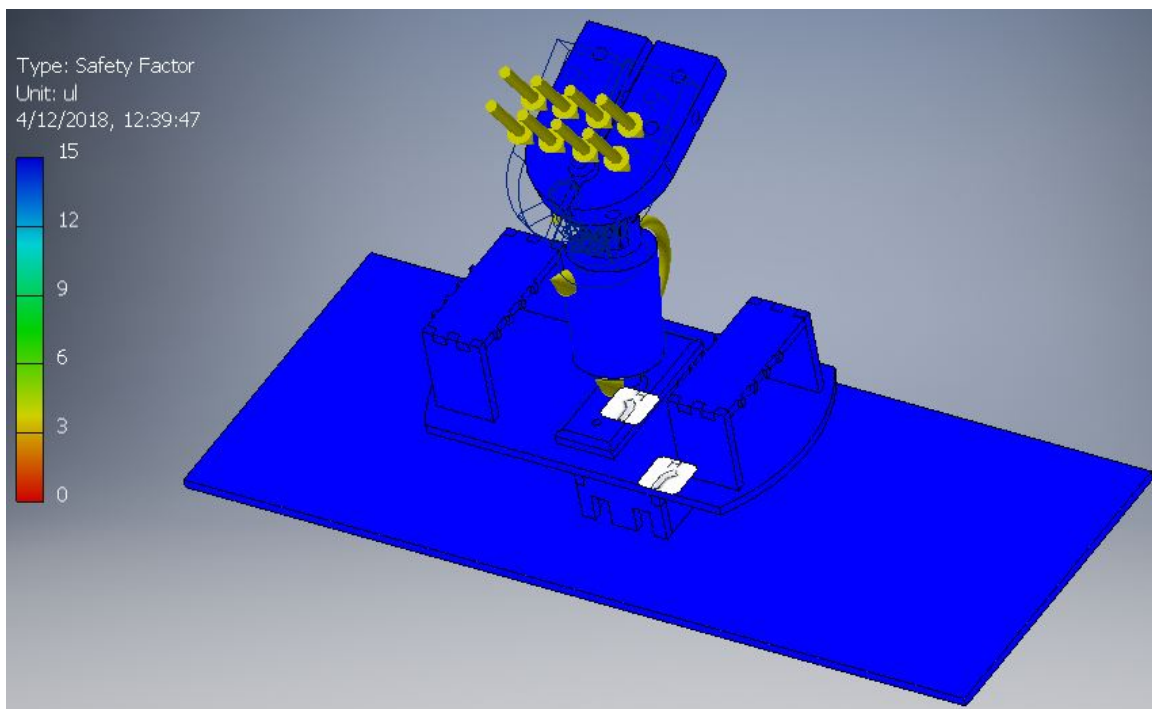


Figura 77: Factor de seguridad, cuello

- La mejor alternativa para la mayor parte de los mecanismos a realizar, son mecanismos de cuatro barras o la combinación de estos, ya que de esa forma se tiene un mejor control de los grados de libertad de la salida. Esto se debe a que son mecanismos que cuentan con un solo grado de libertad por lo que es fácil combinarlos y obtener los movimientos deseados.
- Para lograr obtener los movimientos deseados de los ojos es necesario la implementación de únicamente dos grados de libertad ya que con eso se permite mover cada ojo en las direcciones vertical, horizontal y diagonal deseadas.
- Se logró implementar un mecanismo para los ojos con dos grados de libertad que es capaz de alcanzar velocidades de hasta 114 RPM, por lo que se logra alcanzar las velocidades del ojo que llega hasta 80 RPM.
- Se implementó únicamente movimiento del párpado superior, debido a que en el cuerpo humano el párpado inferior no contribuye significativamente en el movimiento de parpadear.
- Con un mecanismo de cuatro barras se logró implementar el mecanismo de movimiento de cejas el cual tiene un grado de libertad dado por la rotación respecto a un eje que se realizó al centro de la misma.
- Por la forma en que se implementaron las cejas se logra únicamente un movimiento rotacional para la elevación y el descenso de las cejas, por lo que las trayectorias son las mismas para ambos movimientos.
- Se implementó un mecanismo de cuatro barras para el movimiento de apertura de la boca debido a que se buscaba únicamente un grado de libertad dado por el abrir y cerrar de boca.
- Se utilizó solamente un grado de libertad para la boca ya que el animatrónico cuenta únicamente con funcionalidad de habla, así que no se necesita tener un movimiento horizontal en la mandíbula.

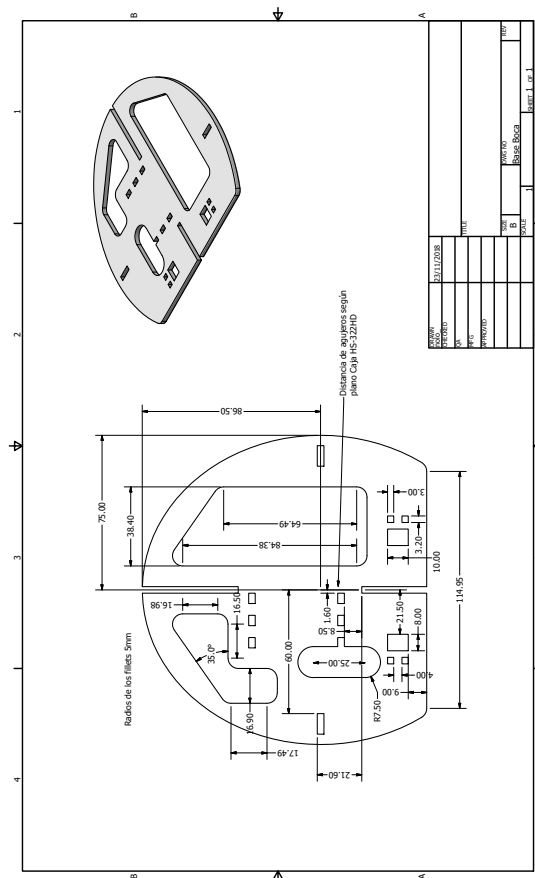
- Para el movimiento de sonreír se implementó directamente un efector final sobre el eje de rotación del motor ya que con ese movimiento de rotación se logra simular la combinación de los músculos risorios y los cigomáticos que permiten sonreír.
- Se implementaron dos actuadores de alto torque que accionan su respectivo mecanismo de cuatro de barras para lograr la flexión y extensión del cuello.
- Debido a la ubicación del efector final [Figura 54] de ambos mecanismos no se logra obtener una flexión lateral pura, únicamente una combinación de flexión lateral con flexión y extensión.
- Al accionar ambos mecanismos en conjunto si se logra obtener una flexión y extensión pura de la cabeza, y con distintas combinaciones de ángulos para cada actuador se logra alcanzar las demás posiciones deseadas.
- Se encontró que la forma más fácil de implementar la rotación de la cabeza era montando directamente toda la cabeza y los mecanismos del cuello sobre un motor de alto torque para que la misma rotación del motor rote la cabeza.
- La cabeza cuenta con 3 grados de libertad dados por cada uno de los mecanismos implementados, uno para la rotación y dos para la flexión, extensión y el movimiento que sustituye a la flexión lateral que esta dado por las distintas combinaciones de ambos mecanismos.
- Se optó por realizar la estructura donde se contienen todos los mecanismos de la cara con la forma de la cabeza para de esta forma no requerir de dos estructuras independientes, una para contener los mecanismos y otro para darle la forma de la cabeza.
- La selección de materiales para realizar el prototipo se hizo según la disponibilidad de materia prima y herramientas de impresión 3D y corte láser de la Universidad del Valle de Guatemala.
- Se utilizó los motores XL-320 ya que estos cuentan con una velocidad máxima de 114 RPM, y la velocidad máxima que se quiere alcanzar es la del movimientos de los ojos de 80 RPM.
- El microcontrolador a escoger fue el Arduino nano debido a que este trabajo de graduación está enfocado al diseño de los mecanismos y no a la programación eficiente de cada uno de los mismos mecanismos. De igual forma se facilitó el uso de estos actuadores por las librerías específicas de arduino que existen para cada uno de los motores utilizados.

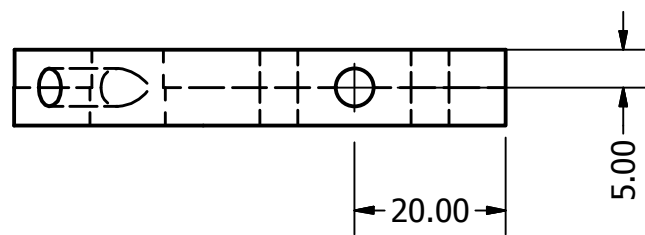
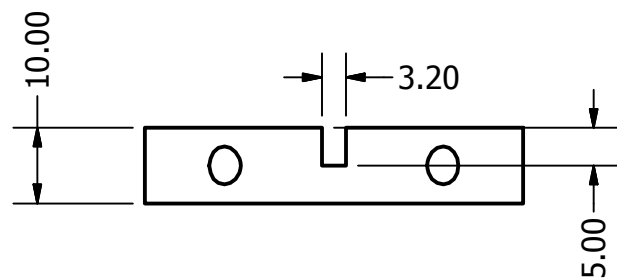
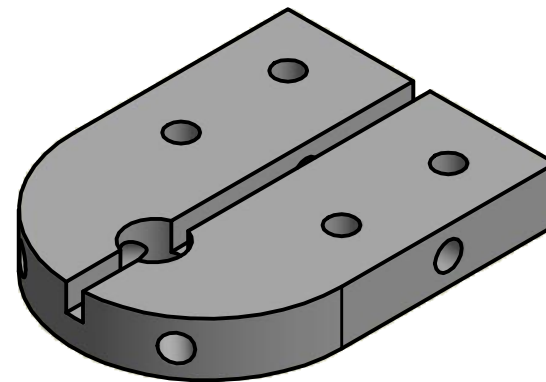
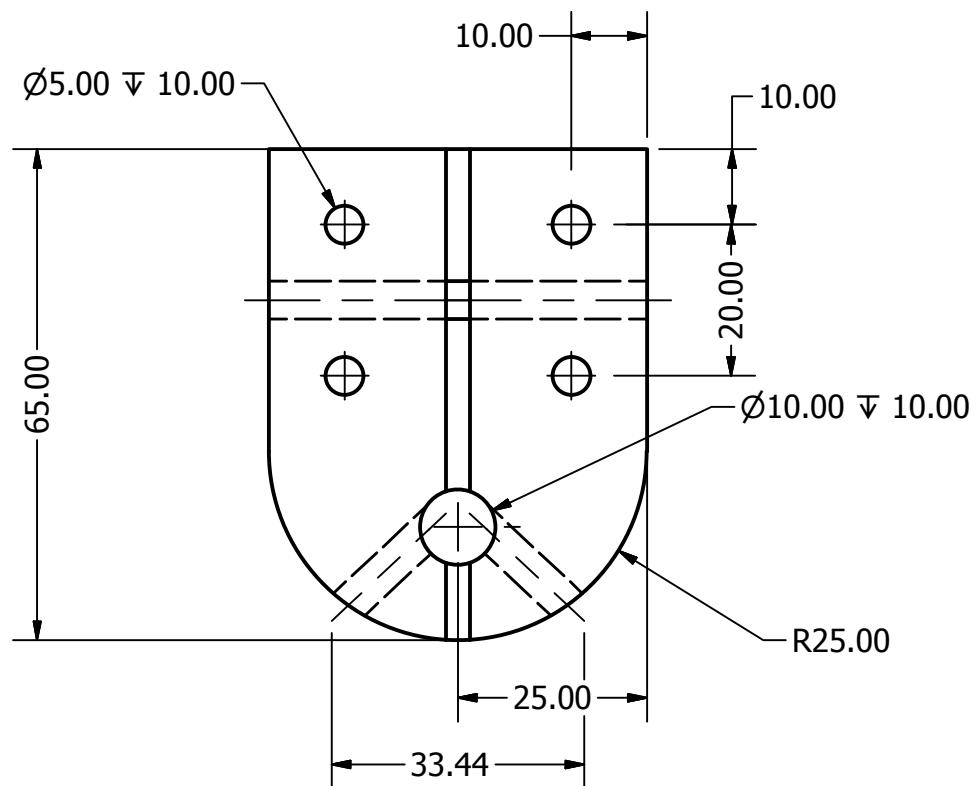
- Implementar una estructura con más puntos de soporte para darle aún más estabilidad a la cabeza.
- Agregar una máscara de látex o similar para lograr obtener el mayor provecho en cuanto a realismo.
- Maquinar las barras a utilizar en los mecanismos para disminuir el error dado por las posibles diferencias en las dimensiones de las barras de dos mecanismos iguales como en el caso de los ojos, párpados, cejas y cuello.
- Implementar rutinas en el programa del microcontrolador para lograr reducir el tiempo de espera entre el envío de datos a cada motor y lograr así mover todos los mecanismos al mismo tiempo sin necesidad de implementar una gran cantidad de microcontroladores.
- Implementar un sistema de reconocimiento de imagen para que el animatrónico pueda ver su entorno e interactuar con él.
- Implementar un sistema de proceso de audio para lograr combinar el habla del animatrónico con el movimiento de la boca al gesticular dichas palabras.


-
- [1] T. James, *Disney History*, 2015. dirección: <http://www.disneyhistoryinstitute.com/2015/02/before-lincoln-first-disney-human.html>.
 - [2] S. Finnie, *The Disneylands That Never Were*. Lulu.com, 2006.
 - [3] J. Fickley-Baker, *Animatrónico Avatar*, 2018. dirección: <https://disneyparks.disney.go.com/blog/2018/05/pandora-the-world-of-avatar-time-capsule-Imagineers-create-the-most-advanced-audio-animatronic-the-shaman-of-songs-for-navi-river-journey/>.
 - [4] A. Girón, *Diseño e Implementación Mecánica de la Cabeza de "DANI"*, 2017.
 - [5] L. Aguirre, R. Jo, J. Bolaños, A. Debroy, J. Hegel y J. Maldonado, *Animatronics*, 2017.
 - [6] M. L. Palmer y M. E. Epler, *Fundamentos de Las Técnicas de Evaluación Musculoesquelética (Bicolor)*. Editorial Paidotribo, 2002, vol. 85.
 - [7] L. Gila, A. Villanueva y R. Cabeza, "Fisiopatología y técnicas de registro de los movimientos oculares", *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, vol. 32, págs. 9-26, de 2009, ISSN: 1137-6627. dirección: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272009000600002&nrm=iso.
 - [8] V. Svechtarov, M. Hristova, S. Nencheva-Svechtarova y T. Tonchev, "andibular range of motion and its relation to temporomandibular disorders", *Scripta Scientifica Medicinae Dentalis*, vol. 1, n.º 1, págs. 21-26, 2015.
 - [9] R. López, "Arcos y ángulos de movimiento", *línea*, 2009. dirección: <https://www.slideshare.net/pedroespিনosa106/52756563-angulosyarcosdemovimiento>.
 - [10] S. R. Juárez y A. S. Castillo, *Oftalmología*. Editorial El Manual Moderno, 2014.
 - [11] ROBOTIS, *E-manual XL-320*. dirección: http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel_x/xl_series/xl-320.htm.
 - [12] —, *E-manual AX-12A*. dirección: http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/ax_series/dxl_ax_actuator.htm.

