
Rediseño e implementación de rostro animatrónico de Universidad del Valle de Guatemala

Mario Andrés Soto Fuentes



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Rediseño e implementación de rostro animatrónico de
Universidad del Valle de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Mario Andrés Soto Fuentes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2023

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Rediseño e implementación de rostro animatrónico de
Universidad del Valle de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Mario Andrés Soto Fuentes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

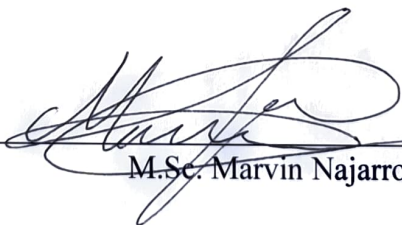
2023


Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Kurt Kellner

(f) 
M.Sc. Marvin Najarro

(f) 
M. Sc. Pedro Castillo

Ciudad de Guatemala, Guatemala, 4 de diciembre de 2023

El presente proyecto de graduación es el resultado de conocimientos obtenidos a lo largo de mi carrera universitaria, plasmados de forma creativa e innovadora. Un trabajo que no se hubiera podido llevar a cabo sin el incondicional apoyo de mi padre, Mario Soto, por su amor, por sus consejos y por darme la oportunidad de recibir la mejor educación a nivel universitario de Guatemala. A mi madre, Eunice Fuentes de Soto, por su amor, por su comprensión, por sus cuidados y por los valores que dejó en mí. A mis hermanas, Julia y Quetzalí, quiero expresar mi admiración y agradecimiento por impregnar en mí el deseo y la pasión por el estudio y conocimiento.

A cada uno de mis amigos y amigas hechos en esta etapa, sin el apoyo y ayuda de ellos no hubiera sido posible superar las experiencias complicadas a nivel académico. Quiero agradecer su ayuda en temas complicados por comprender a mi persona, por las risas y por las experiencias vividas.

También a cada uno de mis catedráticos y catedráticas por la paciencia y los conocimientos impartidos todos estos años en esta casa de estudios.

A mi persona, por no rendirse en los momentos complicados y por siempre mantenerse en la senda del conocimiento.

Prefacio	III
Lista de figuras	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Ameca, Robot de CES	2
2.2. Diseño mecánico de cabeza humana robótica animatrónica por el Ingeniero Manolo Enrique Benegas Villeda	3
2.3. Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con dieciocho grados de libertad con movimientos suaves por el Ingeniero Christopher Alexander Jenatz Melgar . . .	4
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo general	6
4.2. Objetivos específicos	6
5. Alcance	7
6. Marco teórico	8
6.1. Anatomía de los párpados	8
6.1.1. Porción orbitaria	9
6.1.2. Porción palpebral	9
6.1.3. Porción palpebral profunda (lagrimal)	9
6.2. Anatomía de las cejas	9
6.3. Anatomía del cuello	10
6.4. Mecanismos de cuatro barras	11
6.5. Mecanismos piñón - cremallera	12

6.6. Junta esférica	13
6.7. Junta universal	14
6.8. Mecanismo de polea	14
6.9. Análisis por von Mises	15
7. Evaluación del sistema mecánico actual implementado en el rostro animatrónico.	17
7.1. Ensamble inicial del rostro animatrónico en CAD	17
7.2. Ensamble inicial del rostro animatrónico en físico	18
8. Diseño mecánico original en ojos y párpados	20
9. Rediseño e implementación del sistema mecánico en ojos y párpados	23
10. Diseño mecánico original en cejas	27
11. Rediseño e implementación del sistema mecánico en cejas	30
11.1. Prototipo 1	30
11.2. Prototipo 2	33
12. Diseño mecánico original de cuello	37
13. Rediseño e implementación del sistema mecánico en cuello	39
14. Rediseño e implementación de piezas misceláneas	42
14.1. Cableado de motores SG90	46
15. Troubleshooting para Open CM9.04 y motores Dynamixel	47
15.1. Módulo microcontrolador OpenCM 9.04	47
15.2. Motores Dynamixel XL-320	50
15.3. Dynamixel Wizard	52
15.4. ID motores Dynamixel	53
16. Manuales implementados para el rostro animatrónico	54
16.1. <i>Manual de ensamble</i>	54
16.2. <i>Manual de mantenimiento</i>	56
17. Conclusiones	57
18. Recomendaciones	58
19. Bibliografía	60
20. Anexos	61

Lista de figuras

1. Robot Ameca desarrollado por Engineered Arts	2
2. Cabeza animatrónica por el Ingeniero Benegas	3
3. Cabeza animatrónica por el Ingeniero Jenatz	4
4. Músculo orbicular del ojo	8
5. Porción orbitaria y porción palpebral.	9
6. Músculo corrugador superciliar	10
7. Músculos del cuello	11
8. Mecanismo de cuatro barras de cadena cerrada	12
9. Mecanismo piñón - cremallera	12
10. Junta esférica	14
11. Junta universal	14
12. Mecanismo de poleas	15
13. von Mises	16
14. Rostro animatrónico por el Ingeniero Jenatz	18
15. Rostro animatrónico físico	19
16. Sistema de movimiento de ojos en CAD antiguo	20
17. Base de sistema para movimiento de ojos antiguo	21
18. Sistema mecánico antiguo para párpados	21
19. Análisis por von Misses del párpado anterior	22
20. Párpado superior antiguo	23
21. Rango de movimiento de párpado inferior	24
22. Párpado inferior anterior	24
23. Base para ojos y parpádos actual	25
24. Párpado superior nuevo en vista frontal	25
25. Párpado superior nuevo en vista trasera	25
26. Análisis por von Misses del nuevo párpado	26
27. Nuevo sistema mecánico para ojos y párpados	26
28. Sistema mecánico antiguo para ceja derecha en CAD	27
29. Sistema mecánico antiguo para ceja izquierda en CAD	28

30. Sistema mecánico antiguo para cejas en CAD	29
31. Análisis de esfuerzos por von Misses para la cremallera	29
32. Sistema mecánico en 'y' para ceja derecha	31
33. Sistema mecánico en 'y' para ceja izquierda	31
34. Mecanismo de piñón-cremallera para eje 'y' de cejas	32
35. Mecanismo de piñón-cremallera para eje 'x' de cejas	32
36. Mecanismo de movimiento para cejas	33
37. Motores implementados para movimiento en 'x' de las cejas	34
38. Ceja derecha	35
39. Ceja izquierda	35
40. Cejas implementadas	36
41. Mecanismo de poleas para cejas	36
42. Sistema mecánico antiguo para el cuello	37
43. Nueva pieza para cuello	39
44. Pieza modificada para cambiar posición de motores	40
45. Pieza modificada para buscar la simetría en el plano frontal	41
46. Módulo del cuello completo	41
47. Soporte de labios antiguo	42
48. Soporte modificado de labios, pómulos y base para ojos	43
49. Máxilar anterior	44
50. Máxilar frontal	44
51. Máxilar trasero	45
52. Análisis de esfuerzo por von Misses del maxilar frontal	45
53. Análisis de esfuerzo por von Misses del maxilar trasero	46
54. Ícono de R+ Manager 2.0	48
55. Interfaz de R+ Manager 2.0	48
56. Problema más común	49
57. Firmware Recovery para OpenCM 9.04	49
58. Proceso de Firmware Recovery para OpenCM 9.04	50
59. Switch implementado en OpenCM 9.04	50
60. Selección de XL-320 en R+ Manager 2.0	51
61. Firmware Recovery de motor XL-320	52
62. Ícono de Dynamixel Wizard	52
63. Interfaz de Dynamixel Wizard	53
64. Índice del manual de ensamblaje	55
65. Página 3 del manual de ensamblaje	55
66. Índice del <i>Manual de mantenimiento</i>	56
67. Página 3 del <i>Manual de mantenimiento</i>	56

El presente trabajo de graduación tiene como objetivo principal el rediseño e implementación de párpados, cejas y cuello del rostro animatrónico de la Universidad del Valle de Guatemala, trabajo previamente desarrollado por el [1] Ingeniero Jenatz. Por lo que se realizaron distintas propuestas de diseño mecánico para cada una de las partes anteriormente mencionadas. Adicionalmente, también se rediseñaron piezas para el soporte de los ojos y de los párpados que requerían de un cambio en el diseño mecánico. Todo esto ayudaba a resolver los objetivos de rediseñar las piezas que tuvieran un fallo mecánico fácil y que se mejorarán los movimientos de varios mecanismos que simulan ser músculos del rostro, todo de forma innovadora.

Se mantuvieron los servo motores de las cejas, de los párpados y de los ojos, pues estos cumplían con ser lo suficientemente livianos para no afectar a la piezas que los cargaban y ejecutar un movimiento fluido. Los motores encargados del movimiento de la mandíbula tampoco se cambiaron pues cumplían con ser precisos. Para el movimiento del cuello, tampoco se decidió cambiar los motores pues con un nuevo diseño mecánico pudieron soportar el peso completo del rostro animatrónico. Aunque este cambio en el diseño vio afectado el rango de movimiento del rostro respecto al cuello, por lo que se recomienda en un futuro hacer el cambio de motores por unos de alto torque.

Posteriormente se realizó un análisis en las piezas físicas que se tenían del trabajo anterior y se determinó cuales eran los mayores problemas que se tenían, además, algunas partes y piezas no estaban completas por lo que se decidió volver a hacer su manufactura para su posterior uso y análisis. Las partes más afectadas del rostro animatrónico eran el área de las cejas, ya que estas no se encontraban completas y también algunas piezas se encontraban rotas o desgastadas. El área de los párpados no se encontraba ensamblada y algunas piezas principales como los párpados no se encontraban manufacturadas. A raíz de esto, se realizó cambios en el diseño de las cejas y párpados para que estas no fallaran mecánicamente y mantuvieran un movimiento fluido que permitiera la correcta expresión del rostro, en el que se hicieron pruebas mecánicas principalmente con dos materiales, los cuales fueron PLA y Resina.

Para el mecanismo del cuello, se utilizó como pieza principal el eje universal con el que ya se contaba para poder mantener un mecanismo de 4 barras simple, con la diferencia que

se realizó una nueva propuesta de diseño con los motores previamente utilizados por lo que se rediseñaron las bases del rostro para poder acoplarlo al cuello y que funcione de manera correcta, además se mantuvo el motor encargado de la rotación del cuello pues este aún cumplía con las especificaciones necesarias. Se culminó el diseño creando una camino de routeo para que tener un cableado que no interviniera en el movimiento completo del rostro, todo esto se ordenó y se clasificó pues se usan un total de 19 motores conectados a la fuente de poder que alimenta al proyecto completo.

Adicionalmente se modificaron los motores sg90 en su diseño para poder adaptarlos al uso requerido en el rostro, también a estos motores se le hizo una modificación en el largo del cable de los mismos para extenderlos y no generar molestias durante pruebas y funcionamiento completo del rostro.

También se realizó una investigación de troubleshooting para el funcionamiento del módulo Open CM9.04, encargado del funcionamiento de los motores Dynamixel, que son los motores XL-320 y los motores AX-12A. En esta investigación se hace una recopilación de errores comunes y la forma segura de resolverlos y evitar malfunciones o cambios remplazos innecesarios en módulo o motores.

Por último, se trabajó en la implementación de manuales de ensamblaje, mantenimiento y uso del rostro animatrónico, esto para darle mayor tiempo de vida a cada componente que conforma el rostro y facilitar el uso del sistema completo.

The main objective of this graduation project is the redesign and implementation of the eyelids, eyebrows and neck of the animatronic face of the Universidad del Valle de Guatemala, work previously developed by [1] Engineer Jenatz. Therefore, different mechanical design proposals were made for each of the aforementioned parts. Additionally, parts for the support of the eyes and eyelids that required a change in the mechanical design were also redesigned. All of this helped to solve the objectives of redesigning parts that had easy mechanical failure and improving the movements of various mechanisms that simulate facial muscles, all in an innovative way.

The servo motors for the eyebrows, eyelids and eyes were maintained, as they had to be light enough not to affect the parts that carried them and to execute a fluid movement. The motors in charge of the movement of the jaw were not changed either because they had to be precise. For the movement of the neck, it was not decided to change the motors either because with a new mechanical design they could support the full weight of the animatronic face. Although this change in the design affected the range of movement of the face with respect to the neck, so it is recommended in the future to change the motors for high-torque ones.