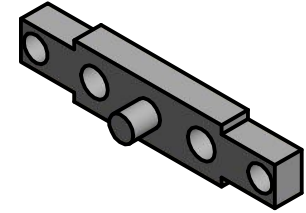
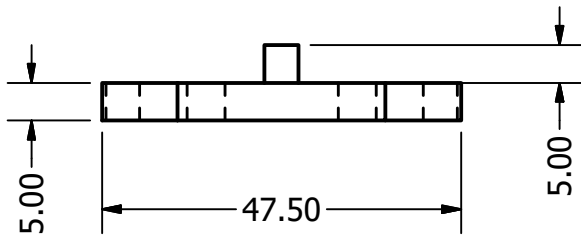
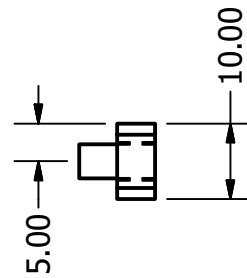
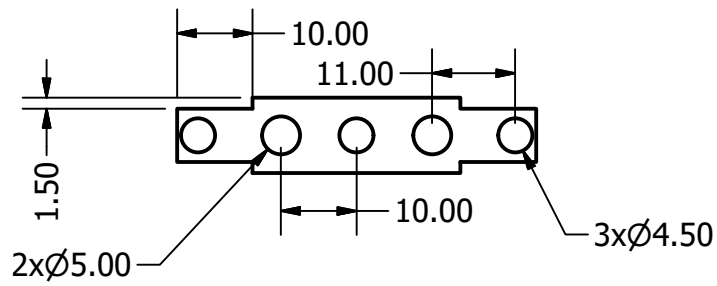
- [13] HITEC, *Product Description HS-322HD*. dirección: <https://hitecrd.com/products/servos/sport-servos/analog-sport-servos/hs-322hd/product>.
- [14] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria*. 2016.
- [15] Tecniaceros, *Aluminio*. dirección: <http://tecniaceros.com/productos/aluminio/>.
- [16] I. JQ, *Delrin*. dirección: <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Delrin/DelrinP/dtecnicos.htm>.
- [17] Daniel Rojas, *Juntas universales mecatrónica*, 2015. dirección: <https://es.slideshare.net/danielrojasvarona/juntas-universales-mecatronica> (visitado 15-09-2018).
- [18] L. Carmenate Milián, F. A. Moncada Chévez, B. Leiva y E. Waldermar, “Manual de medidas antropométricas”, 2014.

14.1. Planos de construcción

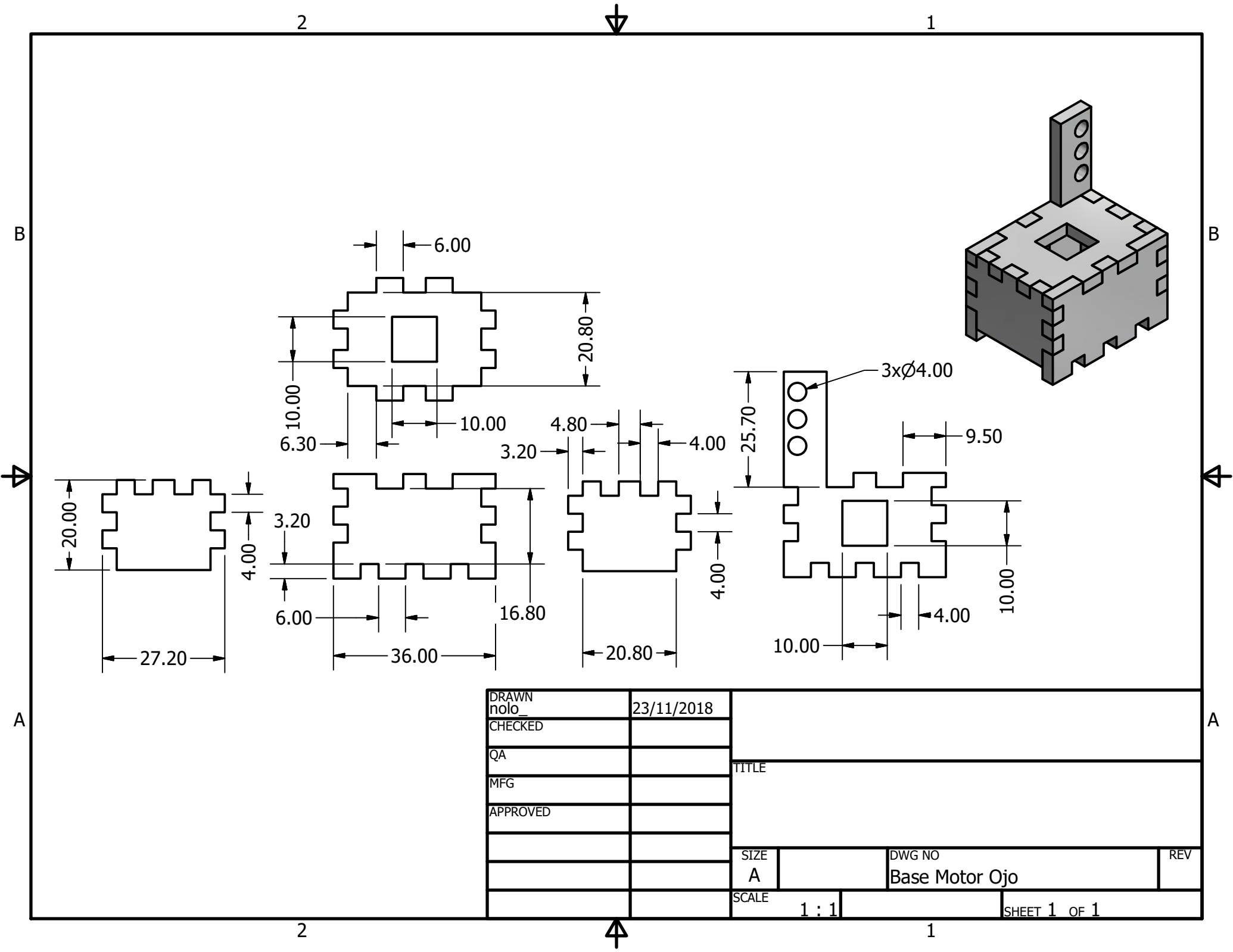




<p>TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN ASME Y14.5 - 2009.</p> <p>TOLERANCIAS GENERALES</p> <p>LINEAL .X ± .XX ± .XXX ±</p> <p>ANGULAR ±</p> <p>FRACCIONES ±</p> <p>RUGOSIDAD SUPERFICIAL ✓</p>	DIBUJADO POR	FECHA	 <p>UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA</p> <p>18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvg.edu.gt</p>	
	Manolo Benegas	FECHA		
	DISEÑADO POR	FECHA		
	REVISADO POR	FECHA		
	APROBADO POR	FECHA	TÍTULO: Base Cuello	
	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO		NÚMERO DE DIBUJO:	
MATERIAL	<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>		FORMATO	
ACERO 1045			ESCALA:	UNIDADES:
TRATAMIENTO			B	PÁGINA 14 DE 17
MASA:	ÁNGULO DE PROYECCIÓN			



DRAWN nolo_	23/11/2018	TITLE		
CHECKED				
QA				
MFG				
APPROVED				
		SIZE	DWG NO	REV
		A	Base Junta Universal	
		SCALE	1	1
				SHEET 1 OF 1



DRAWN	nolo	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			A	Base Motor Ojo
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1

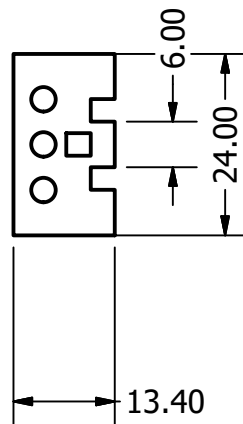
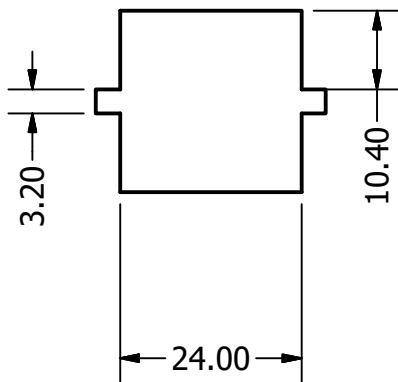
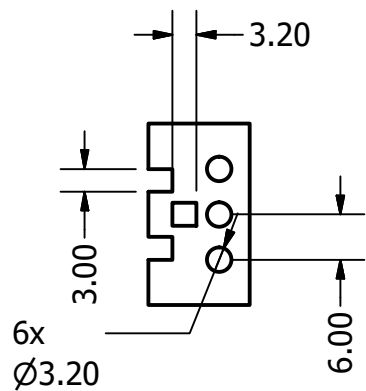
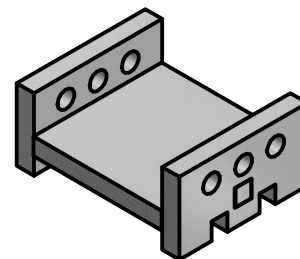
2



1

B

B



A

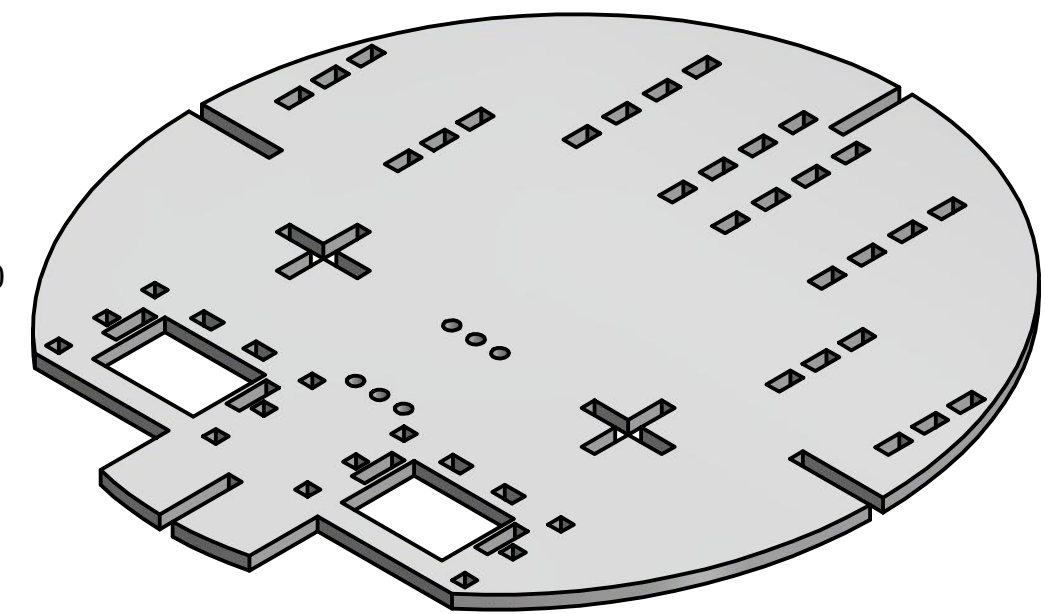
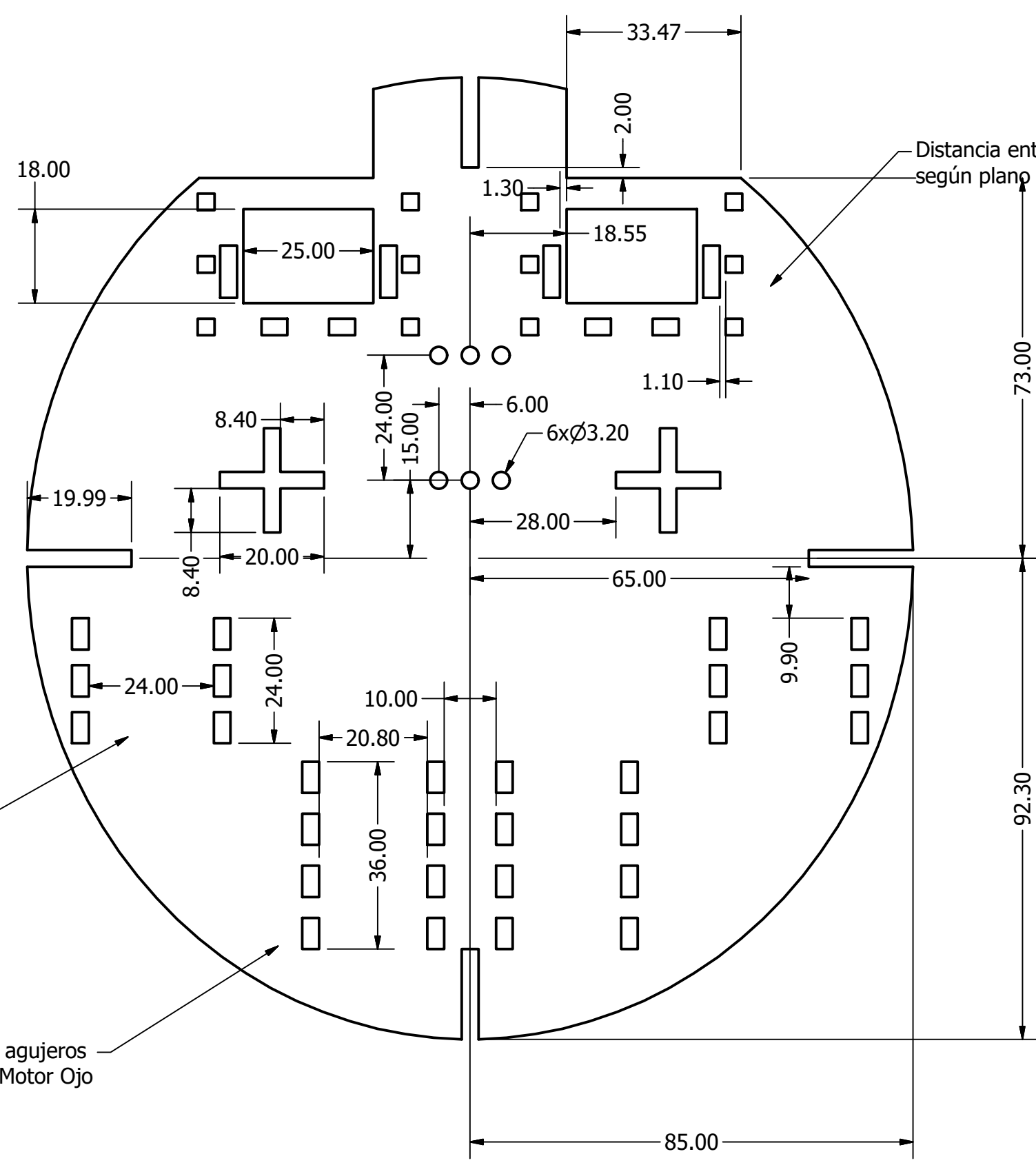
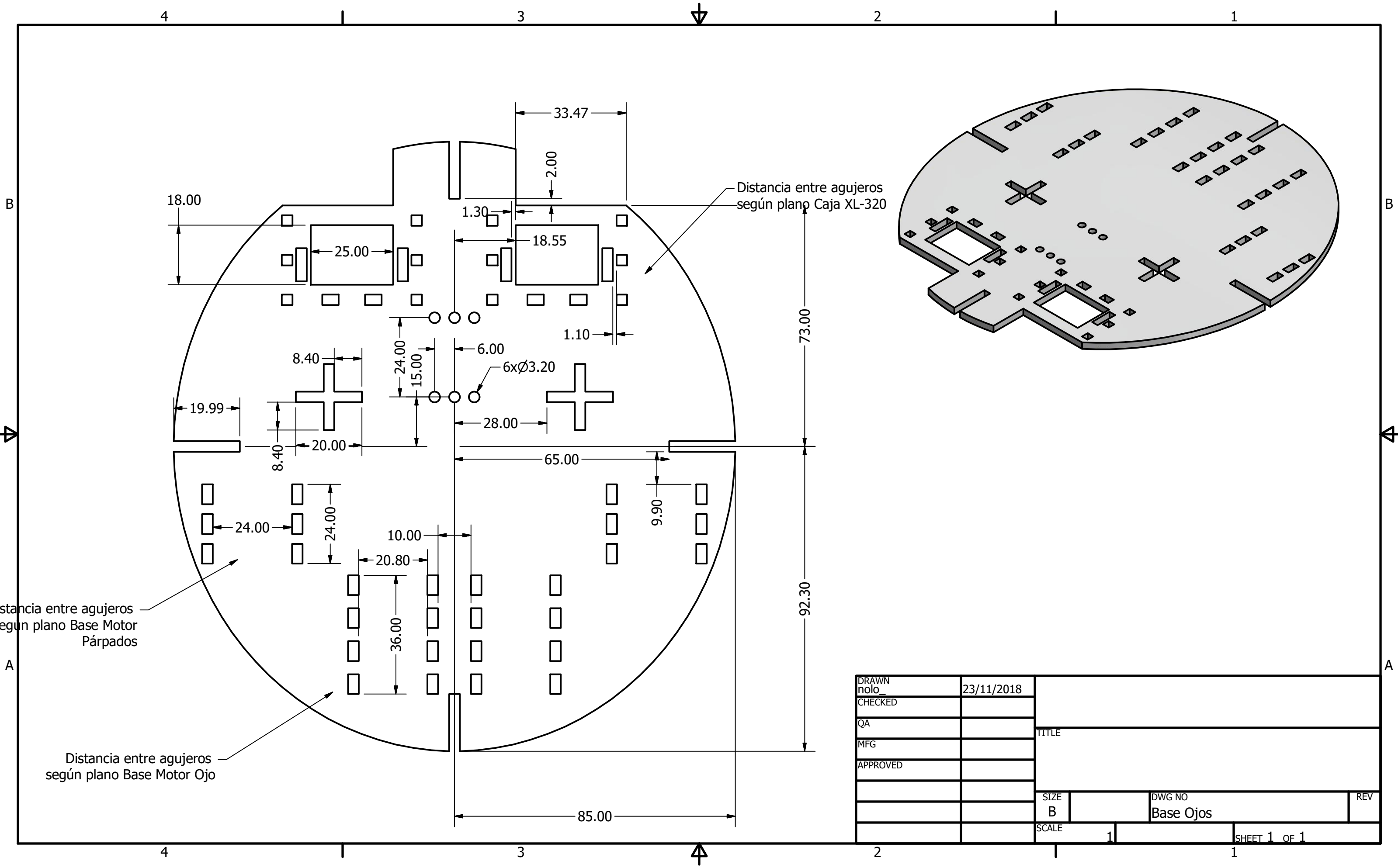
A

DRAWN	nolo_	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			A	Base Motor Párpados
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1

2



1



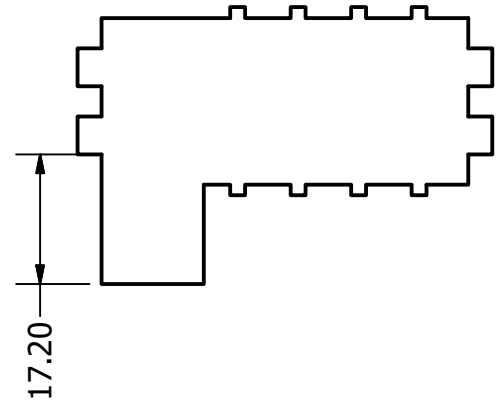
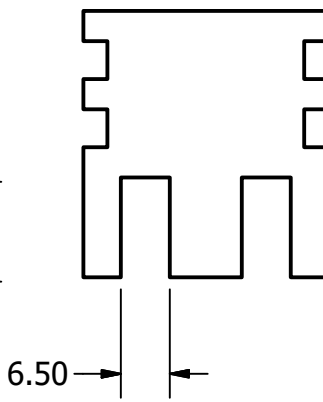
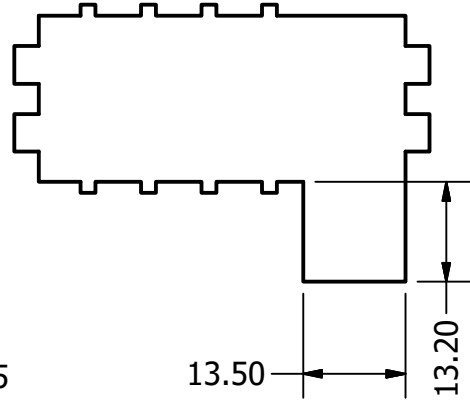
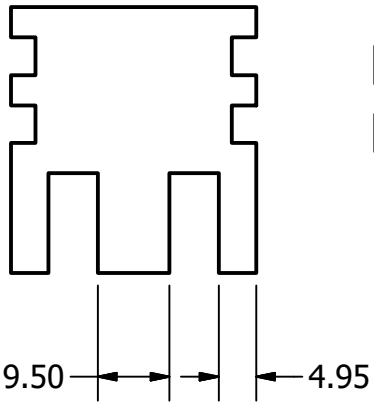
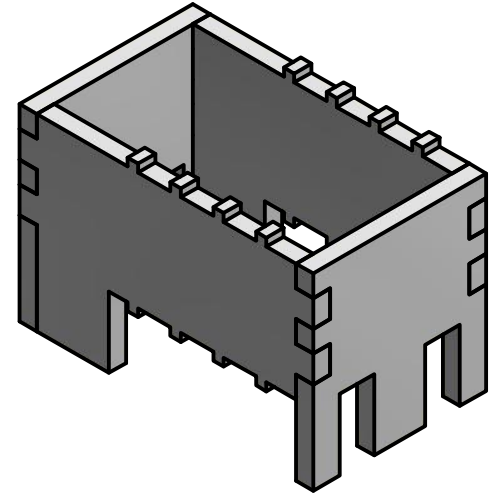
Distancia entre agujeros según plano Base Motor Párpados

Distancia entre agujeros según plano Base Motor Ojo

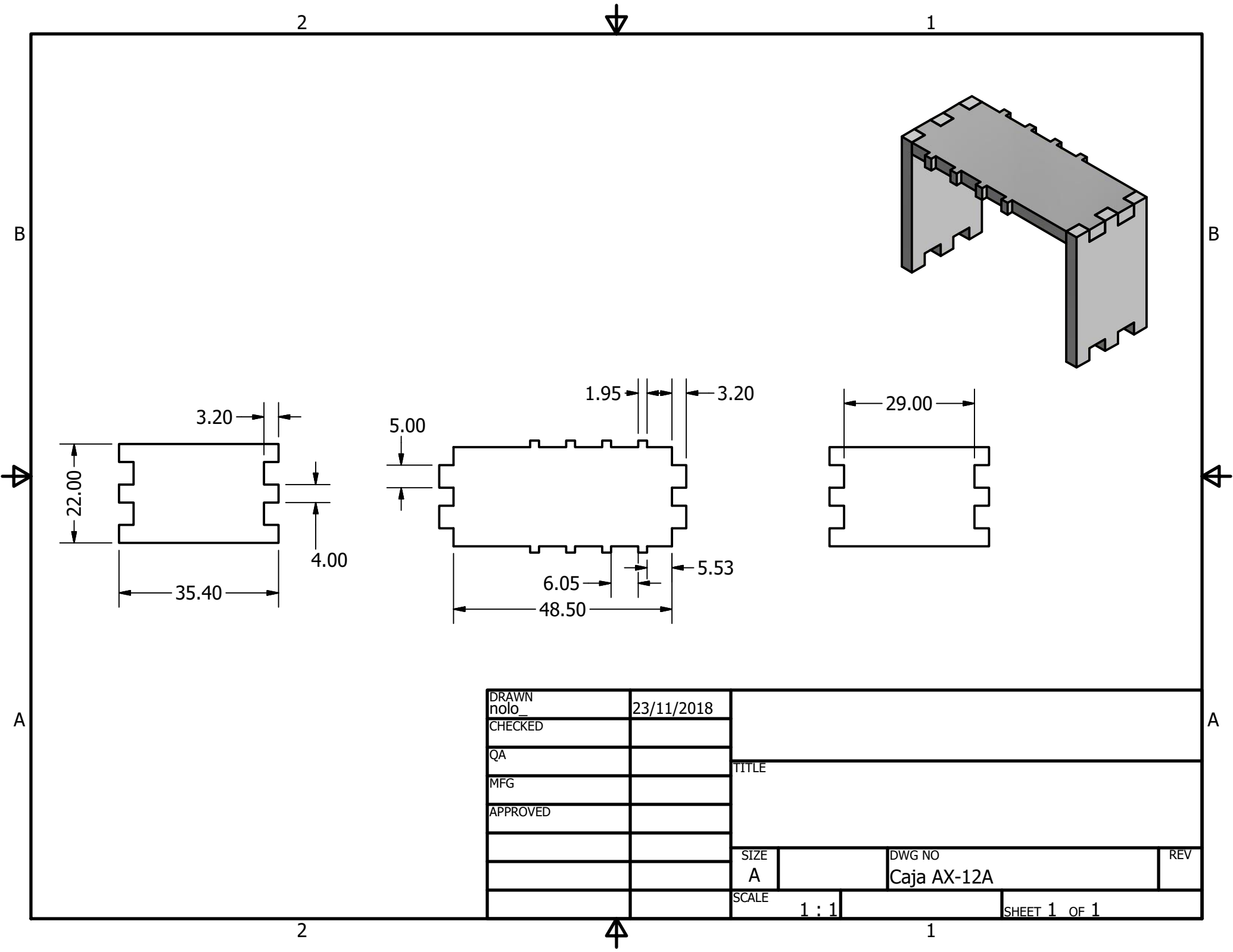
Distancia entre agujeros según plano Caja XL-320

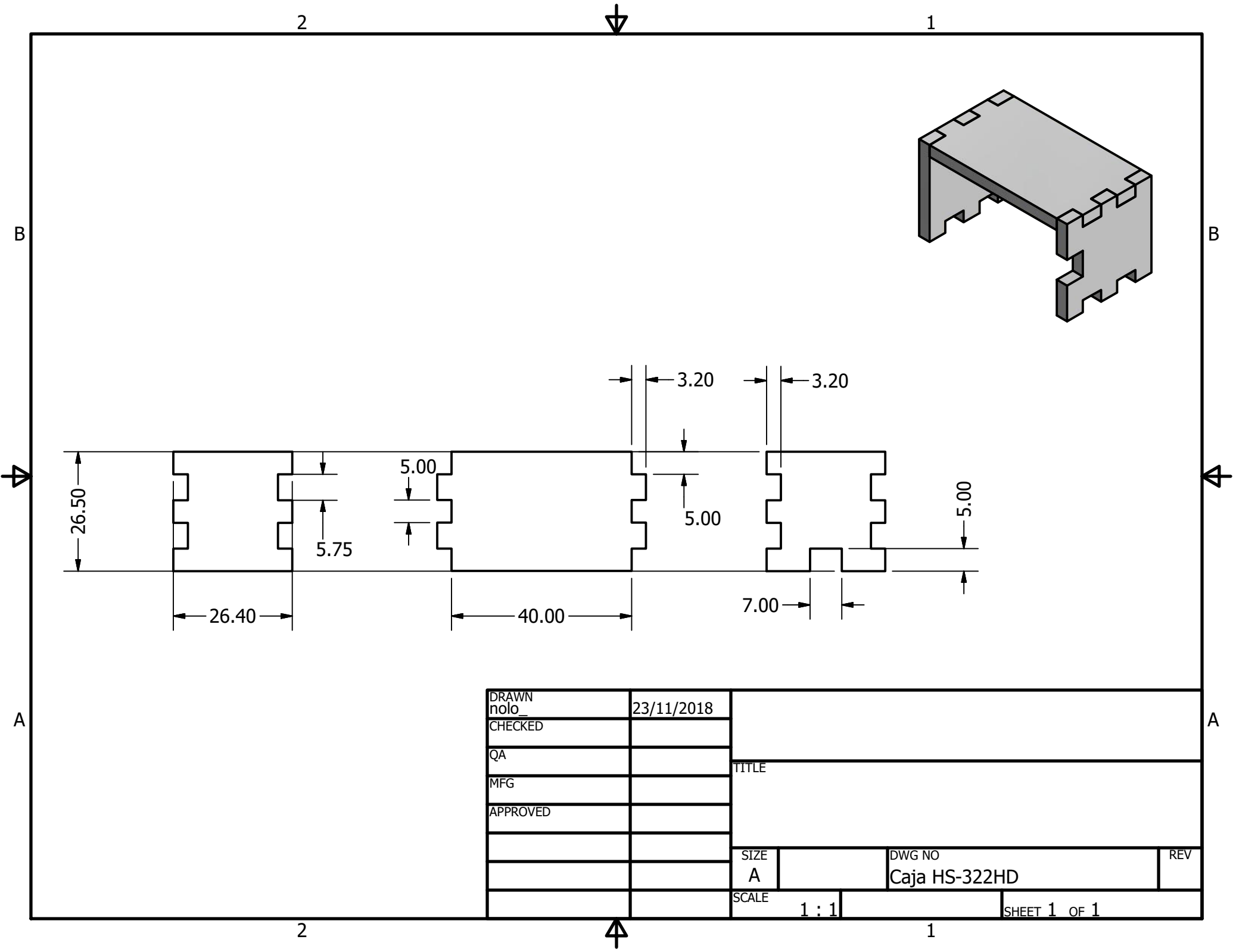
DRAWN	nolo_	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			B	Base Ojos
			SCALE	REV
			1	
			SHEET 1 OF 1	