Subsequently, an analysis was carried out on the physical pieces that were from the previous work and it was determined which were the biggest problems that were had, in addition, some parts and pieces were not complete, so it was decided to redo their manufacture for later use and analysis. The most affected parts of the animatronic face were the area of the eyebrows, since these were not complete and some pieces were also broken or worn. The eyelid area was not assembled and some major parts such as the eyelids were not manufactured. As a result of this, changes were made to the design of the eyebrows and eyelids so that they did not fail mechanically and maintained a fluid movement that allowed the correct expression of the face, in which mechanical tests were carried out mainly with two materials, which were PLA and Resin.

For the neck mechanism, the universal axis that was already available was used as the main piece in order to maintain a simple 4-bar mechanism, with the difference that a new design proposal was made with the motors previously used, so the bases of the face were redesigned to be able to attach it to the neck to work correctly, in addition the motor in charge

of the rotation of the neck was maintained because it still met the necessary specifications. The design was completed by creating a routing path so that there is a wiring that does not intervene in the complete movement of the face, all this was ordered and classified since a total of 19 motors connected to the power source that feeds the entire project are used. .

Additionally, the sg90 motors were modified in their design to be able to adapt them to the required use on the face, a modification was also made to these motors in the length of their cables to extend them and not generate discomfort during tests and full operation of the face.

A troubleshooting investigation was also carried out for the operation of the Open CM9.04 module, in charge of the operation of the Dynamixel engines, which are the XL-320 engines and the AX-12A engines. In this investigation, a compilation of common errors is made and the safe way to solve them and avoid malfunctions or unnecessary changes or replacements in modules or motors.

Finally, work was done on the implementation of assembly, maintenance and use manuals for the animatronic face, this to give more life time to each component that makes up the face and facilitate the use of the complete system.

En este trabajo se encontraran propuestas nuevas de diseño mecánico para el movimiento de los párpados, cejas y cuello en el cual también se le realizaron los análisis de esfuerzos a las piezas que se encuentran bajo mayor esfuerzo. Se concentró el rediseño en estas partes pues las cejas no eran simétricas y no daban una apariencia física ni estética real al rostro. Los párpados no tenían un rango de movimiento muy amplio y las piezas tenían que ser reemplazadas con alta frecuencia pues se rompían fácilmente. Los ojos a pesar de tener buen movimiento, se modificaron ciertas partes de su mecanismo para ayudar al movimiento de los párpados. El mecanismo del cuello no permitía que el peso completo de la cabeza cayera sobre el cuello pues este se caía y no permitía un movimiento de arriba a abajo.

Las propuestas de rediseño para las cejas cuentan con un innovador sistema de poleas y de piñón - cremallera que permite que cada ceja sea independiente una de la otra y pueda llegar a cualquier punto en un plano 'x', 'y'.

Para los párpados se utilizaron distintos materiales y se determinó que en este caso, la resina, era el material que mejor se adaptava para utilizarlo en este mecanismo, también, se hicieron cambios en varias piezas para evitar un desgaste de las mismas.

Para el cuello se cambió por completo el diseño, hasta encontrar el punto de equilibrio de la cabeza para que el mecanismo de 4 barras fuera capaz de proporcionar un movimiento de arriba a abjo sin ningún problema.

2.1. Ameca, Robot de CES

Uno de los ejemplos más modernos y con mayor desarrollo en el mundo de la animatrónica es [\[2\]](#) Ameca en su primera generación, un robot creado por la compañía Engineered Arts como se ve en la Figura [\[1\]](#). Este robot cuenta con sensores que pueden rastrear movimiento en una habitación completa, reconocimiento facial, etc. Es capaz de gesticular varias expresiones en las que destacan varios ejemplos como, bostezar, sonreír, sorprenderse o enojarse. Puede articular hasta 51 movimientos y cuenta con 52 motores.



Figura 1: Robot Ameca desarrollado por Engineered Arts

2.2. Diseño mecánico de cabeza humana robótica animatrónica por el Ingeniero Manolo Enrique Benegas Villeda

La primera propuesta de una cabeza animatrónica en la Universidad del Valle de Guatemala, fue presentada en [3] por el Ing. Manolo Enrique Benegas Villeda en el año 2018, que tuvo el resultado final que se puede observar en la Figura 2. Durante su investigación resaltan el estudio de la anatomía de la cara y de sus rangos, como los músculos de los ojos, parpados, cejas, boca y cuello, en los que se enfocó de ciertos movimientos específicos para que la cabeza animatrónica tuviera la capacidad de replicarlos.

En este trabajo también se investigó acerca de los actuadores y materiales que compondrían la cabeza, en los que resaltan el uso de motores dynamixel xl-320, HS-322 HD, dynamixel ax-12a. Esta cabeza animatrónica se encuentra principalmente compuesta por material MDF de 3.2 mm y material PLA.

Los mecanismos que se utilizaron para la replicación de los movimientos de la cara en su mayoría fueron mecanismos de cuatro barras. Cabe mencionar que todo el proceso de diseño se realizó en el programa Autodesk Inventor 2017.

Finalmente se realizó un estudio y análisis de esfuerzos para los materiales de diseño y no de los materiales del prototipo para verificar que no se tuvieran fallas con las cargas bajas con las que se estaba trabajando.

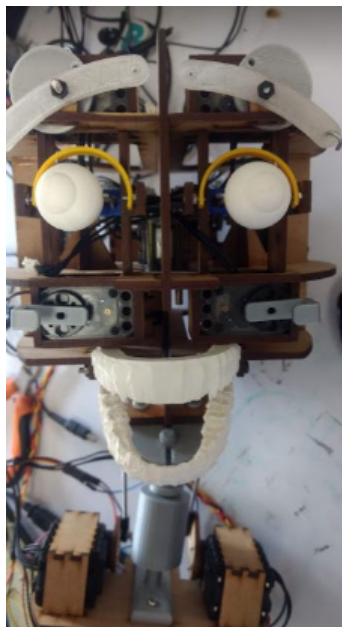


Figura 2: Cabeza animatrónica por el Ingeniero Benegas

2.3. Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con dieciocho grados de libertad con movimientos suaves por el Ingeniero Christopher Alexander Jenatz Melgar

El rediseño y reensamblaje de la cabeza animatrónica que se utilizará de base para este trabajo de graduación tuvo su face inicial en el año 2020, presentada en [1] por el Ingeniero Jenatz, que tuvo como objetivo principal el diseño mecánico, electrónico y de control mediante software para simular los movimientos de una cabeza humana, como se puede ver en la Figura 3. Siguiendo el mismo criterio de diseño del Ingeniero Benegas, se buscó simular los movimientos musculares escogiendo únicamente ciertos músculos específicos pues no era viable asignar un motor por músculo.

Con esta investigación, a través de la plataforma Matlab, se logró hacer la simulación de los movimientos de la cabeza, los cuales permitieron obtener los rangos de funcionamiento.

Todo el proceso de diseño mecánico se realizó a través del Software CAD Autodesk Fusion 360, lo que posteriormente permitió realizar el proceso de manufactura a través de impresión 3D. Posteriormente se realizó el diseño de una placa PCB en la plataforma Altium Designer para conectar con mayor facilidad con actuadores, drivers y fase de alimentación.

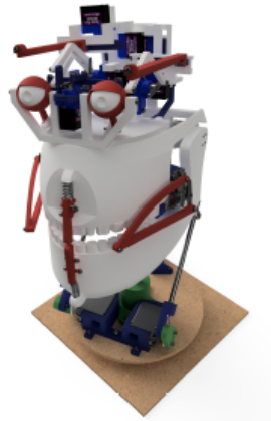


Figura 3: Cabeza animatrónica por el Ingeniero Jenatz

La presente propuesta de rediseño se llevará a cabo sobre el proyecto realizado en [1] por el ingeniero Jenatz, trabajo en el que se observa errores y fallos en el movimiento de los músculos de los párpados, cejas y cuello.

Rediseñar el movimiento de y párpados es importante pues se encuentran fracturados y son propensas a tener alguna falla mecánica como se ha observado en versiones anteriores del modelo. Además, el movimiendo de estos músculos ayuda a que el rostro pueda ser expresivo y tenga más realismo. En el caso de las cejas, el diseño implementado actualmente no es el más optimo por lo que se realizarón distintas propuestas de diseño mecánico.

Otras complicaciones para resolver que se presentan en el movimiento del rostro animatrónico, es el movimiento y soporte del cuello que se encarga de resistir el peso de la cabeza completa. Resolver este problema es importante pues el mecanismo implementando actualmente no es capaz de soportar su propio peso por lo que tiene un rango de movimiento limitado y puede causar algunos daños cuando falla, como fracturar piezas encargadas del gesto del rostro o arruinar los motores que lo sostienen pues se están sobre esforzando.

El resolver los problemas anteriormente mencionadas permitirá que el rostro animatrónico se encuentre completo en su estado de fabricación y manufactura y permitiría seguir con el desarrollo de animatrónicos en la Universidad del Valle de Guatemala, además de darle uso al presente proyecto puramente académico con el fin de continuar con proyectos de innovación y tecnología.

4.1. Objetivo general

Rediseñar e implementar el rostro animatrónico de la Universidad del Valle de Guatemala.

4.2. Objetivos específicos

- Evaluar el sistema mecánico actual implementado en el rostro animatrónico.
- Rediseñar e implementar el sistema mecánico de las cejas, párpados y cuello del rostro animatrónico.
- Implementación de manuales del proyecto.

El rostro animatrónico rediseñado en el año 2023, pretende avanzar en el diseño asistido por computadora, diseño mecánico de párpados, cejas y cuello. También en la implementación de manuales de mantenimiento y ensamblaje en versiones anteriores por estudiantes de la Universidad del Valle de Guatemala.

La propuesta de rediseño se centra en los párpados, cejas y cuello del rostro animatrónico, por lo que se buscó que estos tuvieran un mejor desempeño y mejorar el diseño mecánico en los mismos. Esto resultó en que los mecanismos se encargaran de replicar los movimientos de los músculos de estas partes de manera fluida. Se implementó un nuevo programa para el diseño asistido por computadora que fue Autodesk Inventor para tener un mejor control sobre cada pieza y sus características, lo que permitía que bosquejos y características en 3D fueran independientes el uno del otro sin perder características del árbol de operaciones.

Posteriormente se agregan manuales de ensamblaje, que incluye como armar y ensamblar cada módulo del rostro con una lista de partes incluida, y un manual de mantenimiento que incluye mantenimiento preventivo, correctivo y continuo, para alargar la vida útil de cada uno de los componentes del rostro animatrónico.

De forma extra, también se rediseñaron otras partes del rostro animatrónico como lo es el maxilar y ciertas partes que se encargan de sostener la estructura completa de los párpados y ojos.

6.1. Anatomía de los párpados

El músculo orbicular del ojo forma parte del grupo de los músculos de la cara que se llaman músculos de la mímica, como se muestra en la Figura 4 coloreado en verde. La función de este músculo depende de qué parte del músculo se contraiga. La contracción de la porción orbitaria lleva la piel de la frente y mejilla hacia la nariz y cierra fuertemente el ojo, en forma de protección. La porción palpebral se encarga de un control más fino de los párpados que los cierra de forma suave durante el sueño o durante el pestañeo. Tiene forma circular que rodea la abertura de la órbita y el área peri orbitaria 4.



Figura 4: Músculo orbicular del ojo

Este se compone de tres porciones que son:

6.1.1. Porción orbitaria

Esta es la parte más periférica y se encarga de cubrir el margen de la órbita como se indica en la Figura 5. Tiene su origen en la porción nasal del hueso frontal, en el proceso frontal del maxilar y en el ligamento palpebral medial. Sus fibras rodean la órbita y se insertan en los tejidos blandos adyacentes 5.

6.1.2. Porción palpebral

Es la parte central del músculo y se encuentra bajo la piel de los párpados 5. Tiene su origen en el ligamento palpebral medial y se inserta en el ligamento palpebral lateral como se indica en la Figura 5.