Dimensiones son iguales al plano de Caja AX-12A, a excepción de las aquí dibujadas



DRAWN	nolo	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			A	Caja AX-12A Cuello
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1



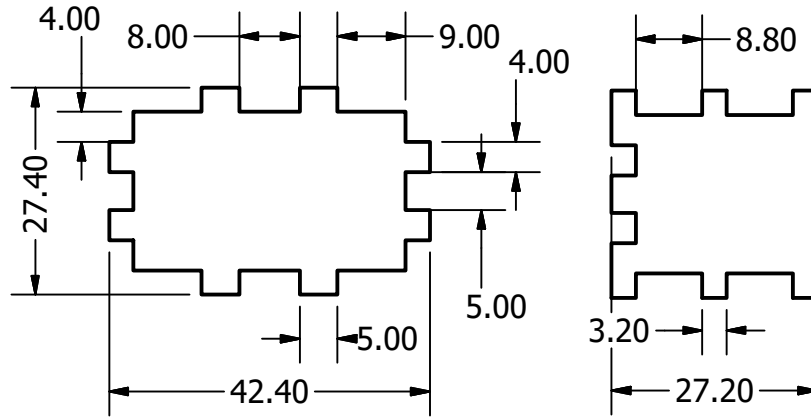
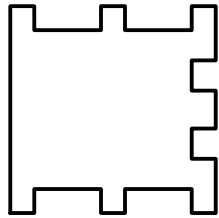
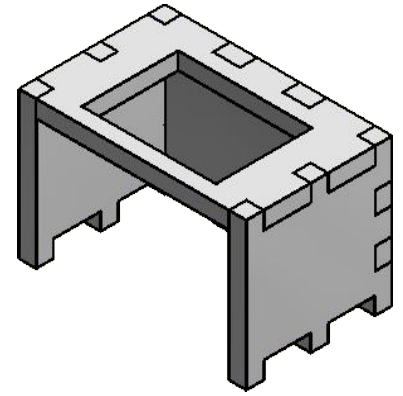
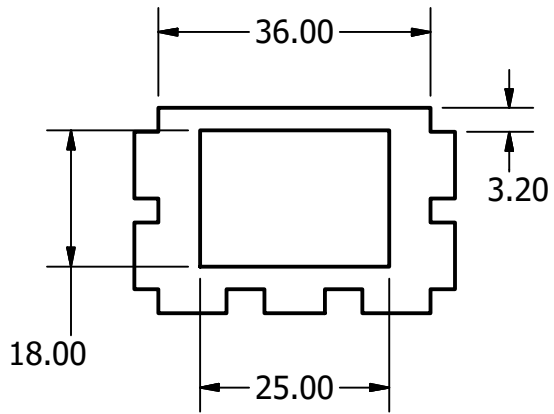


DRAWN	nolo	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			A	Caja HS-322HD
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1

2



1



B

B

A

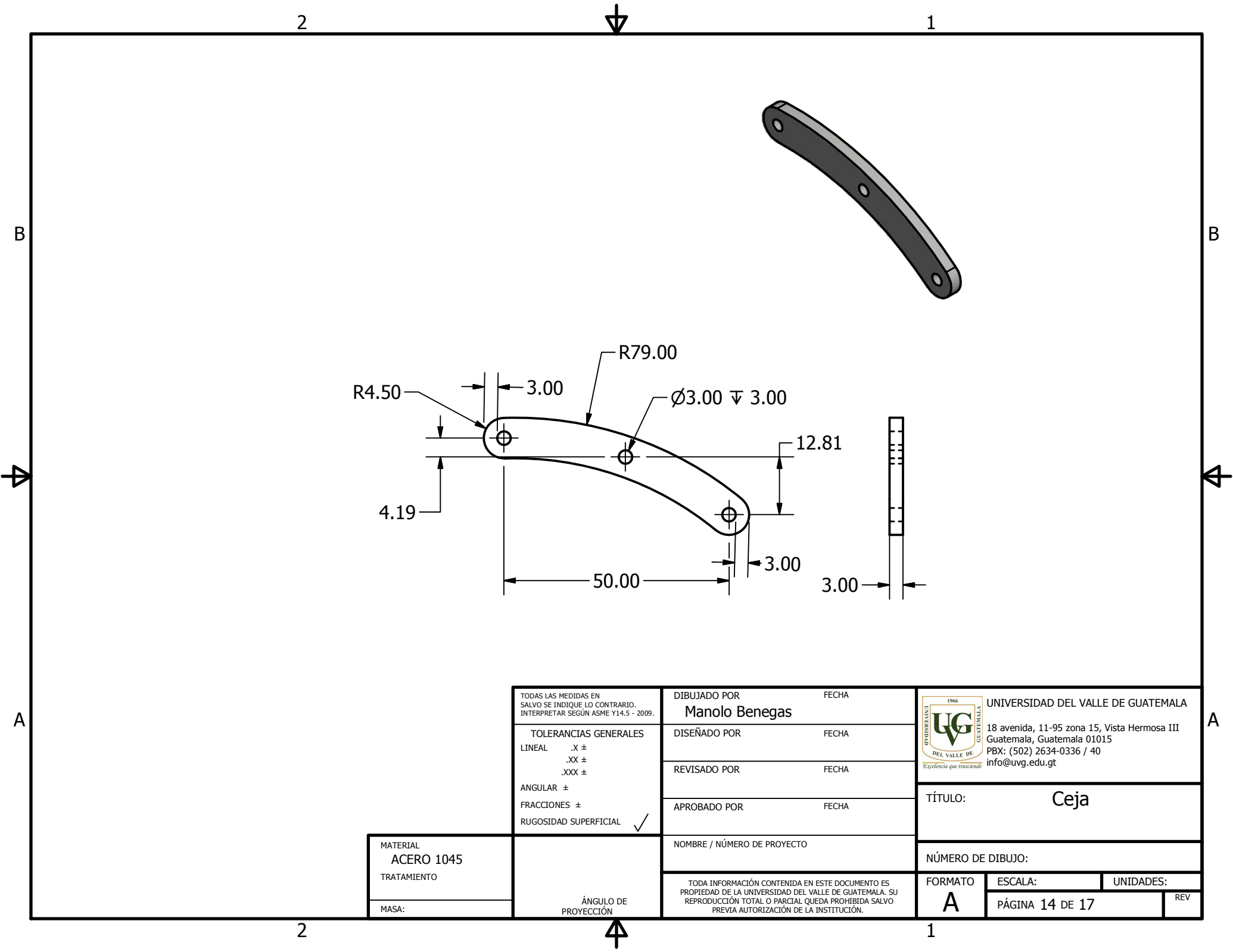
A

DRAWN	nolo	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			A	Caja XL-320
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1

2



1



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:	

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

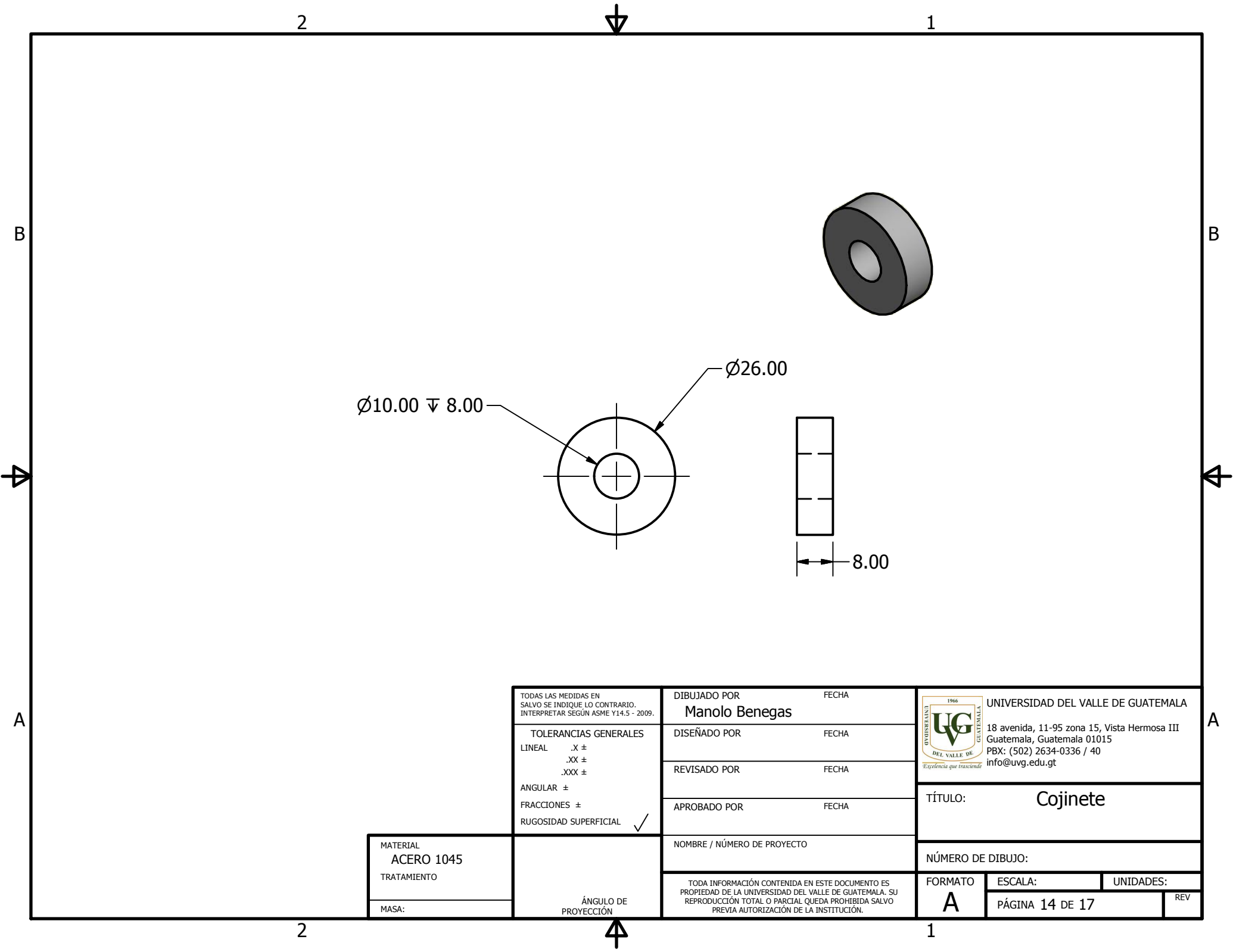
DIBUJADO POR	Manolo Benegas	FECHA	
DISEÑADO POR		FECHA	
REVISADO POR		FECHA	
APROBADO POR		FECHA	
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO			

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: **Ceja**

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 ✓

DIBUJADO POR	FECHA
Manolo Benegas	
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: **Cojinete**

MATERIAL
ACERO 1045

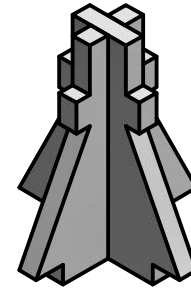
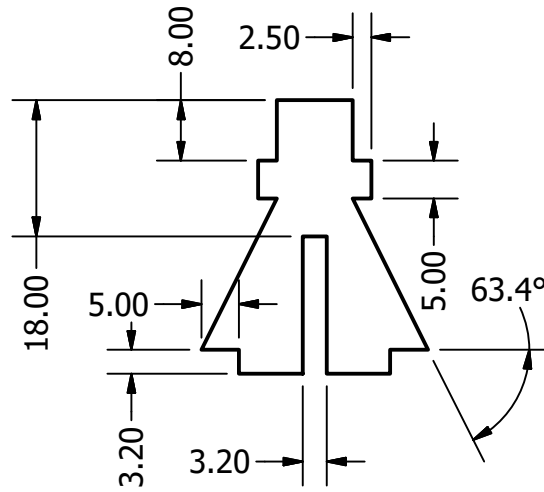
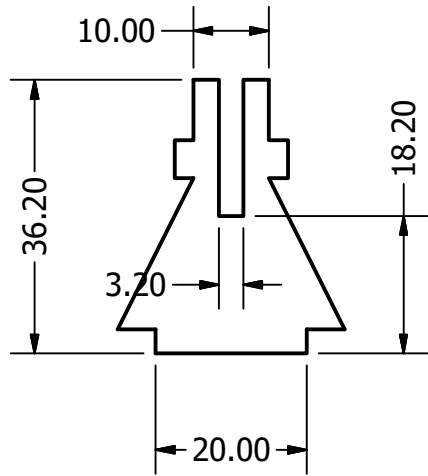
TRATAMIENTO

MASA:

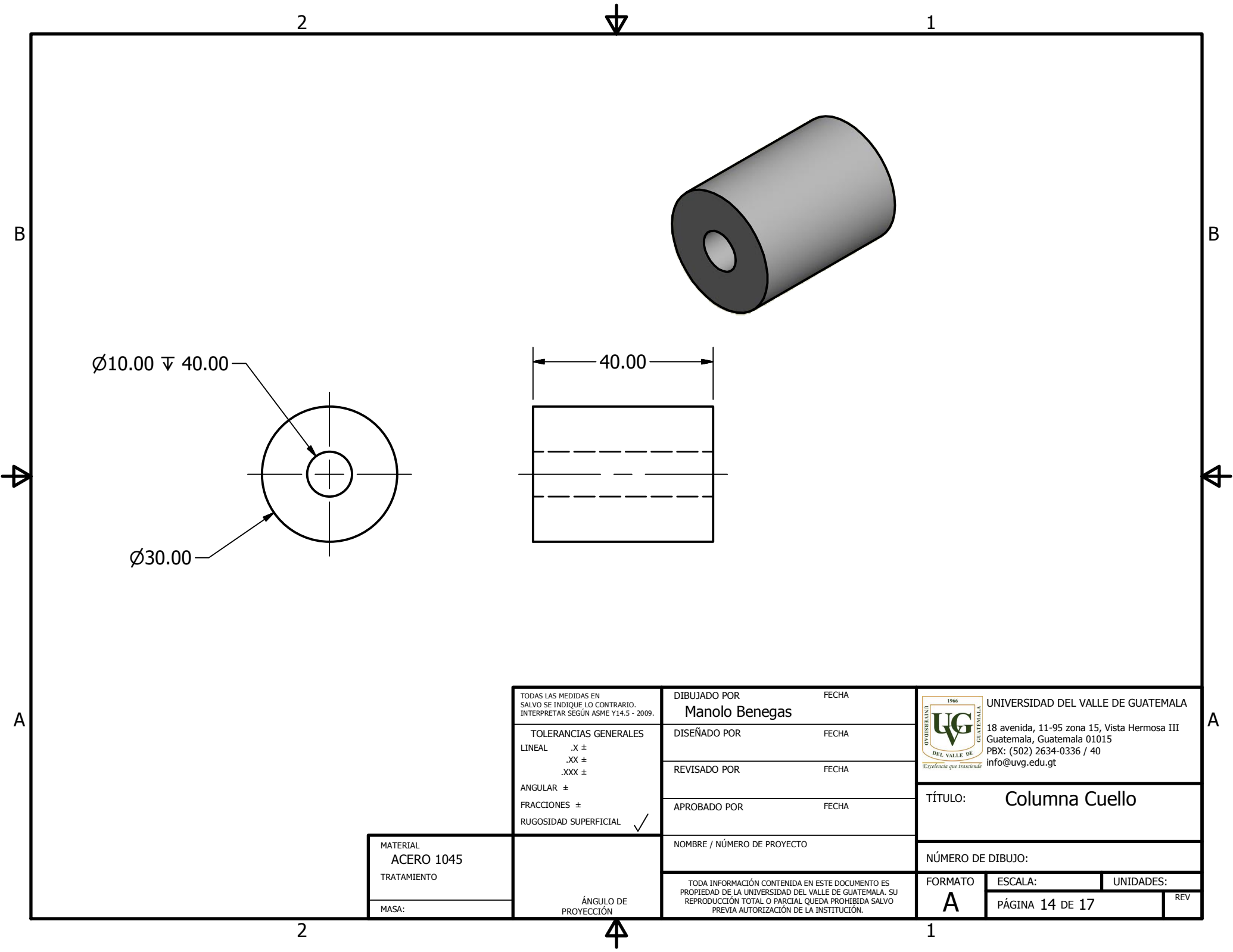
ÁNGULO DE PROYECCIÓN

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	ESCALA: UNIDADES:
A	PÁGINA 14 DE 17 REV



DRAWN	nolo_	23/11/2018			
CHECKED					
QA			TITLE		
MFG					
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
			A	Column Cojinetes	
			SCALE	SHEET 1 OF 1	
			1 : 1		



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
Manolo Benegas	
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: **Columna Cuello**

MATERIAL
ACERO 1045

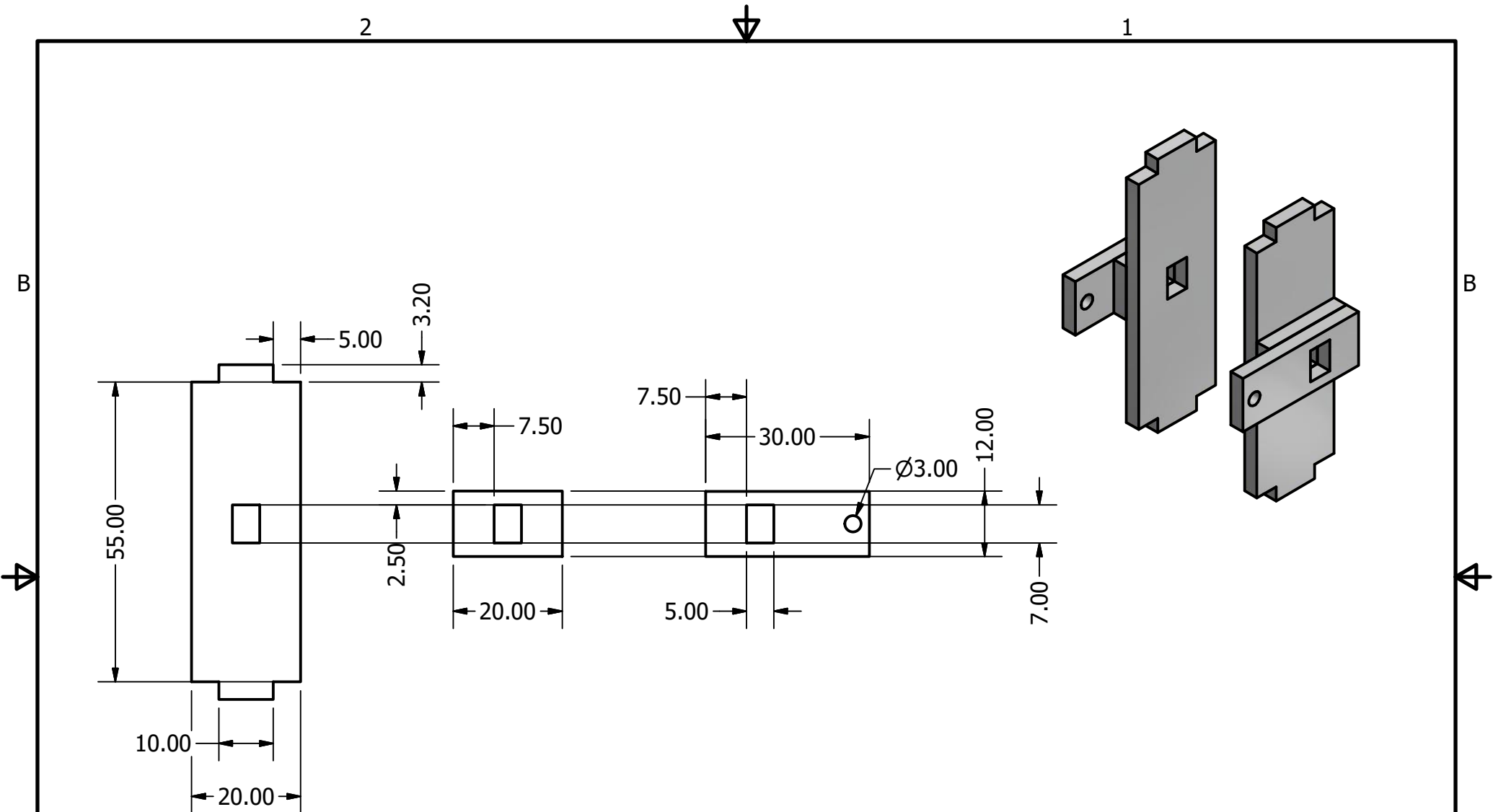
TRATAMIENTO

MASA:

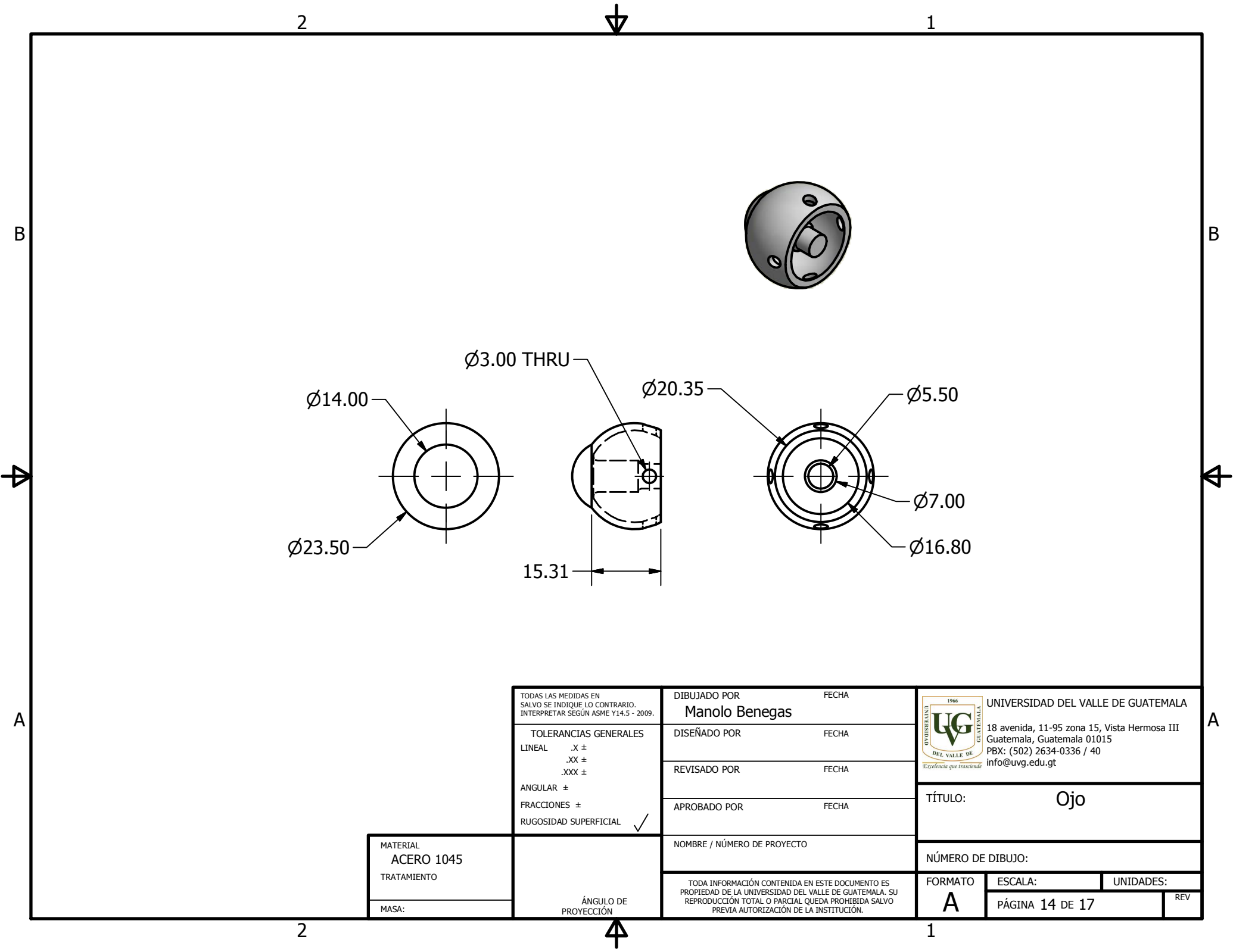
ÁNGULO DE PROYECCIÓN

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	ESCALA:	UNIDADES:
A		REV
PÁGINA 14 DE 17		



DRAWN	nolo	23/11/2018	TITLE	
CHECKED			TITLE	
QA			TITLE	
MFG			TITLE	
APPROVED			TITLE	
			SIZE	DWG NO
			A	Columna Ojo
			SCALE	REV
			1 : 1	
				SHEET 1 OF 1



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:	

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

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

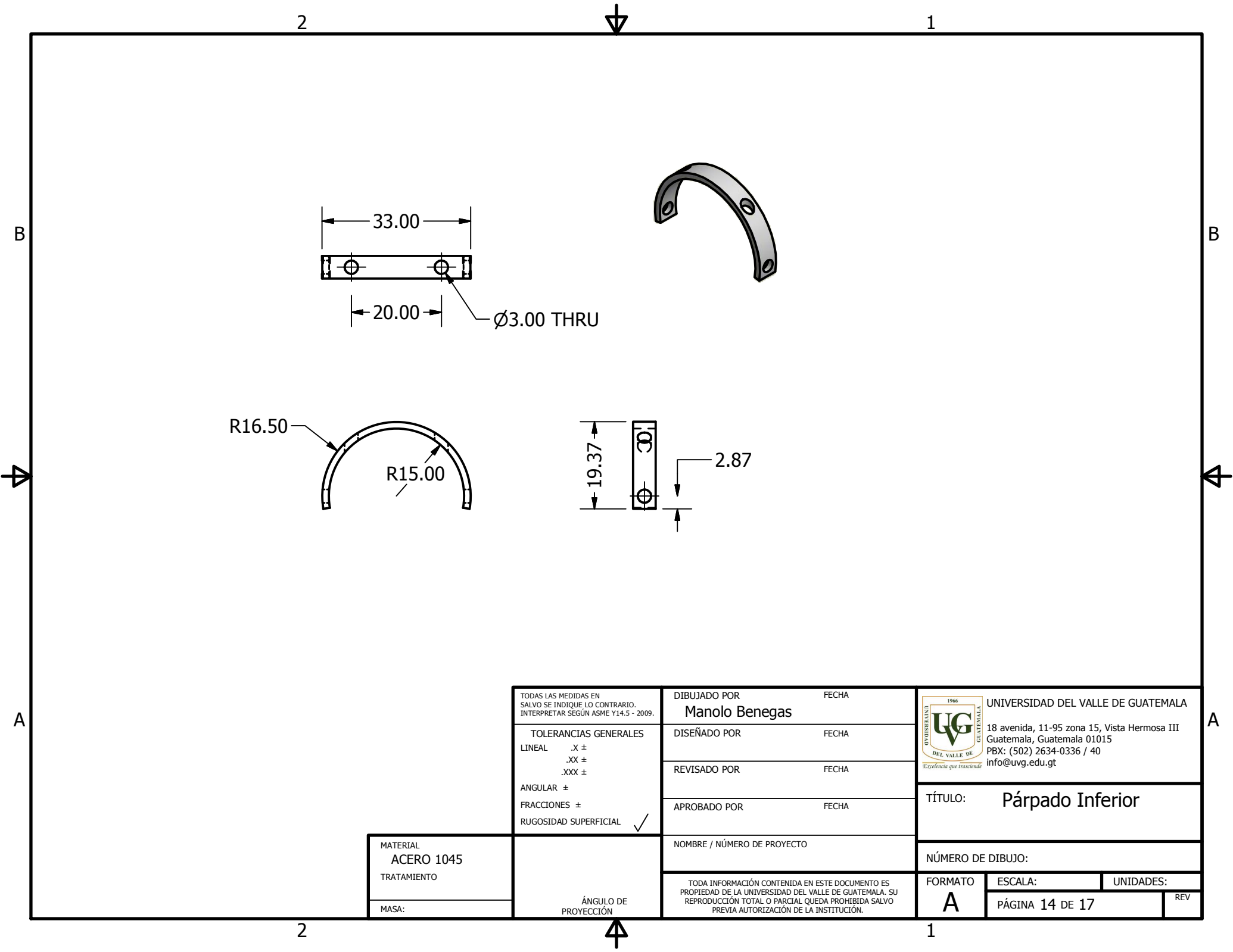
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