6.1.3. Porción palpebral profunda (lagrimal)

Esta es la porción más profunda de las tres y se encuentra entre el ligamento palpebral medial y la cresta lagrimal posterior de donde se originan. Pasan lateral y posterior al saco lagrimal insertándose en los tarsos superior e inferior y en el ligamento palpebral medial 5. Hay que mencionar que, de las tres porciones de músculos, este no es de suma importancia para el desarrollo de nuestro trabajo.

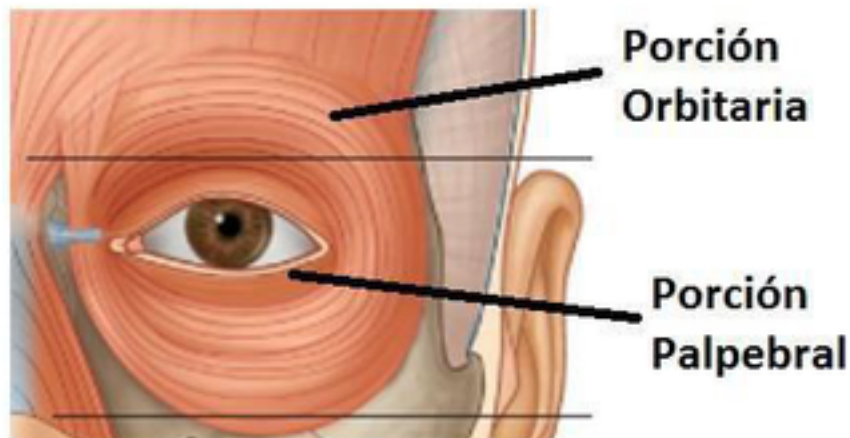


Figura 5: Porción orbitaria y porción palpebral.

6.2. Anatomía de las cejas

El músculo corrugador superciliar como se muestra en la Figura 6 coloreado en verde, es delgado y profundo, se encuentra ubicado en el extremo medial de las cejas. Tiene su origen cerca de la extremidad medial del arco superciliar en el hueso frontal y se extiende

lateral y superiormente para insertarse en la piel del tercio medio de la ceja [4]. Cuando se contrae, este músculo lleva las cejas medial e inferiormente y produce arrugas verticales en la glabella, que se conoce comúnmente como 'fruncir el ceño'.



Figura 6: Músculo corrugador superciliar

6.3. Anatomía del cuello

Los músculos del cuello se muestran en la Figura [7] se encargan mayormente del movimiento de la cabeza en cualquier dirección y se dividen en 3 grupos principales que son: músculos anteriores, músculos laterales y músculos posteriores. La posición del grupo de músculos normalmente se relaciona con su función. Un ejemplo son los músculos posteriores, que tienen la función de la extensión del cuello [6].

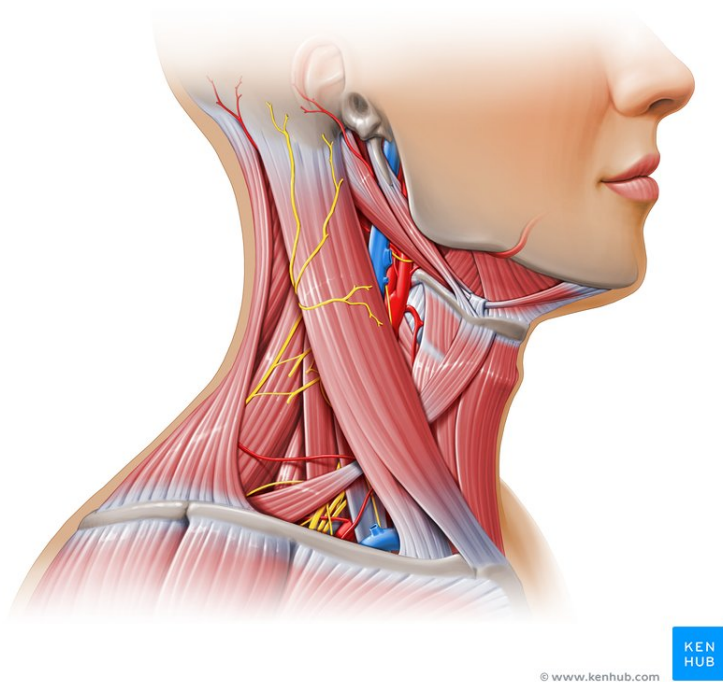


Figura 7: Músculos del cuello

6.4. Mecanismos de cuatro barras

Un mecanismo de cuatro barras es aquel que se encuentra formado por tres barras móviles y una fija que normalmente es tierra, todas unidas por articulaciones tipo revoluta como se muestra en la Figura 8. La ley de Grashof en la ecuación 1, puede determinar si el mecanismo es capaz de que una de sus barras recorra una revolución completa. En donde S es la longitud del eslabón más corto, L es la longitud del eslabón más largo, P es el primer eslabón restante y Q el segundo eslabón restante 7.

$$S + L \leq P + Q \quad (1)$$



Figura 8: Mecanismo de cuatro barras de cadena cerrada

Se habla de este mecanismo pues se encuentra implementado en el diseño del rostro animatrónico y se hizo una propuesta de diseño para el mecanismo de los párpados guiándose de este tipo de mecanismo, que ayuda al movimiento fluido del músculo de los párpados.

6.5. Mecanismos piñón - cremallera

Un mecanismo piñón - cremallera es un actuador lineal que se encuentra compuesto por un par de engranajes que convierten un movimiento rotativo en un movimiento lineal [8]. Consiste en un engranaje que recibe el nombre de 'piñón' y de dientes embragados sobre una barra dentada llamada 'cremallera' como se puede ver en la Figura 9.

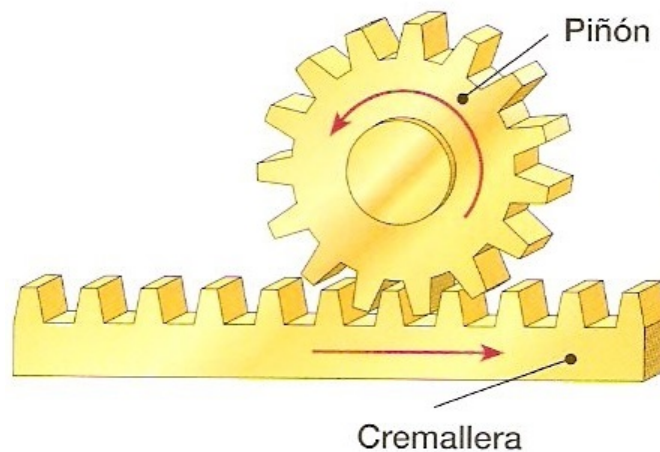


Figura 9: Mecanismo piñón - cremallera

Para realizar los cálculos de un mecanismo piñón - cremallera se debe saber que el módulo, es la unidad de medida que indica el tamaño de un piñón de engranaje. Es decir, es la relación del diámetro de referencia del piñón de engranaje dividido entre el número

de dientes. Para entenderlo mejor, se muestra la ecuación [2](#) a continuación, en donde M es Módulo, número de dientes es z y diámetro de referencia es D:

$$M = \frac{D}{z} \quad (2)$$

Luego en la ecuación [3](#) podemos comprender como es posible calcular el Diámetro Primitivo que es d.

$$d = mz \quad (3)$$

La ecuación [4](#) nos muestra cómo se calcula el paso primitivo que es P:

$$P = \pi m \quad (4)$$

Comúnmente, cuando se utiliza este mecanismo, lo que se busca es conocer la cantidad de vueltas que debe dar el piñón sobre la cremallera para recorrer una distancia lineal, por lo que es conveniente conocer la ecuación [5](#) que describe el número de pasos np, en donde la longitud de cremallera es L:

$$np = \frac{L}{P} \quad (5)$$

Con esto podemos llegar a la ecuación [6](#) que finalmente nos indica el número de vueltas nv que deberá dar el piñón:

$$nv = \frac{np}{z} \quad (6)$$

Con esto es posible determinar cuántas vueltas son necesarias para que se pueda recorrer la distancia lineal deseada, este mecanismo se incluye pues es posible hacer una propuesta de diseño con él.

6.6. Junta esférica

Las juntas esféricas, como se ve en la Figura [10](#), son importantes pues pueden actuar como un punto de pivote, tienen 3 grados de libertad y trabajan como las articulaciones de la cadera humana. Es por esta razón que se decide utilizarla para implementarla en el mecanismo del cuello. Se pueden encontrar muchas en el mercado actual que están destinadas para distintos usos o se puede realizar el diseño de una [7](#).



Figura 10: Junta esférica

6.7. Junta universal

Las juntas universales, como se ve en la Figura 11, son un tipo de junta o acoplamiento que conectan dos varillas rígidas entre sí. Se utiliza en la industria automotriz y también en el área de la robótica 7.



Figura 11: Junta universal

6.8. Mecanismo de polea

La polea es un mecanismo que se encuentra compuesto por una rueda que gira sobre un eje, esta rueda cuenta con un canal o carril en el cual pasa una cuerda, una banda o

un hilo como se puede observar en la Figura 12, de esta manera al estar acoplada a un motor, se puede obtener transmisión de movimiento y potencia. Entre sus usos se encuentra la reducción de esfuerzos o cambiar la dirección de la fuerza. Estas pueden ser fijas, móviles y compuestas, además también se puede utilizar como un cambio de movimiento rotatorio a movimiento lineal 9.

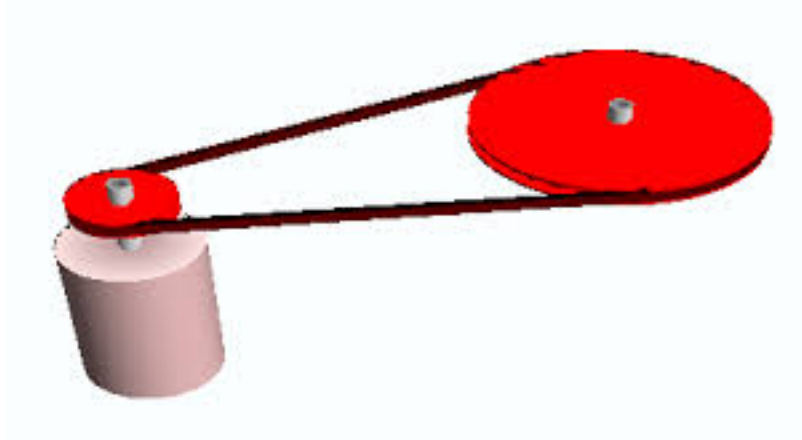


Figura 12: Mecanismo de poleas

En el actual proyecto nos interesa trabajar con la circunferencia de la polea que va ensamblada sobre el eje del motor, pues es necesario encontrar el radio que haga que el recorrido de la base de las cejas sea el adecuado para el diseño mecánico en el rostro. Por lo que podemos partir de la siguiente ecuación 7 que nos muestra cómo se calcula la circunferencia de un círculo:

$$C = 2\pi r \quad (7)$$

En donde C es la circunferencia, y r es radio de polea. Posteriormente se hace el despeje de r pues ya se conoce la circunferencia que se necesita, la cual es el recorrido de la distancia que hará la base de las cejas para el movimiento en 'x'. Por lo que la ecuación 8 para conocer el radio sería la siguiente:

$$r = \frac{C}{2\pi} \quad (8)$$

Conociendo r ya podemos hacer el diseño necesario para que la polea se acople a los requerimientos del proyecto y cumpla con las especificaciones solicitadas.

6.9. Análisis por von Mises

Es una tensión, es escalar y relaciona todos los esfuerzos sobre el sistema. Dice que el esfuerzo prima dividido por la mitad, tiene que ser menor que el esfuerzo de fluencia 9. La ecuación que describe este análisis se puede observar en la Figura 13

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

Figura 13: von Mises

Evaluación del sistema mecánico actual implementado en el rostro animatrónico.

El sistema mecánico actual implementado en el rostro animatrónico de forma física no se encontraba totalmente ensamblado. En algunas secciones, el rostro no se encontraba completo, es decir, le hacían falta piezas y en otras partes se encontraba completamente roto o deformado. Se procedió a desarmar por completo cada sección del rostro para poder inspeccionar de manera individual cada parte. Esto incluyó algunas partes como la estructura que soporta el sistema de los ojos, de los labios, mandíbula, de los labios laterales y del cuello. En términos generales, cada módulo del rostro necesitaba mantenimiento, manufactura, rediseño y ensamblaje.

Los motores se encontraban desordenados, algunos dañados y con los cables en mal estado, se hizo un recuento de estos y se determinó el estado en el que se encontraban. En el que se determinó que los motores Dynamixel estaban en buen estado, pero, algunos debían tener una recuperación de firmware. De los 12 servomotores SG 90, 9 se encontraban en buen estado y los restantes debieron ser reemplazados [10].

7.1. Ensamble inicial del rostro animatrónico en CAD

El ensamble inicial del rostro animatrónico completo se encontraba hecho y diseñado en el programa FUSION 360 de Autodesk. La versión presentada en este programa se muestra en la Figura [14], diseñada por [1] el Ing. Jenatz:

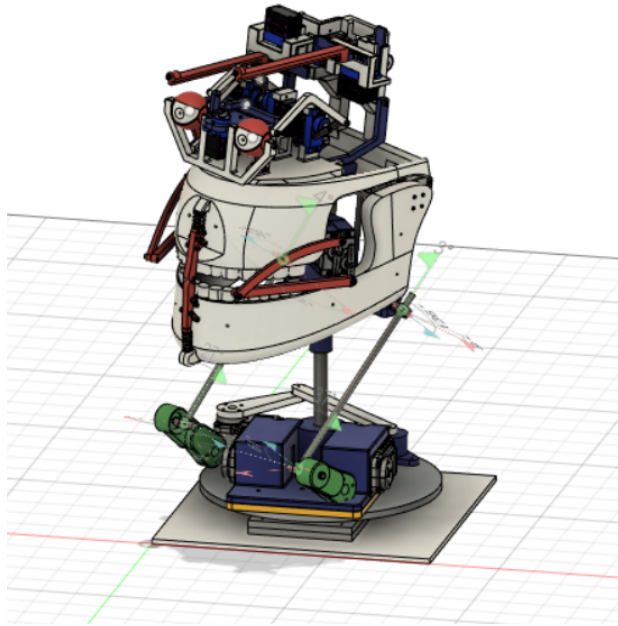


Figura 14: Rostro animatrónico por el Ingeniero Jenatz

Al realizar ciertos movimientos era notorio que algunos rangos de piezas no se encontraban completamente delimitados, por lo que no realizaban un movimiento fluido o correcto en el diseño. Por esta razón se empezó a investigar y a analizar más a fondo cada una de las piezas que se tenían en el diseño del rostro, en las que se logró encontrar que no todas las piezas eran fáciles de editar, es decir, los bosquejos no contenían todas las características que describían a la pieza. Dentro del programa de Fusion 360, se tiene una línea del tiempo donde se registra cada una de las operaciones realizadas, que no cumplía el principio de simplicidad, por lo que hacer modificaciones era complejo. Es por esto, por lo que se tomó la decisión de trasladar cada una de las partes y piezas de Fusion 360 al programa Inventor, también de Autodesk. Fusion 360 se volvía lento con la cantidad de piezas utilizadas en el ensamblaje. Inventor cuenta con librerías de componentes generales, tales como, tuercas, tornillos, barras, entre otros. También tiene facilidad para utilizar medidas del Sistema Inglés y Sistema Internacional, que facilita el diseño con ambos sistemas de medición.

También se observó que el principal motivo por el cual algunas piezas se encontraban rotas o directamente no se encontraban guardadas físicamente, fue porque la manufactura era muy complicada de realizar o la pieza era muy sensible al fallo mecánico por lo que se dañaba fácilmente y no se podía utilizar por mucho tiempo. Esto dificultaba un uso correcto y prolongado del rostro animatrónico.

7.2. Ensamble inicial del rostro animatrónico en físico

El rostro animatrónico se encontraba en desuso, algunas de las piezas ya se habían quebrado y otras piezas no se encontraban implementadas. Algunos de los motores SG90,

se encontraban defectuosos.

La versión física al inicio de esta fase se muestra en la Figura 15.

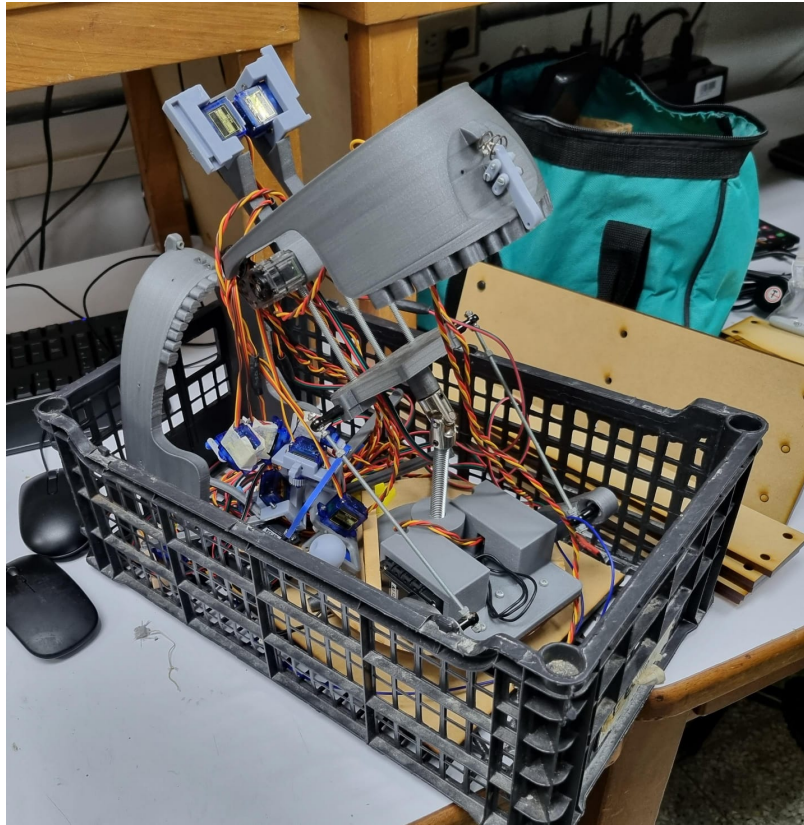


Figura 15: Rostro animatrónico físico

No se encontraban los módulos de ojos y párpados y el módulo de cejas se encontraba completamente roto. Sólo se encontraban piezas de estos módulos, pero que, evidentemente, necesitaban un rediseño para que no tuviera fallo mecánico pues estaban rotas y desgastadas. Estas piezas cedían a los esfuerzos y fuerzas bajo las cuales se encontraban sometidas.

Adicionalmente, un problema considerable, era que el cuello no soportaba el peso completo del rostro estando incluso en una postura de reposo y sin estar completamente armado. No movía adecuadamente la cabeza completa, tenía un juego en el que si se pasaba cierto ángulo, había un desacople que hacía que se cayera el rostro. El cuello tampoco le permitía al rostro hacer un movimiento de flexión y extensión, por lo que no podía asentir con la cabeza.

Los motores Dynamixel no se encontraban ensamblados y varios servomotores SG90 no se encontraban en las condiciones necesarias para trabajar en el rostro 10. Además, también se determinó que era necesario una forma de ruteo para los motores pues en total son 19, y cada uno cuenta con cables que lo conectan a la fuente de voltaje del rostro.

Diseño mecánico original en ojos y párpados

El sistema actual presentado para los ojos se muestra en la Figura [16](#):

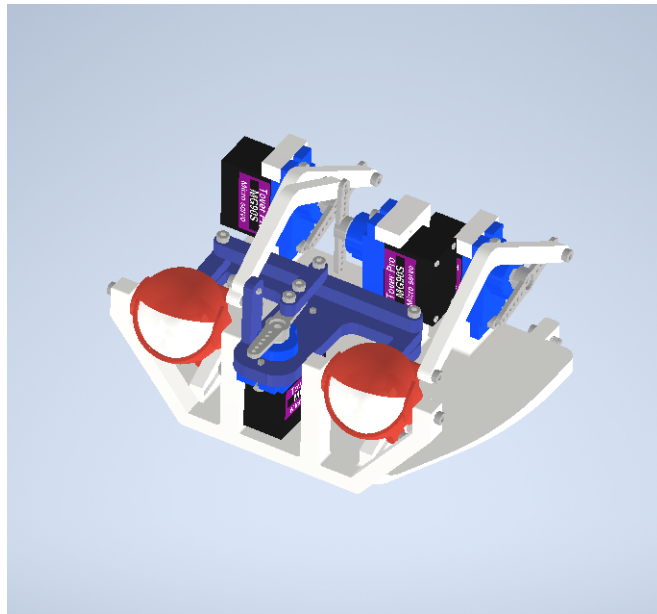


Figura 16: Sistema de movimiento de ojos en CAD antiguo

Este era un sistema que se encargaba del movimiento completo de los ojos. Estos podían realizar movimientos que imitaban al movimiento natural de la anatomía humana. Podían moverse de arriba hacia abajo y de izquierda a derecha, aunque su rango de movimiento se veía afectado de gran manera por el mecanismo de movimiento de los párpados, situación que se tomo en cuenta al momento de hacer las respectivas modificaciones al sistema mecánico

de párpados [11]. Ya que su funcionamiento era correcto y cumplía con las expectativas de fluidez de movimiento se decidió dejar este sistema para los ojos, el cual contaba con 2 motores para darle 2 grados de libertad, y solo se modificó la base de la cual iban sostenidos, que se muestra en la Figura [17], la cual es complicada de manufacturar y tenía que ser reemplazada completamente si una de sus partes se rompía por lo que el proceso de reemplazo era complicado y tedioso:

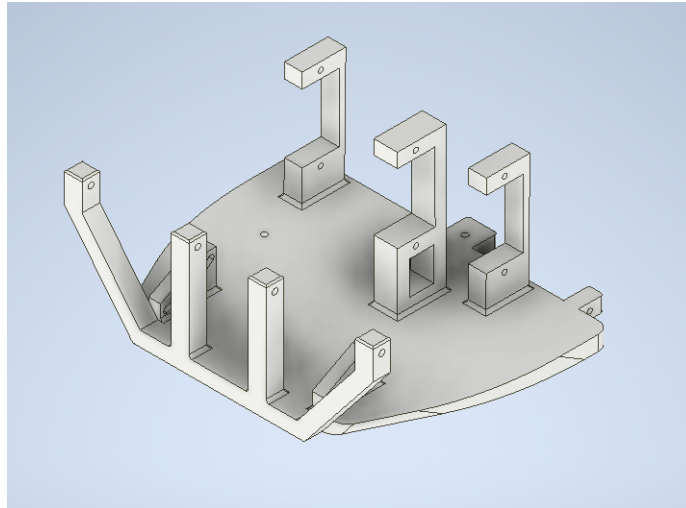


Figura 17: Base de sistema para movimiento de ojos antiguo

El sistema mecánico antiguo de los párpados era el mostrado a continuación en la Figura [18]:

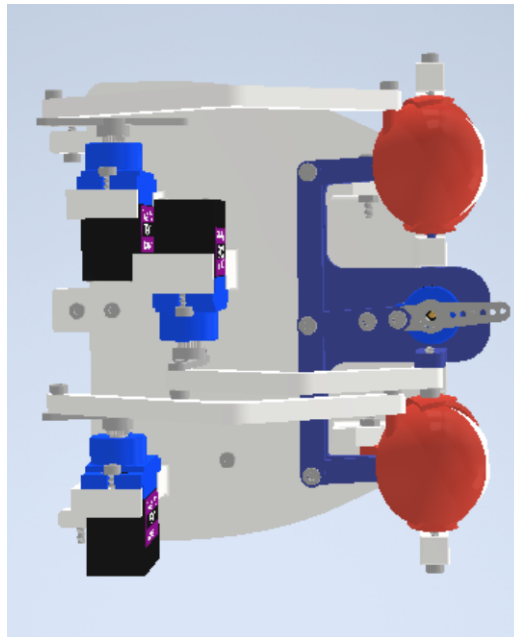


Figura 18: Sistema mecánico antiguo para párpados

Al realizar una inspección del modelo CAD se pudo observar que los párpados se encuentran conformados por un mecanismo de cuatro barras simple cada uno. Por lo que cada movimiento para el párpado superior se encuentra hecho por un servomotor, por lo que se necesitan 2 motores para generar los movimientos de cada párpado superior. Esto quiere decir que el párpado inferior no tiene movimiento pues no hay ningún actuador que lo genere. También se pudo observar que en la base de los ojos habían ciertas partes que se encargan de sostener a los párpados superiores e inferiores, aunque el movimiento de los párpados inferiores se podía mantener estático. Al seguir con la inspección en CAD de este sistema, también se podía observar que el sistema de movimiento de ojos se veía afectado en su rango pues el sistema de movimiento de los párpados le afectaba.