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: **Ojo**

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:

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

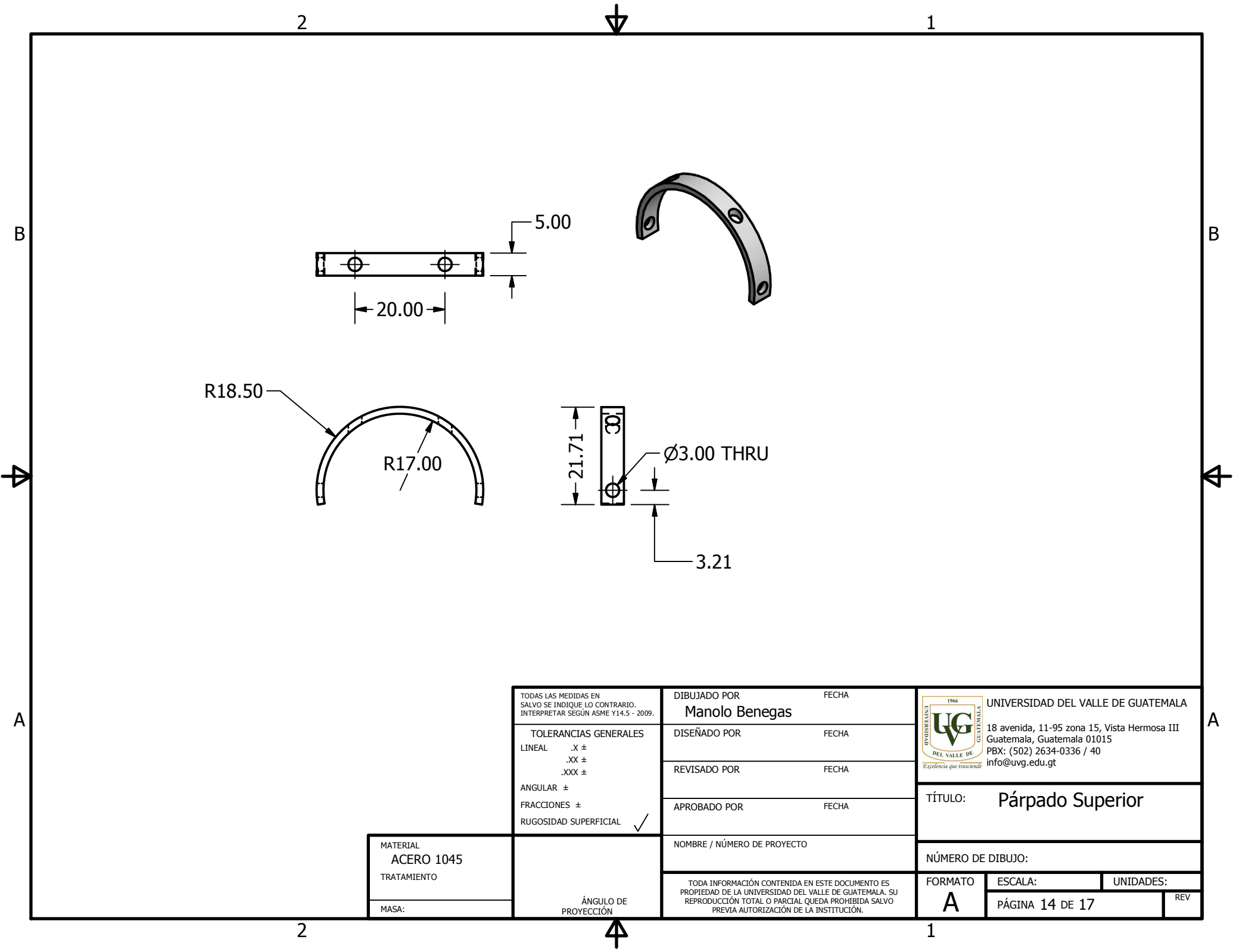
DIBUJADO POR	FECHA
Manolo Benegas	
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

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: **Párpado Inferior**

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:

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

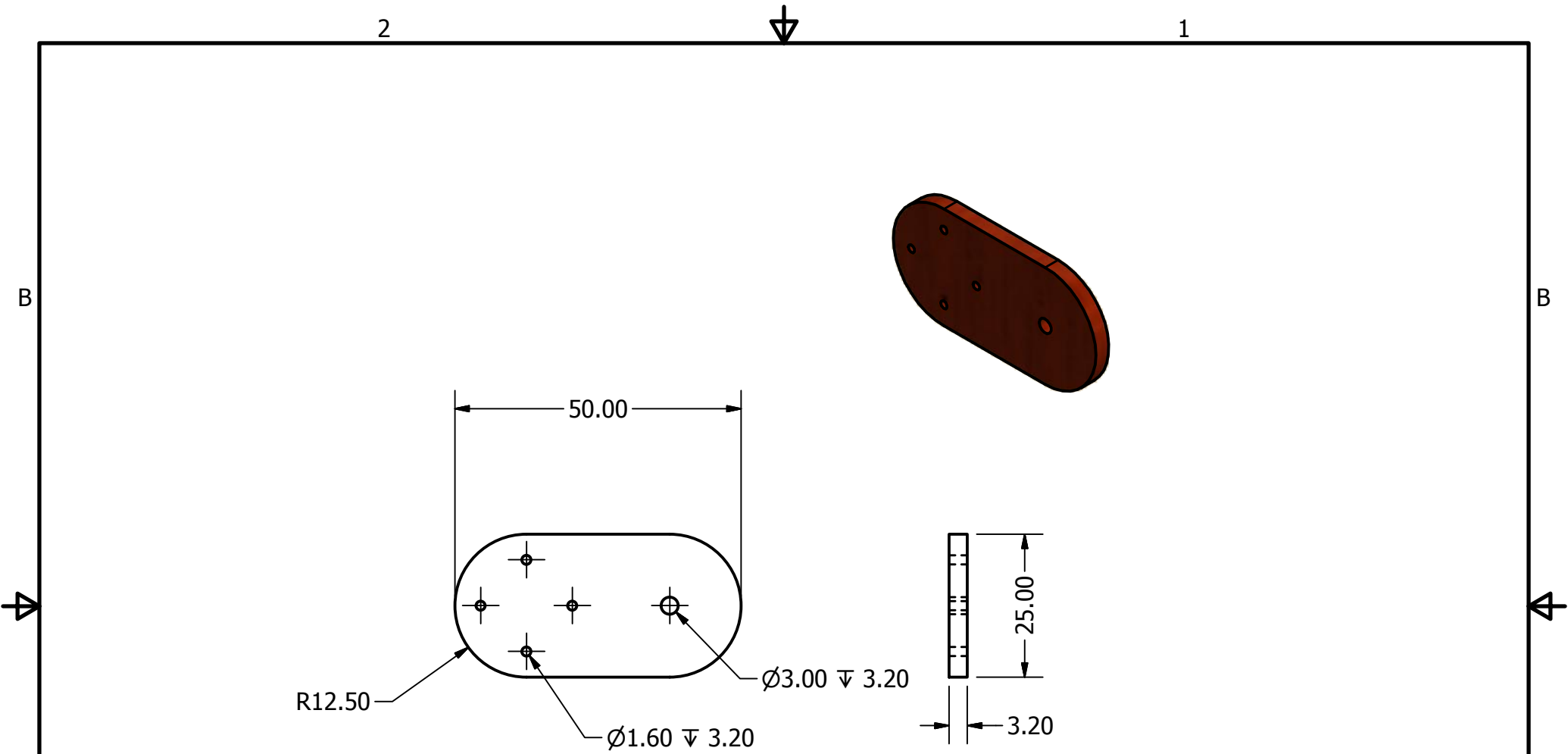
DIBUJADO POR	FECHA
Manolo Benegas	
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

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: **Párpado Superior**

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



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:

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

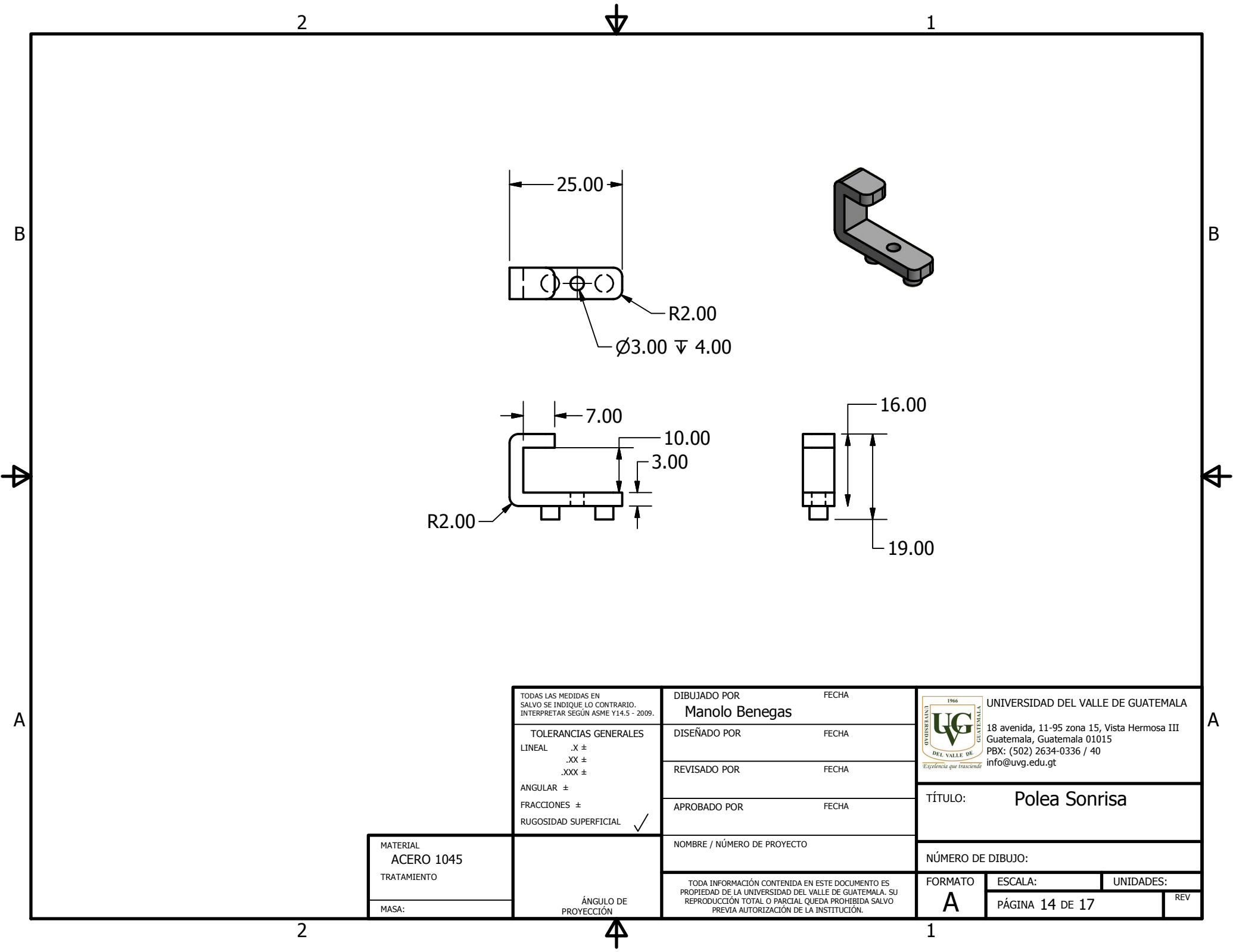
DIBUJADO POR	FECHA
Manolo Benegas	
DISEÑADO POR	FECHA
REVISADO POR	FECHA
APROBADO POR	FECHA
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO	

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: **Polea AX-12A**

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:	

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

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

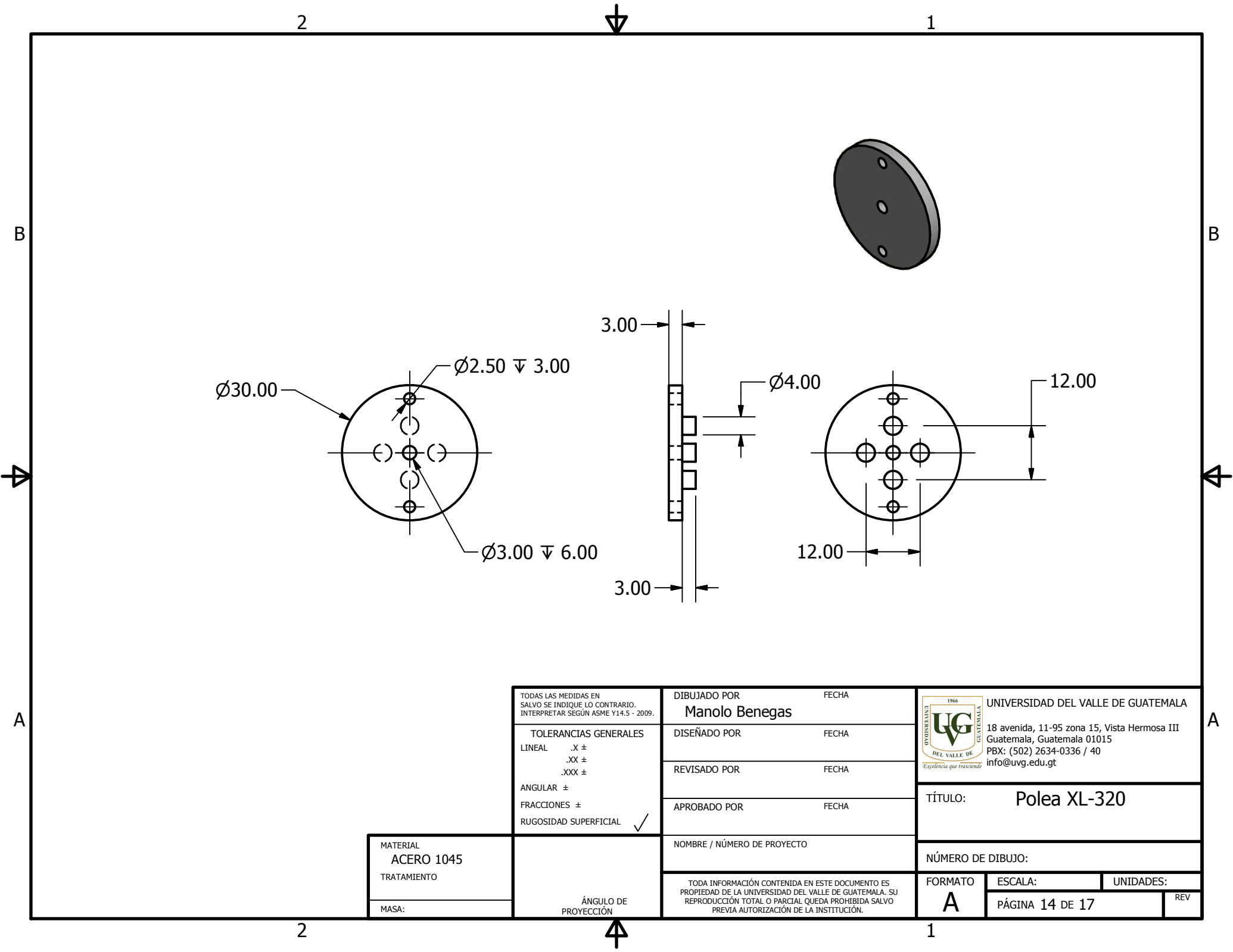
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.