Al realizar una inspección física del sistema de los párpados, estos no se encontraban implementados en el sistema de los ojos del rostro animatrónico. Por lo que se realizaron unas pruebas con nuevas piezas y se determinó que en el acople entre el eje del párpado y la pieza de la base que lo sostenía fallaba, es decir, la pieza se rompía fácilmente. Por lo que se consideró que la pieza que imita ser el párpado debía tener cambios en el diseño que le permitieran ser más resistentes a la fuerza y torque ejercidos por el motor para el movimiento rotativo. También se considero que debía ser manufacturada de otro tipo de material, pues el material PLA era muy fácil de romper.

Además, también se realizó un análisis de esfuerzo sobre la parte crítica del párpado que es en donde se acopla al tornillo que lo conecta a la manivela que se mueve gracias al motor. Este análisis se puede ver en la Figura 19, en donde se puede ver una deformación en la parte crítica del párpado en la que falla y se rompe:

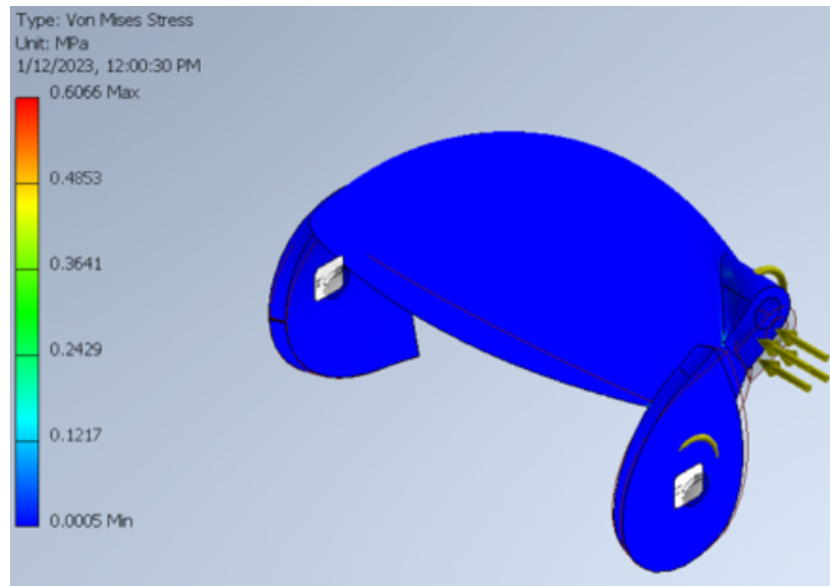


Figura 19: Análisis por von Misses del párpado anterior

Rediseño e implementación del sistema mecánico en ojos y párpados

En el mecanismo de movimiento de los párpados se tenía un motor para cada párpado superior, por lo que se tenían en total 2 motores. El problema principal que se tenía es que la parte de la pieza que simulaba ser el párpado no resistía y se rompía fácilmente por lo que se decidió cambiar el diseño anterior, por lo que se añadieron refuerzos a esta zona, el cual se muestra en la Figura [20](#):

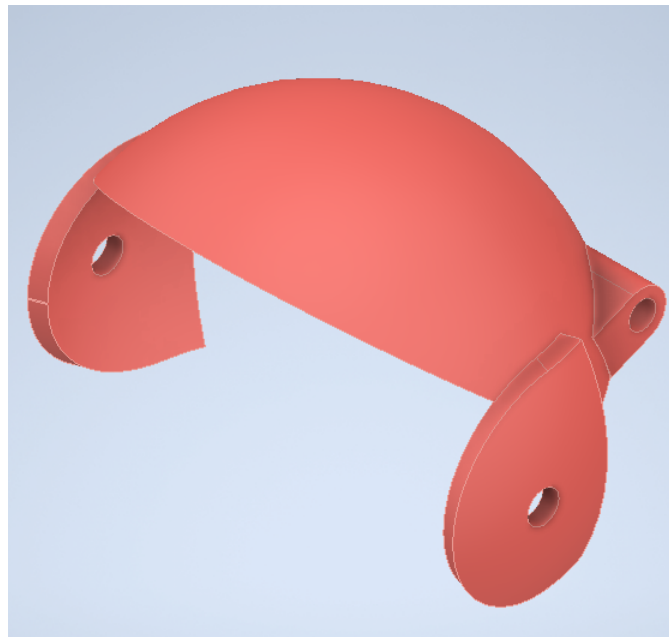


Figura 20: Párpado superior antiguo

Por una nueva versión que fuera más resistente al movimiento del motor, esta nueva versión hizo que la pieza fuera más pesada pero también dejaba que durara más tiempo en uso constante.

También se realizaron cambios en el párpado inferior, en el que en la versión anterior tenía cierto rango de movimiento como podemos observar en la Figura [21](#):



Figura 21: Rango de movimiento de párpado inferior

Ya que el párpado inferior en un rostro humano no tiene movimiento se decidió cambiar el diseño del párpado antiguo como se muestra en la Figura [22](#):



Figura 22: Párpado inferior anterior

Para que este se acoplara a una nueva base, que iba a ser la encargada de poder dejar el nuevo párpado estático. Por lo que se presentaron primeras versiones de la base hasta llegar al resultado mostrado en la Figura 23:

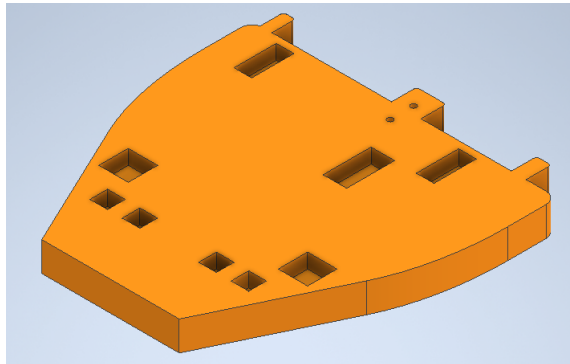


Figura 23: Base para ojos y párpados actual

Para los párpados superiores, se decidió utilizar 'fillets' para volver más resistente la parte de la pieza que era fácil de romper, además, se le agregó un radio más grande y se cambió el diseño para aumentar el material de la circunferencia que se rompía. Para el nuevo párpado, también se decidió manufacturar en material de resina por lo que se le añade rigidez, la forma de manufactura y la forma en la que es impresa también genera que la pieza sea más o menos resistente. También se cambió el diseño anterior del párpado pues no permitía que los ojos tuvieran un gran rango de movimiento en los ejes 'x' y 'y'. El nuevo párpado superior en vista frontal se muestra en la Figura 24 y en la vista trasera en la Figura 25:

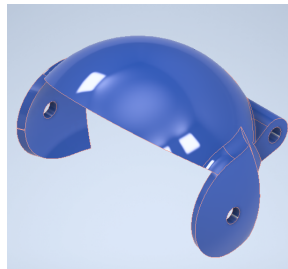


Figura 24: Párpado superior nuevo en vista frontal

y en vista trasera se puede observar en la Figura 25:



Figura 25: Párpado superior nuevo en vista trasera

También se le realizó una prueba de esfuerzos por von Mises y el resultado se puede apreciar en la Figura 26:

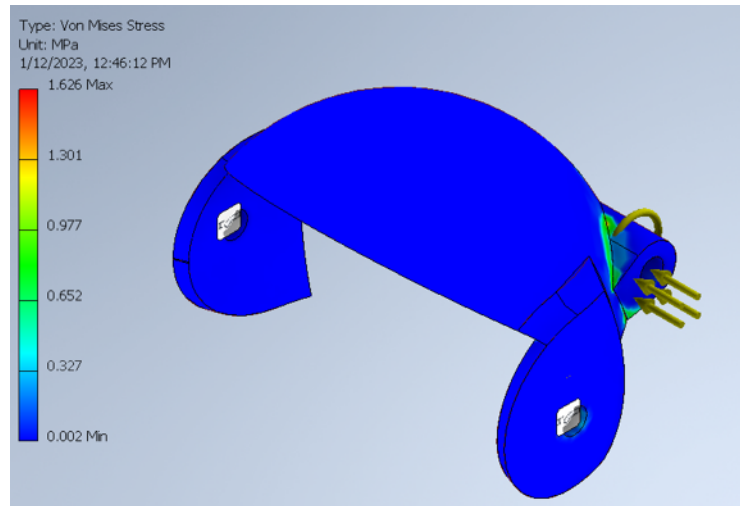


Figura 26: Análisis por von Mises del nuevo párpado

En el que el resultado muestra que bajo las cargas regulares y en condiciones normales el párpado no se deforma.

Por lo que el nuevo sistema de ojos y párpados se vería en la Figura 27:

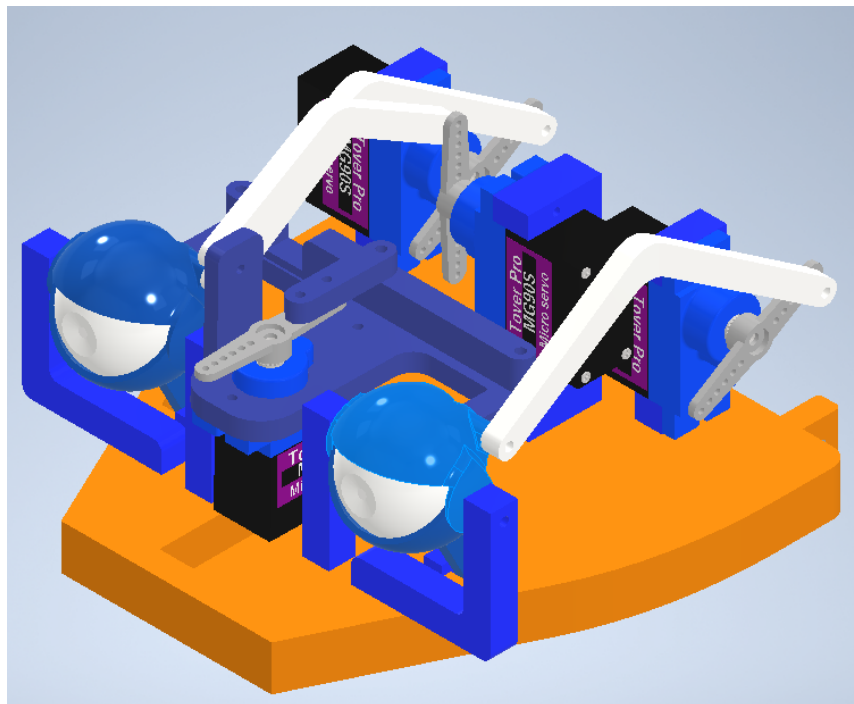


Figura 27: Nuevo sistema mecánico para ojos y párpados

Diseño mecánico original en cejas

El sistema mecánico de la ceja derecha se muestra en la Figura 28 y el sistema mecánico de la ceja izquierda se muestra en la Figura 29, esto del diseño antiguo:

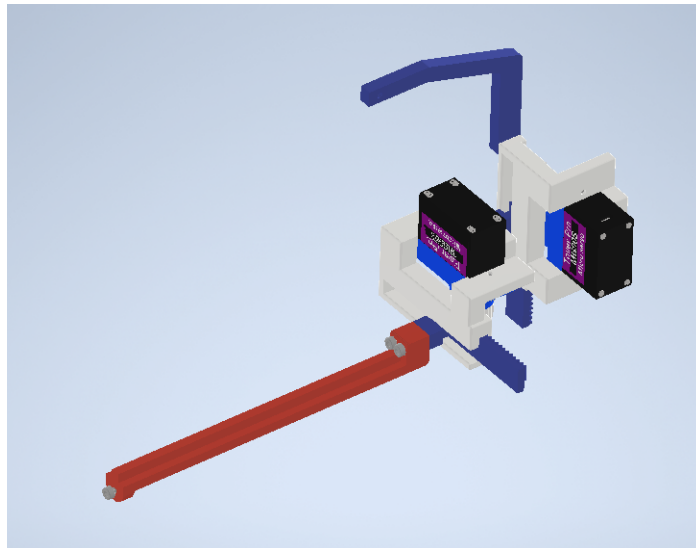


Figura 28: Sistema mecánico antiguo para ceja derecha en CAD

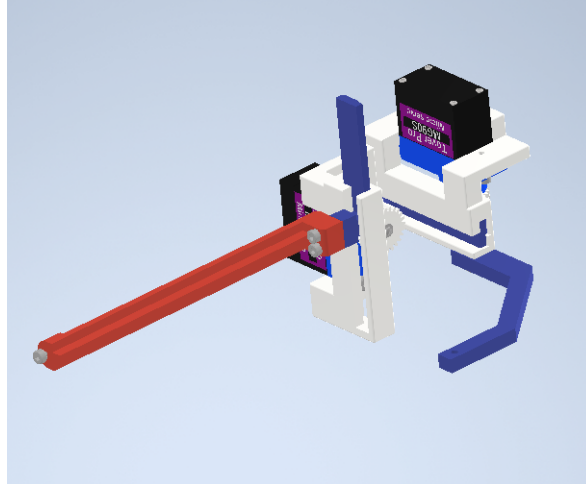


Figura 29: Sistema mecánico antiguo para ceja izquierda en CAD

Al momento de una revisión de funcionamiento en CAD se pudo observar que el sistema de movimiento que conforma a ambas cejas son varios mecanismos piñon-cremallera. Estos transforman el movimiento rotatorio del motor en un movimiento rectilíneo. El mecanismo piñon-cremallera se encuentra presente 2 veces en cada ceja. Uno se encarga del movimiento en el eje 'x' y otro se encarga del movimiento en el eje 'y'. En el mismo análisis en CAD se pudo observar que el movimiento de la ceja se encuentra delimitado por 2 grados de libertad.

Al realizar un análisis de las piezas físicas, se encontró que los mecanismos de las cejas no se encontraban completos. Se observó algunas piezas eran débiles y se rompían con facilidad, además se puede ver que el espacio que abarca cada mecanismo en la ceja es bastante y que se pueden llegar a estorbar uno con el otro. También se podía observar que el mecanismo de piñón cremallera no se movía de manera correcta ya que algunos dientes de la cremallera no engranaban con los dientes del piñón, la principal razón del mal engranado de esto puede ser por diferencias en el CAD con la fabricación.

El sistema mecánico original para las cejas se encuentra acoplado al rostro animatrónico como se muestra en la Figura [29](#). En esta se observa que es un diseño que puede mejorar y optimizar espacio y funcionamiento, además también podemos ver que en términos estrictamente estéticos no es el mejor diseño.

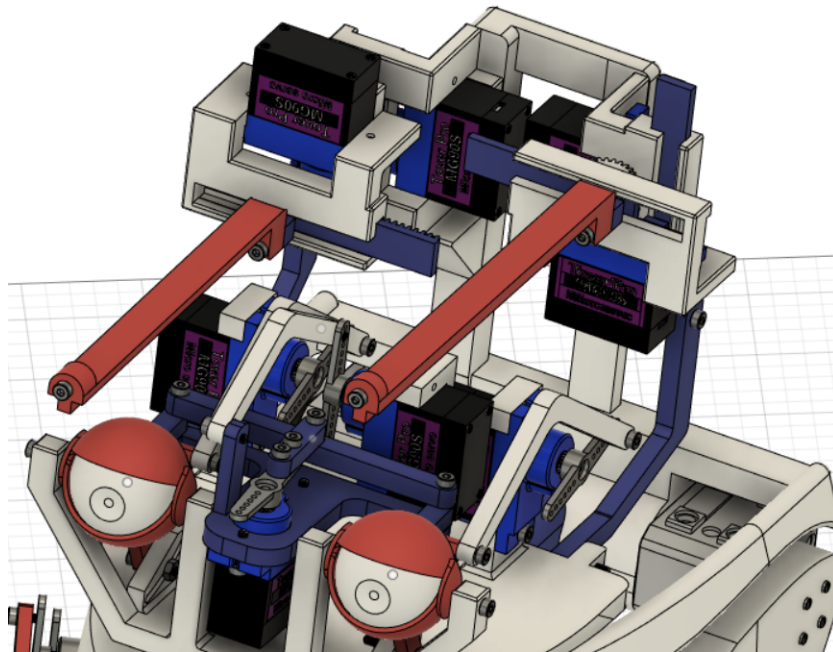


Figura 30: Sistema mecánico antiguo para cejas en CAD

Se realizó un análisis de von Mises sobre las cremalleras que sostenían el peso completo de las cejas. El resultado se observa en la Figura 31 nos indica que se tiene una deformación de 0.28 Mpa.

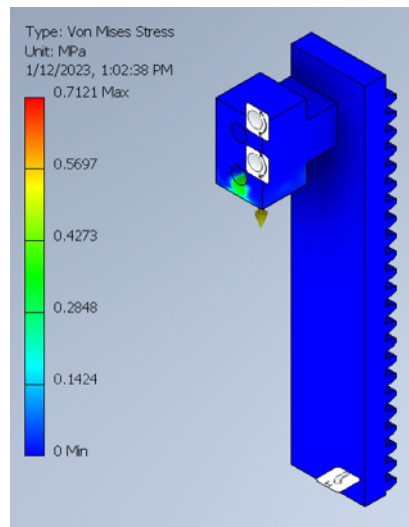


Figura 31: Análisis de esfuerzos por von Mises para la cremallera

Rediseño e implementación del sistema mecánico en cejas

El principal reto del rediseño era mantener un movimiento rectilíneo fluido para que imitara los movimientos que realizan los músculos humanos de la ceja sin que se rompiera fácilmente. Para el efecto se realizaron los siguientes prototipos:

11.1. Prototipo 1

Para esta propuesta de diseño, lo que se decidió implementar fue un diseño diferente al anterior para el movimiento de las cejas, manteniendo de igual manera el mecanismo de piñón-cremallera, pero que ocupara menor espacio y no estorbara el movimiento de una ceja con la otra, esto ya que las cejas al encontrarse muy cerca, fácilmente se pueden tocar y estorbar por el espacio. Ya que no se puede implementar un motor para cada movimiento del músculo de las cejas, la primera propuesta de diseño que se hizo fue la de utilizar un único motor para el movimiento en el eje 'y' para ambas cejas, y dos motores independientes el uno del otro para el movimiento de las cejas en el eje 'x'.

El principal problema de esta propuesta es que el movimiento en el eje y de cada ceja no era independiente el uno de la otra, por lo que si se quería mover solamente una ceja en este eje era imposible hacerlo. Su mayor ventaja era que se reducía considerablemente el espacio en el mecanismo de las cejas. Esta propuesta de diseño se mantuvo solamente en bosquejos a manos, donde se decidió no seguir desarrollándola.

Luego se realizó otra propuesta de trabajo en la que se decidió utilizar un único motor para cada ceja y que este se encargara de proporcionar un movimiento rotativo, pues lo que se buscaba era adherir a cada uno de los laterales de la pieza que representaba a la ceja, una capa de material que representara a la piel que iba a recubrir el rostro. Pero el mayor problema de este diseño es que la ceja se mantendría fija en un solo punto y no sería una

propuesta innovadora.

El sistema mecánico que se decidió utilizar para esta propuesta cuenta con 4 servo motores, 2 encargados del movimiento en el eje 'y' de las cejas y otros dos que se encargan de realizar el movimiento en el eje 'x' de las cejas.

El movimiento en el eje 'y' se da gracias a que el servo motor está fijado en una base vertical que le permite tener más espacio y reduce el riesgo de fallo considerablemente, además, este cambio hace que la base de la ceja no tenga que soportar el peso de 2 servo motores sino que solamente debe soportar el peso de 1 servo motor por ceja. Para comprender mejor el movimiento del eje 'y' de cada ceja podemos ver la Figura 32, en la cual se muestra el mecanismo en 'y' para la ceja derecha, de igual manera podemos ver el mecanismo para la ceja izquierda en la Figura 33.

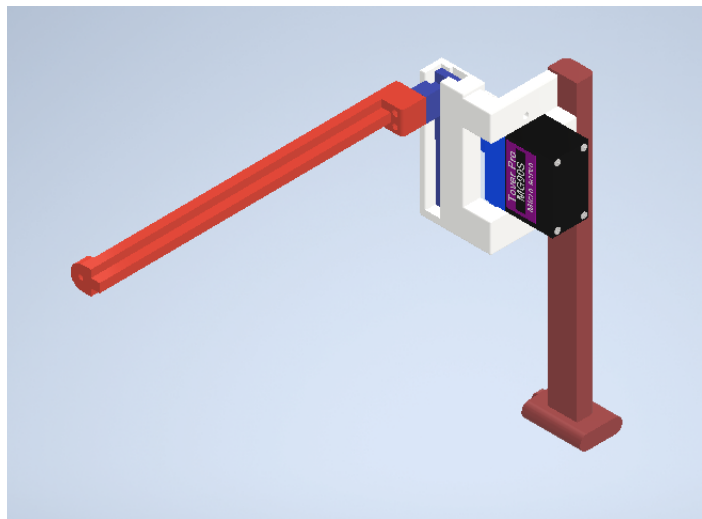


Figura 32: Sistema mecánico en 'y' para ceja derecha

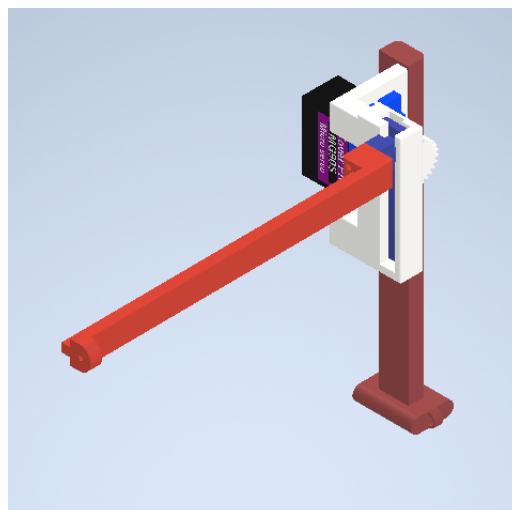


Figura 33: Sistema mecánico en 'y' para ceja izquierda

El mecanismo piñón-cremallera para el movimiento en el eje 'y' se muestra en la Figura [34](#)

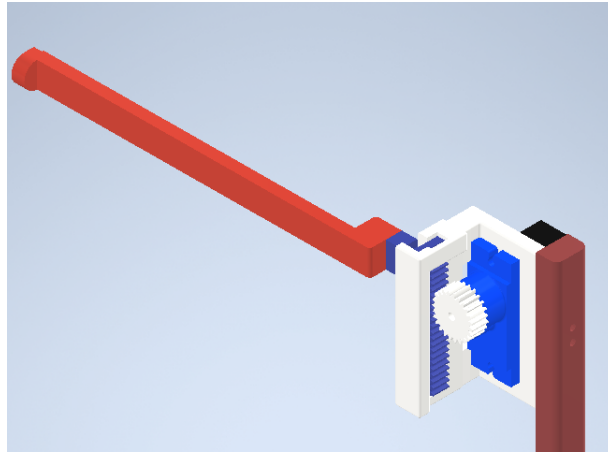


Figura 34: Mecanismo de piñón-cremallera para eje 'y' de cejas

Para el movimiento del eje 'x' se necesitaba que una ceja fuera independiente de la otra por lo que se decidió combinar el mecanismo de piñón cremallera con un mecanismo de resortes para que el movimiento de una ceja no afectara a la otra y pudiera regresar a su posición inicial. Por lo que se modificó una parte del rostro para implementar carriles, sobre los que se deslizarían las piezas cuando los motores generarán movimiento. El sistema funciona de la siguiente manera, un motor se encarga de dar movimiento en el eje 'x', este mismo motor va fijado a otro sistema de piñón-cremallera que se encarga de darle movimiento en el eje 'y', por lo que si se mueve el primer motor, dependiendo de la dirección que tenga, se mueve la ceja derecha o la ceja izquierda, si se mueve el segundo motor encargado del movimiento en eje 'y' para este sistema, se mueven ambas cejas en el eje 'x', Se puede observar el diseño en la Figura [35](#). El sistema completo se vería en la Figura [36](#)

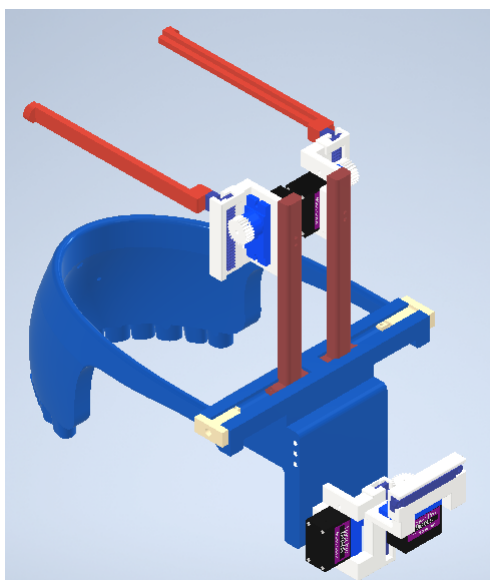


Figura 35: Mecanismo de piñón-cremallera para eje 'x' de cejas

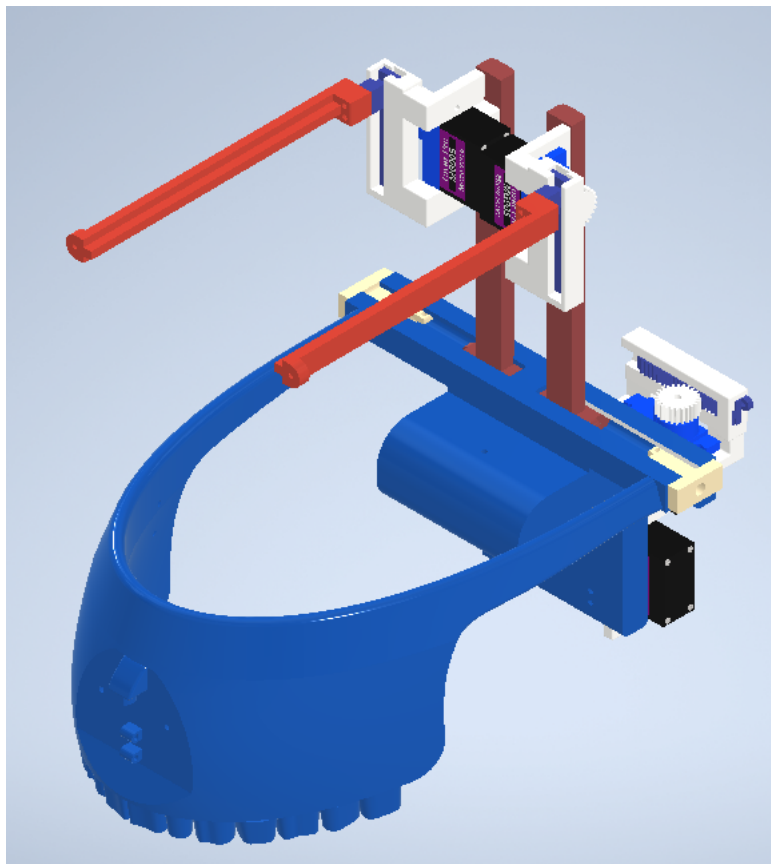


Figura 36: Mecanismo de movimiento para cejas

Esta propuesta de diseño fue descartada posteriormente pues al momento de implementarla de manera física tenía varios problemas respecto a las vibraciones por lo que se prefirió no implementarla. Se llegó a fabricar y a tener varias iteraciones de esta versión pero al tener varios problemas de vibración se decidió buscar una nueva propuesta de diseño. Además, para tener un movimiento fluido tenía que tener un sistema de control bastante bueno para evitar que ambos motores interfirieran en un mal movimiento, que posteriormente podía generar daños mecánicos. También se consideró descartarla pues los motores no tenían la suficiente fuerza para contrarrestar la reacción de los resortes, y conseguir resortes que no tuvieran mucha fuerza es complicado puesto que localmente no hay compañías encargadas de manufacturar resortes a partir de ciertas características, solamente si se lleva una muestra.

11.2. Prototipo 2

Por lo que se decidió seguir buscando una solución y surgió la propuesta de utilizar un sistema mecánico de poleas que transmitiera movimiento en el eje 'x' para las cejas. Para esta propuesta de diseño se cambió de nuevo el diseño de la base y estructura principal de las cejas. Cambiando la pieza que simula ser el máxilar para poder añadir carriles en el cual se pudiera incorporar ejes para así evitar las vibraciones y movimientos no deseados.

Se empezó modificando los laterales del máxilar para poder implementar un servo motor que tuviera acoplado a él una polea, a la cual ira amarrado un hilo que pueda transmitir el movimiento a la base de la ceja, como se observa en la Figura 37. El hilo que se utilizó, es el mismo que se utiliza en las cañas de pescar pues así es capaz de soportar las fuerzas ejercidas por el motor.

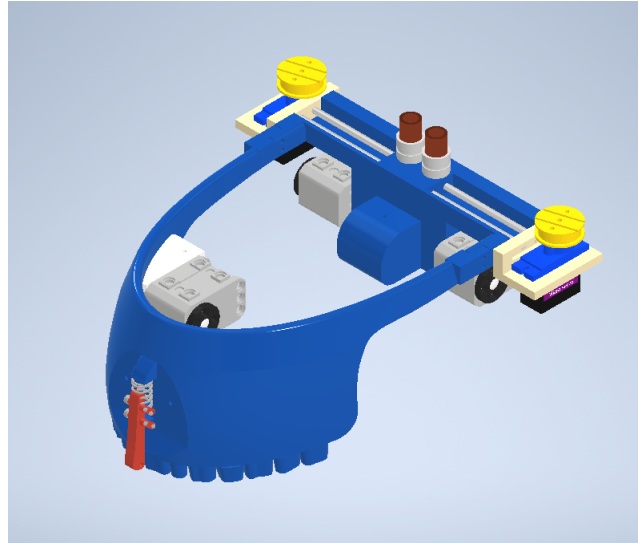


Figura 37: Motores implementados para movimiento en 'x' de las cejas

Para decidir el radio de la polea que va acoplada al motor, fue necesario hacer cálculos partiendo del recorrido en 'x' que hace la ceja, pues este recorrido sería la circunferencia de la polea.

A partir de ecuación 9 que nos muestra cómo se calcula la circunferencia de un círculo:

$$C = 2\pi r \quad (9)$$

En donde C es la circunferencia, y r es radio de polea. Posteriormente se hace el despeje de r pues ya se conoce la circunferencia que se necesita, la cual es el recorrido de la distancia que hará la base de las cejas para el movimiento en 'x'. Por lo que la ecuación 10 para conocer el radio sería la siguiente:

$$r = \frac{C}{2\pi} \quad (10)$$

Sabiendo que el recorrido que tiene que hacer es de aproximadamente 35mm reemplazamos este valor por C para poder encontrar el valor de r, el cual será:

$$r = \frac{35}{2\pi} \quad (11)$$

Posteriormente a la deducción de estos cálculos, se modificó la base de las cejas para

que estas pudieran ir montadas sobre los ejes de los carriles del movimiento en el eje 'x' y también para que el hilo se pudiera amarrar a ellas sin riesgo a que hubiera algún fallo. Es por esto que se realizaron varias iteraciones en el diseño de la base de la ceja hasta encontrar el centro de gravedad que hiciera que las vibraciones disminuyeran durante su recorrido.

Habiendo hecho estos cambios se realizó el ensamble de la nueva ceja derecha, como se puede ver en la Figura 38.

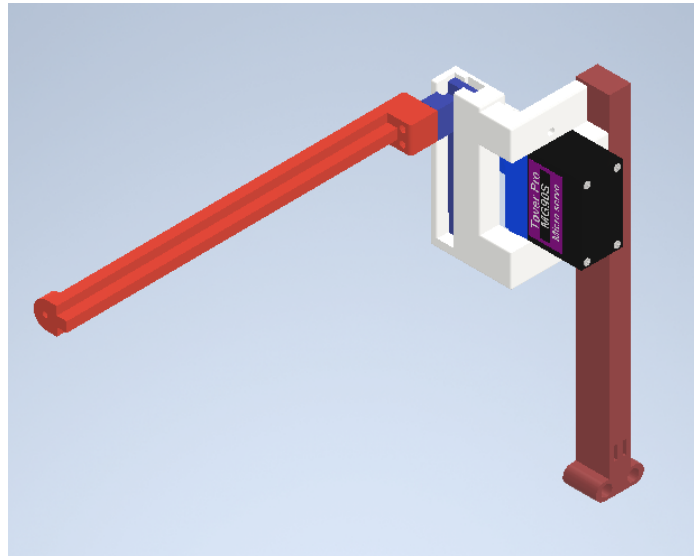


Figura 38: Ceja derecha

Y el ensamble de la ceja izquierda se puede ver en la Figura 39, el cual es un espejo de la ceja derecha.

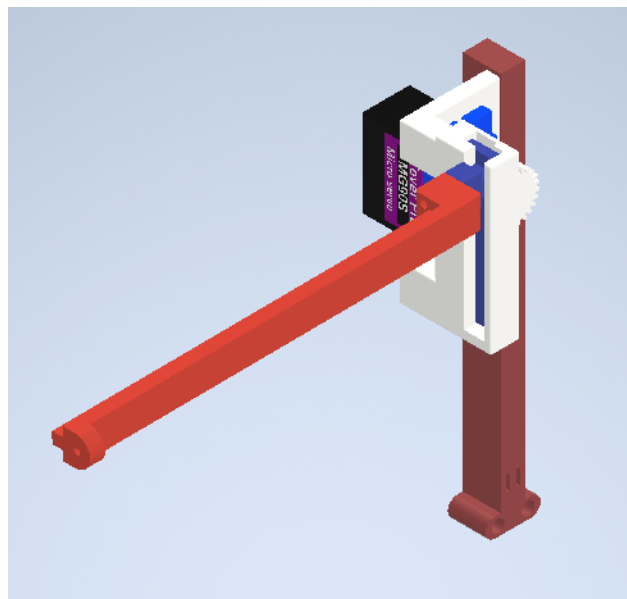


Figura 39: Ceja izquierda

Por lo que el diseño con las cejas ensambladas se muestra en la Figura [40](#).

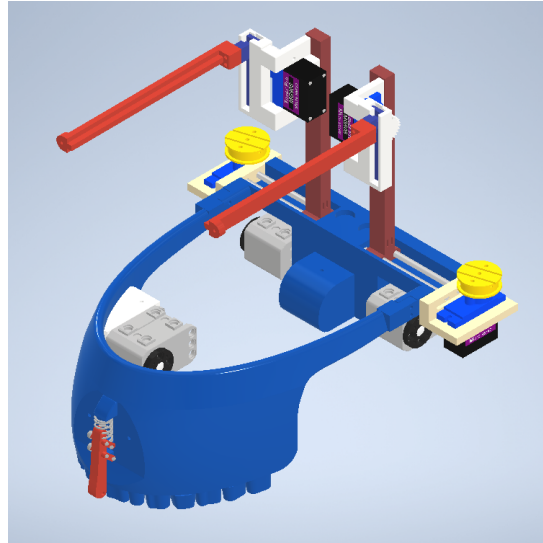


Figura 40: Cejas implementadas

Por último se acoplo en el centro del máxilar unos tubos de $3/8$ in que tuvieran la función de servir como poleas en las cuales se implementan anillos en los que se resbalaría el hilo que va amarrado a la base de las cejas, y que no genere fricción entre la cuerda y la polea, por lo que el diseño completo se ve en la Figura [41](#).