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: Polea Sonrisa

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:	

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

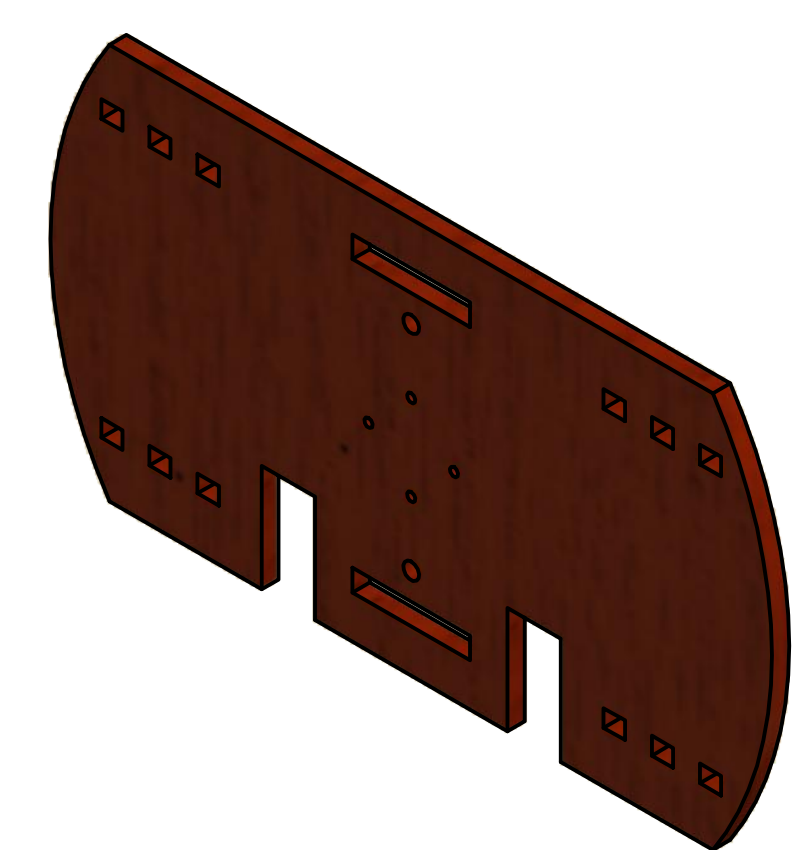
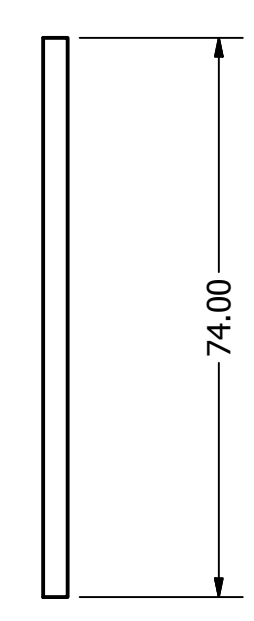
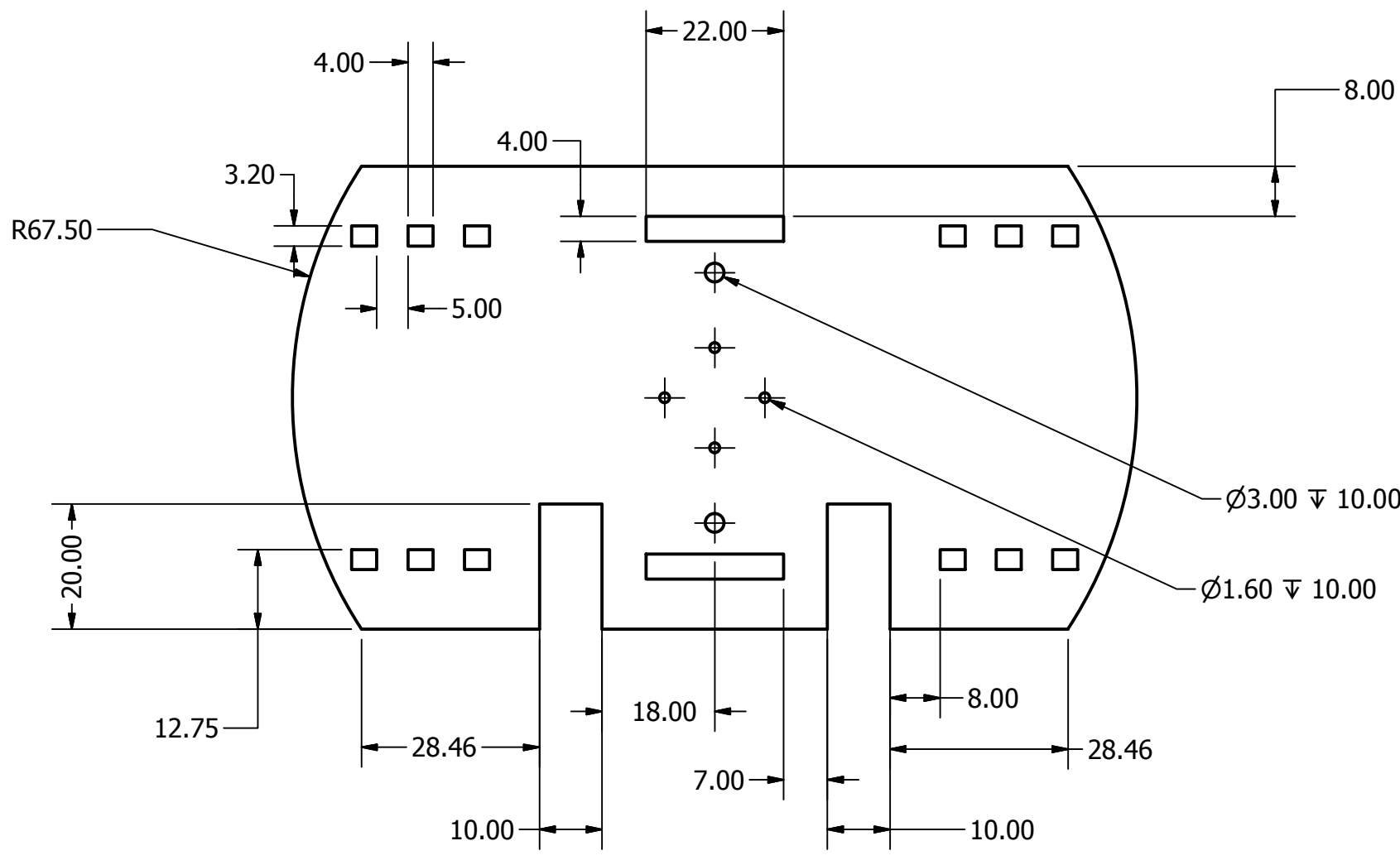
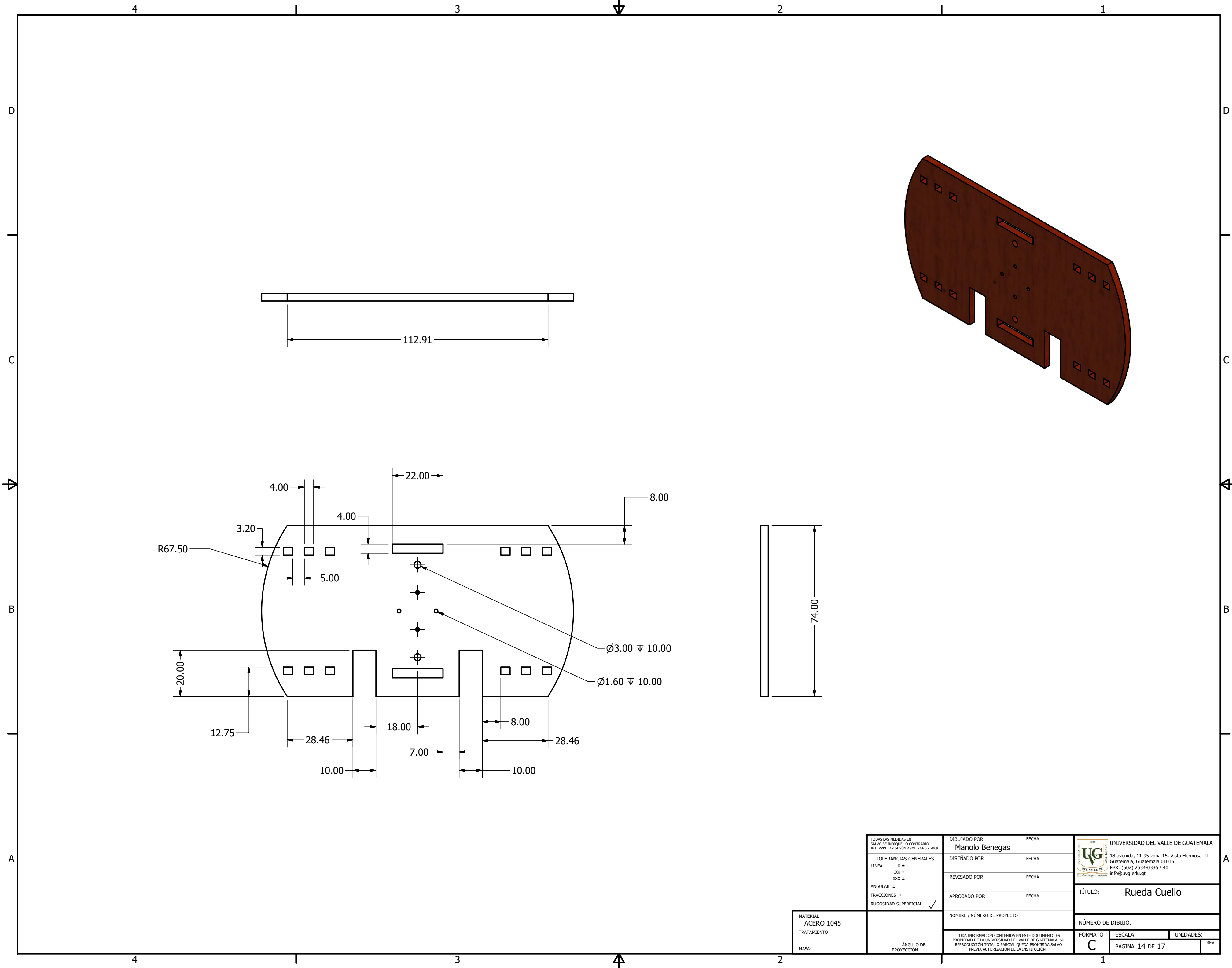
DIBUJADO POR	Manolo Benegas	FECHA	
DISEÑADO POR		FECHA	
REVISADO POR		FECHA	
APROBADO POR		FECHA	
NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO			

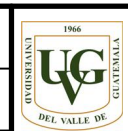
TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PREVIA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.

	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

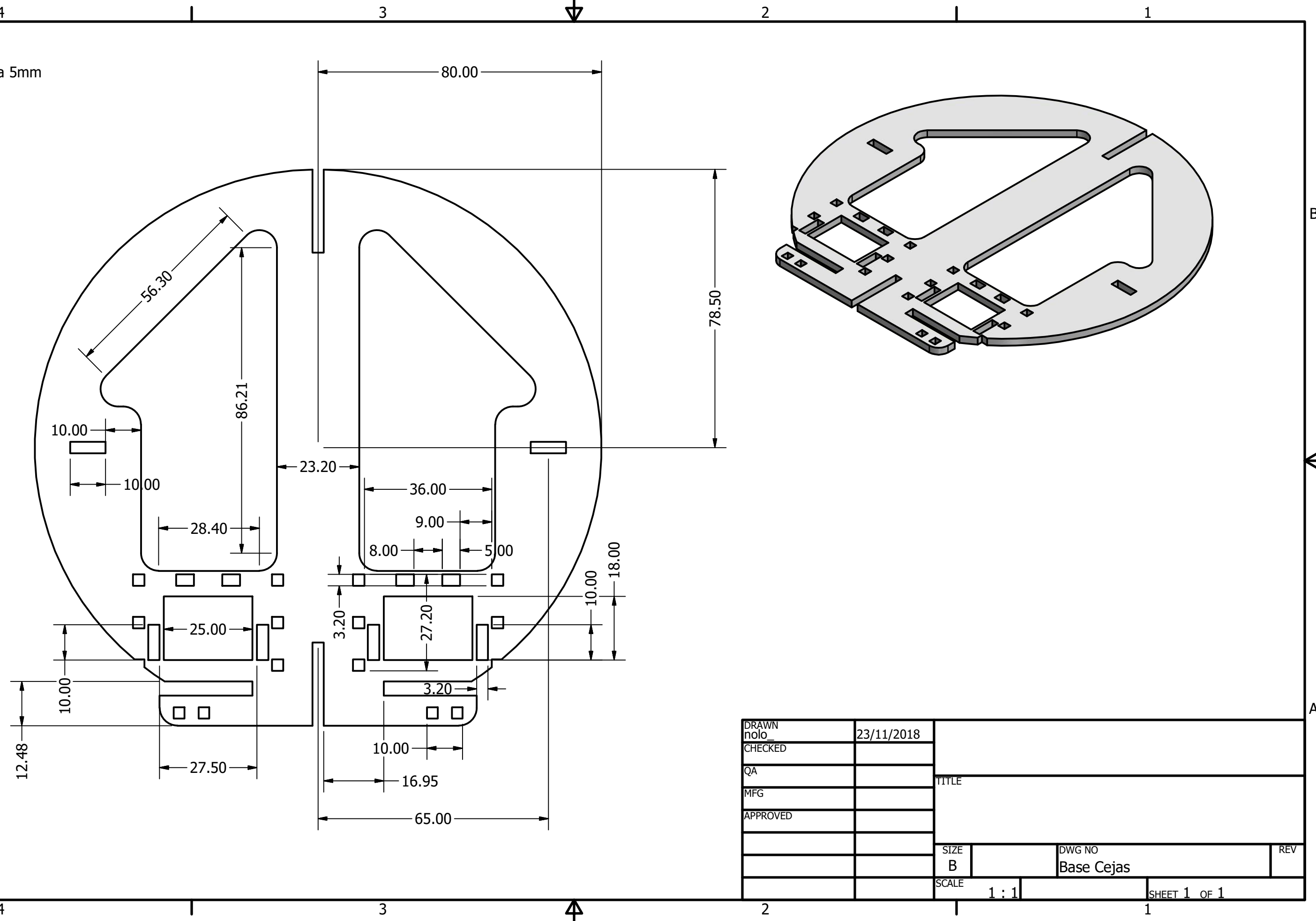
TÍTULO: Polea XL-320

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

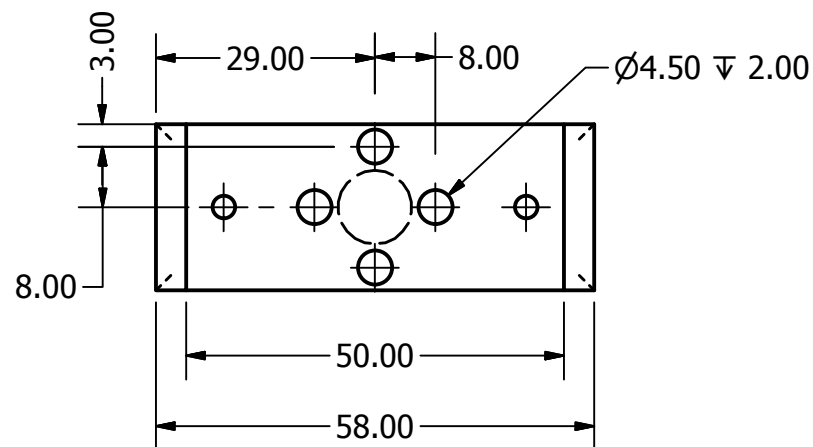
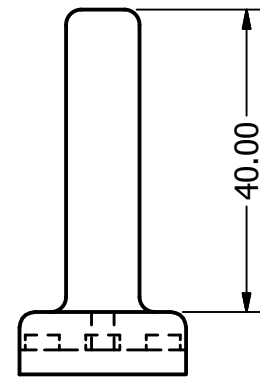
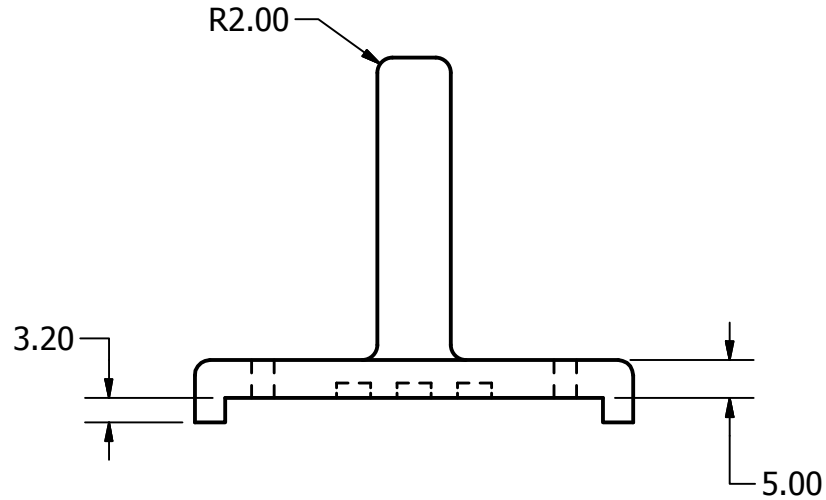
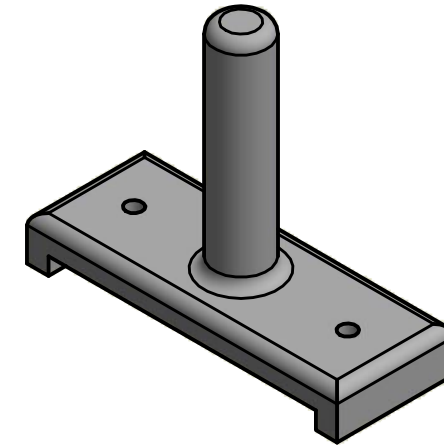
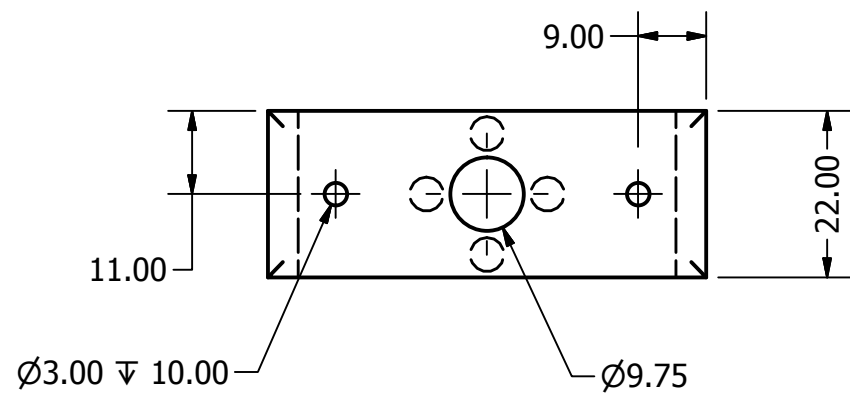



TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO, INTERPRETAR SEGÚN ASME Y14.5 - 2009.		DIBUJADO POR: Manolo Benegas FECHA:		 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336 / 40 info@uvvg.edu.gt	
TOLERANCIAS GENERALES LINEAL: .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ± FRACCIONES: ± RUGOSIDAD SUPERFICIAL: ✓		DISEÑADO POR: FECHA: REVISADO POR: FECHA: APROBADO POR: FECHA:		TÍTULO: Rueda Cuello	
MATERIAL: ACERO 1045 TRATAMIENTO: MASA:		NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO:		NÚMERO DE DIBUJO:	
ÁNGULO DE PROYECCIÓN:		ESCALA:		UNIDADES:	
		C		PÁGINA 14 DE 17	

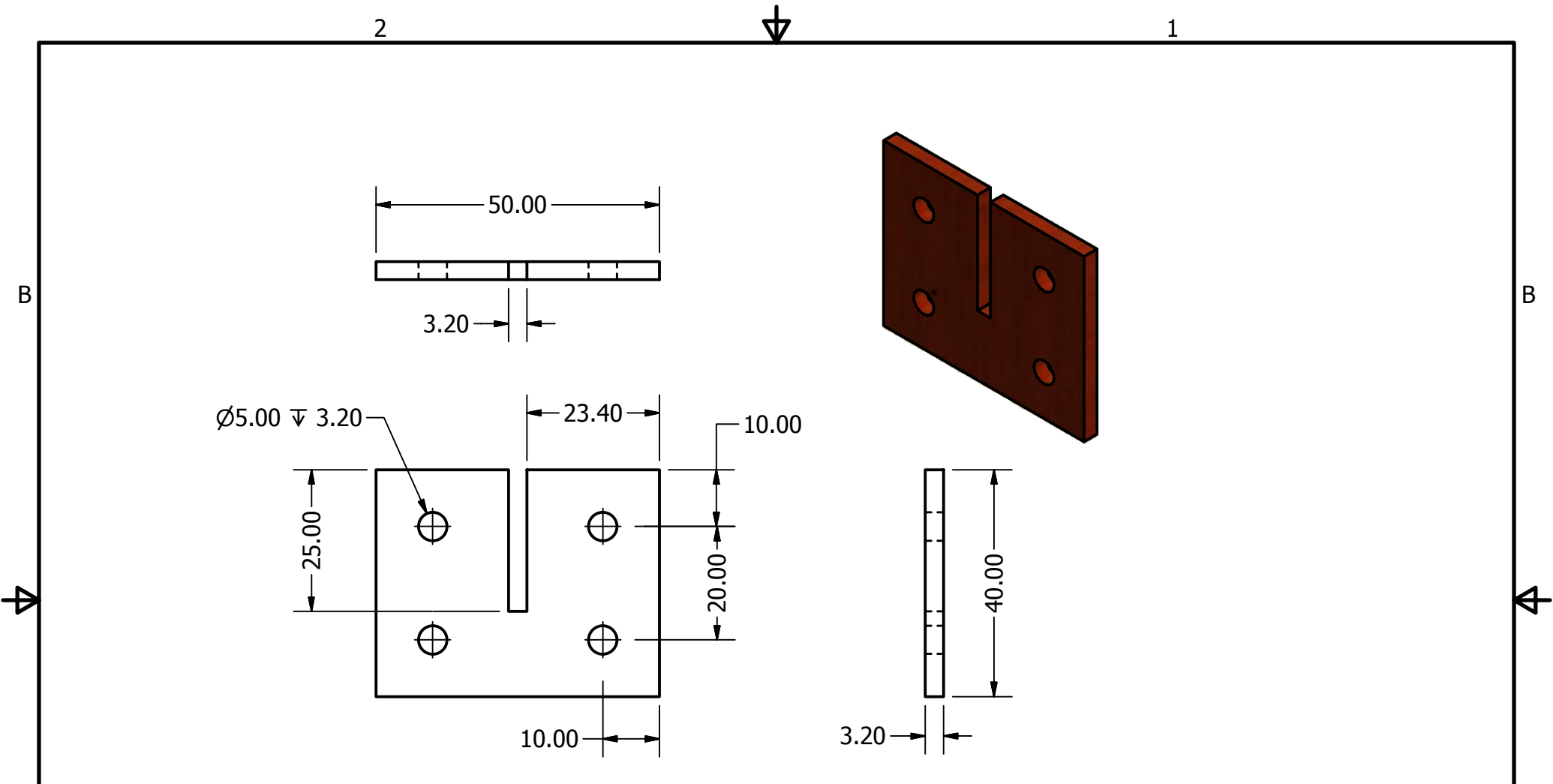
Todos los fillets a 5mm



DRAWN	nolo_	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			B	Base Cejas
			SCALE	REV
			1 : 1	
			SHEET 1 OF 1	



<p>TODAS LAS MEDIDAS EN SALVO SE INDIQUE LO CONTRARIO. INTERPRETAR SEGUN 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>
	Manolo Benegas		
	DISEÑADO POR	FECHA	
	REVISADO POR	FECHA	
	APROBADO POR	FECHA	TÍTULO: Base Cuello a Rueda
	NOMBRE / NÚMERO DE PROYECTO		NÚMERO DE DIBUJO:
MATERIAL	<p>ÁNGULO DE PROYECCIÓN</p>		FORMATO
ACERO 1045			B
TRATAMIENTO			ESCALA:
MASA:	<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>		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 ✓

MATERIAL
ACERO 1045

TRATAMIENTO

MASA:

ÁNGULO DE PROYECCIÓN

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

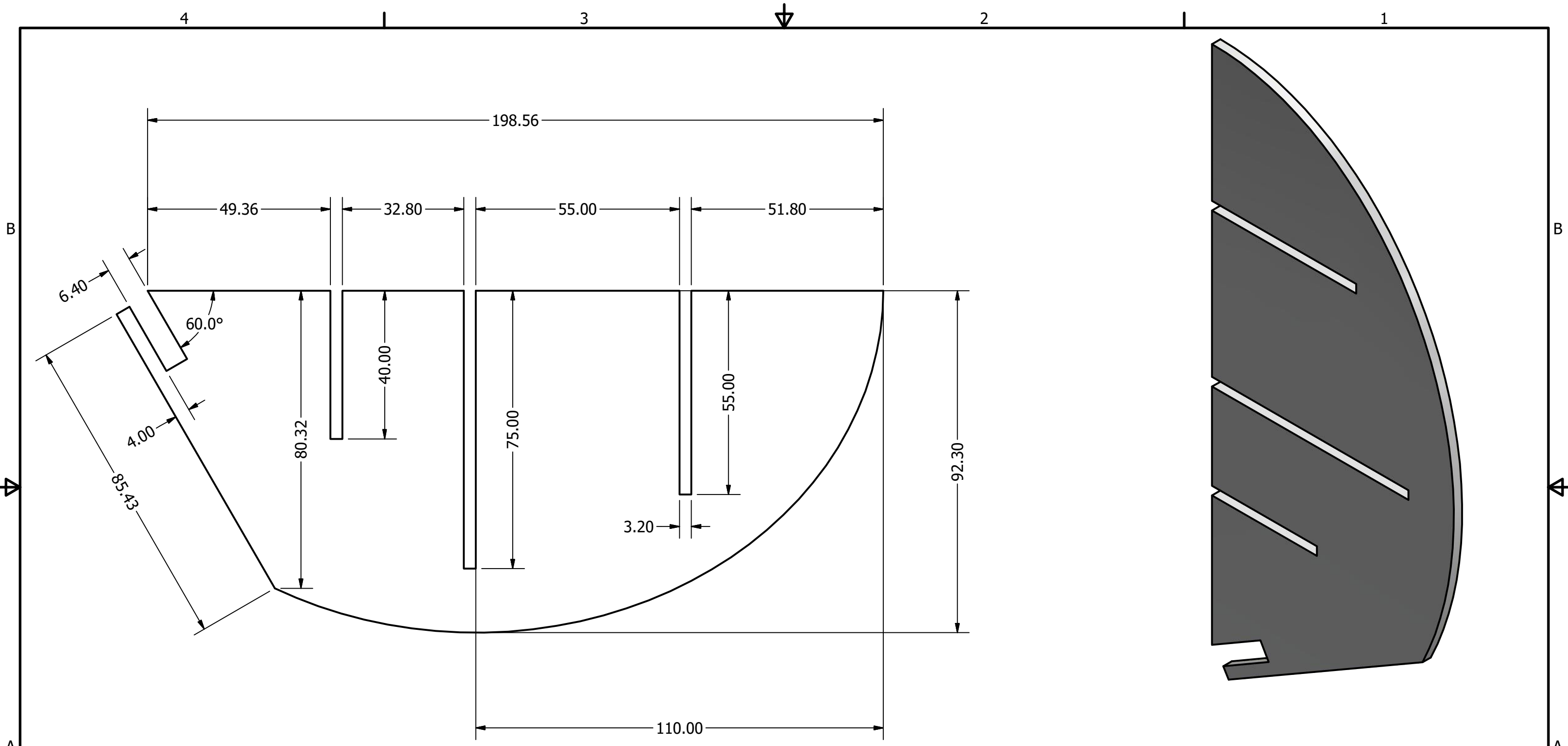
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

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

TÍTULO: **Base Cuello Pt2**

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

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.



DRAWN	nolo_	23/11/2018		
CHECKED				
QA			TITLE	
MFG				
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
			B	Base CaraTrasera
			SCALE	REV
			1 : 1	
			SHEET 1 OF 1	