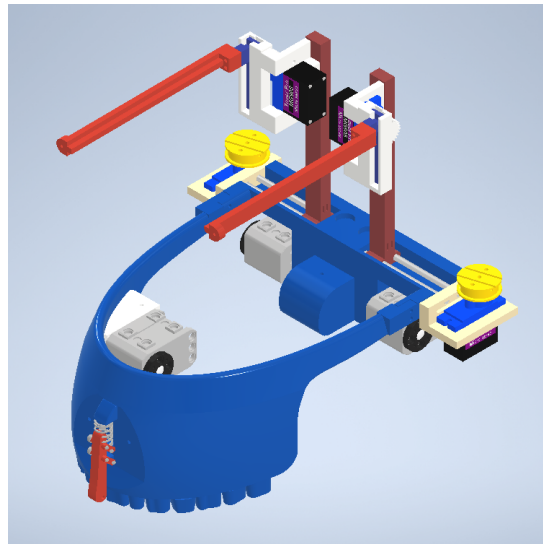


Figura 41: Mecanismo de poleas para cejas

Con este diseño aseguramos un correcto funcionamiento de las cejas en el eje 'x' sin riesgo a provocar fallos con respecto al movimiento de las cejas. Además, es una idea innovadora que funciona de manera correcta y tiene una manufactura sencilla y no es complicada de hacer, por lo que cualquier pieza de este módulo puede ser reemplazada fácilmente. Su mantenimiento no es complicado y se puede revisar en el manual de mantenimiento adjunto.

Diseño mecánico original de cuello

El sistema mecánico antiguo del cuello era el mostrado en la Figura [42](#):

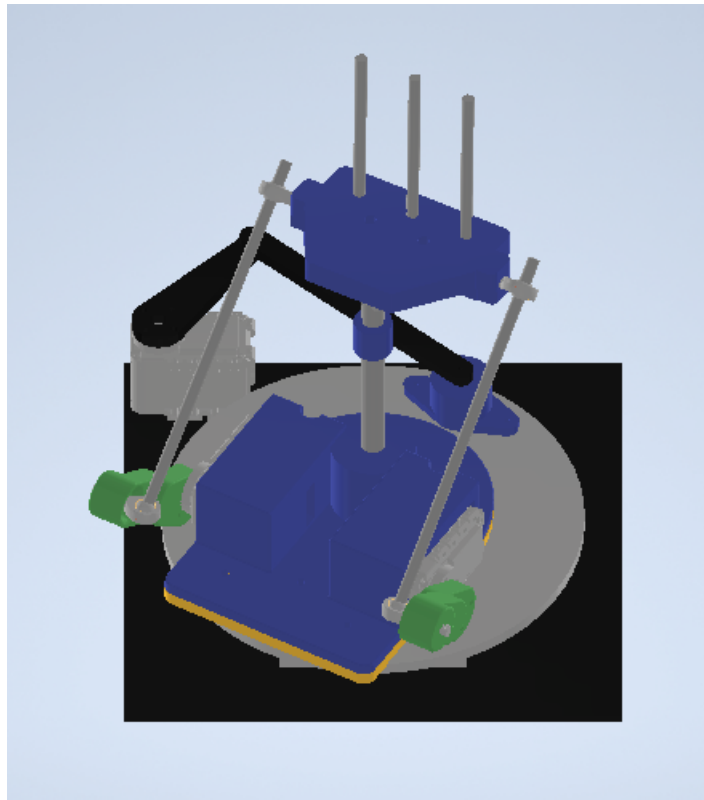


Figura 42: Sistema mecánico antiguo para el cuello

En el modelo en CAD podemos observar que el sistema mecánico del cuello se encuentra conformado principalmente por un mecanismo de cuatro barras que se encargan de soportar el peso completo del rostro y también de darle un movimiento fluido, este le da en total dos grados de libertad. Vemos también que esta motando sobre una base en la que hay otro mecanismo de cuatro barras simple que se encarga de hacer rotar la cabeza completa. El movimiento se puede dar gracias a que el cuello se encuentra acoplado a la base de la cabeza con un eje de junta universal, por lo que en total, se tienen 3 grados de libertad. También se puede observar que el eje principal del cuello, que es la junta universal mencionada anteriormente, tiene buen funcionamiento, por lo que se decidió dejar en el modelo para seguir con su uso.

Al inspeccionar de manera completa este sistema mecánico de forma física se puede notar que los motores que se encargan de soportar el peso del cuello fallan en ciertas posiciones en las que la cabeza debería estar estática, o cuando esta en su zona de reposo, esto ya que los motores no cuentan con el torque necesario. Partiendo de la información conocida en que los motores tienen un torque de 15kg/cm cada uno se obtiene la siguiente ecuación:

$$m = \frac{T_{max}}{r} = \frac{15kg/cm}{7cm} = 2.1kg \quad (12)$$

Estos cálculos ayudaron a verificar que el radio seleccionado era muy grande, lo que ocasionaba que el motor no pudiera soportar la carga del peso del rostro y tuviera dificultades para el movimiento del cuello. En la inspección física, también se determinó que varias piezas que conforman el módulo del cuello, se encontraban en muy mal estado. Las piezas que principalmente se encontraban dañadas eran las hechas de material de madera comprimida o MDF. Estas piezas se encontraban afectadas por la humedad y necesitaban ser manufacturadas nuevamente. El rodamiento también se encontraba afectado por el poco uso por lo que era necesario darle limpieza y aplicarle lubricante para que no afecta al movimiento rotacional del cuello.

Rediseño e implementación del sistema mecánico en cuello

Para el nuevo diseño de movimiento de cuello se mantuvo la condición de tres ejes que sostienen a todo el rostro animatrónico.

Se buscó modificar el radio de la pieza que sostenía los laterales del rostro para poder aumentar el torque que esta soportara. Se modificó la nueva pieza de un radio de 70mm a 30mm, la cual se ve en la Figura [43](#):

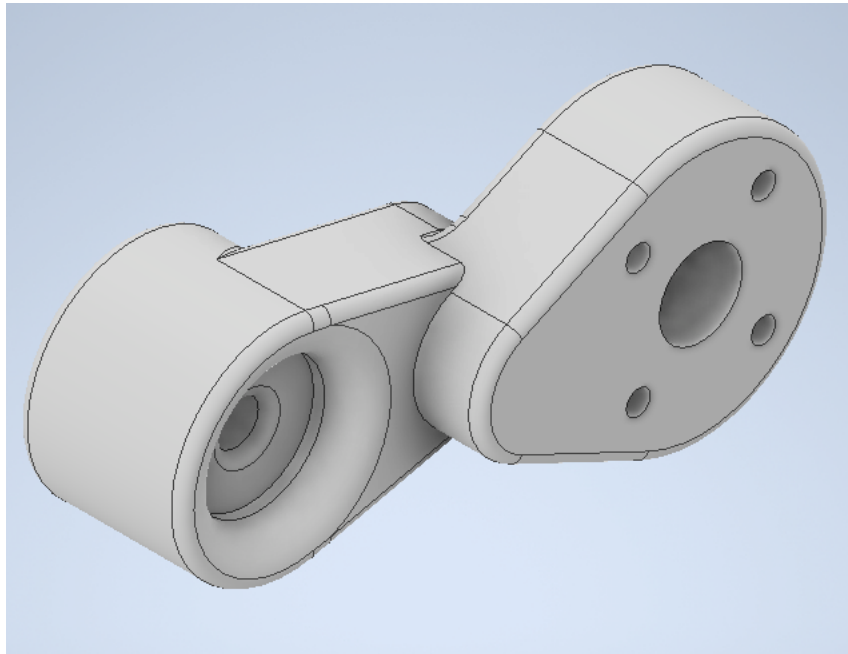


Figura 43: Nueva pieza para cuello

Con esta nueva pieza se logró que el cuello sea capaz de soportar el rostro animatrónico por completo. La desventaja es que se reduce el rango de movimiento del cuello. En la siguiente ecuación, en donde T_{max} es torque máximo dado por el datasheet de los motores AX-12A, buscamos determinar la masa máxima que puede sostener el cuello [12].

$$m = \frac{T_{max}}{r} \quad (13)$$

$$m = \frac{15kg/cm}{3cm} = 5kg \quad (14)$$

Por medio de este cálculo se demostró que utilizando el nuevo radio de 30mm el motor si lograba el movimiento del cuello aunque de forma limitada, pero se logra el objetivo de soportar el peso del rostro.

Adicionalmente, se modifico la pieza en donde se colocaron los motores AX-12A [12]. Estos dan movimiento al cuello como se observa en la Figura 44. Esto se hizo para poder modificar la posición en la que se encontraban los motores y moverlos a una posición más cercana a donde se encontraba el eje de movimiento del rostro, para poder favorecer al movimiento del mecanismo de 4 eslabones y así poder obtener un movimiento de flexión y extensión que en el anterior diseño no se tenía, por lo que se agrega este movimiento que añade expresión al rostro animatrónico que imita al movimiento de acentar con la cabeza.

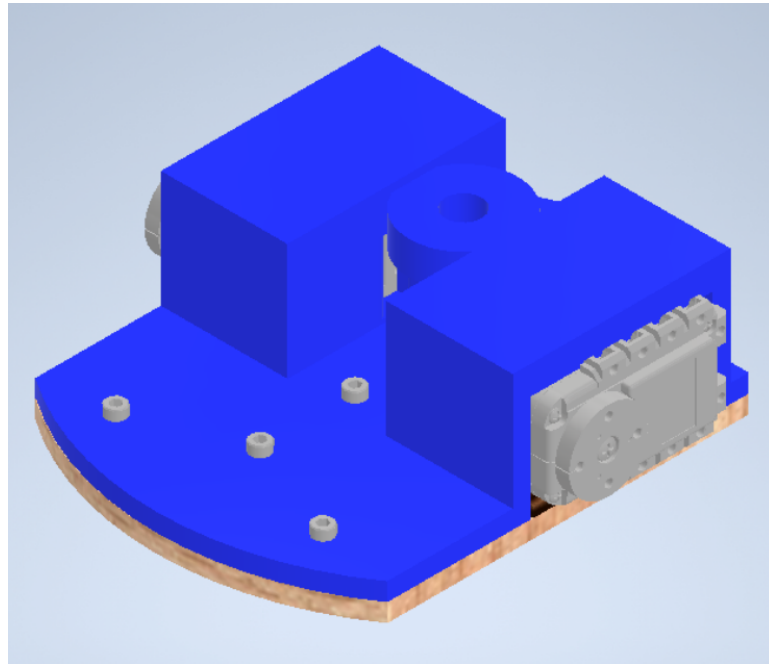


Figura 44: Pieza modificada para cambiar posición de motores

En conjunto con esta modificación también se rediseñó la base que conecta el rostro al eje universal, que se observa en la Figura 45. Se modificó esta pieza para que el centro de gravedad de la cabeza se encontrará lo más cercano posible al plano coronal. La razón de colocar el centro de gravedad lo más cercano posible al plano coronal era que no se requiriera

un contrapeso ni en la parte trasera ni delantera del rostro. Si no se buscaba estar lo más cercano a esta simetría el rostro puede caerse hacia adelante sin que los motores lo lleven a esa posición y viceversa.

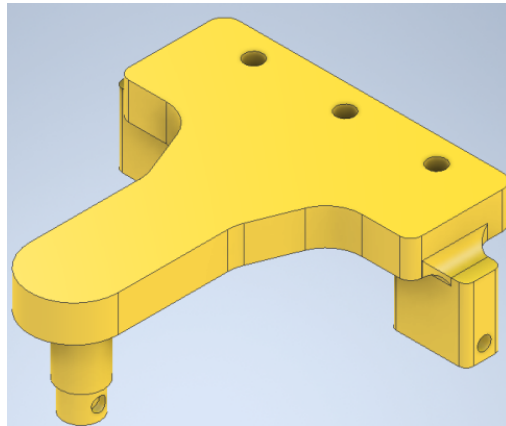


Figura 45: Pieza modificada para buscar la simetría en el plano frontal

Con esta modificaciones en el mecanismo de 4 barras se logra que el cuello sea capaz de realizar movimientos laterales de manera correcta y además es posible también realizar movimientos de adelante para atrás, movimientos que en el rostro anterior no estaban contemplados y no sé podían realizar, por lo que esto añade que el rostro sea más expresivo. Con esto se podía observar el módulo del cuello culminado como se ve en la Figura [46](#).

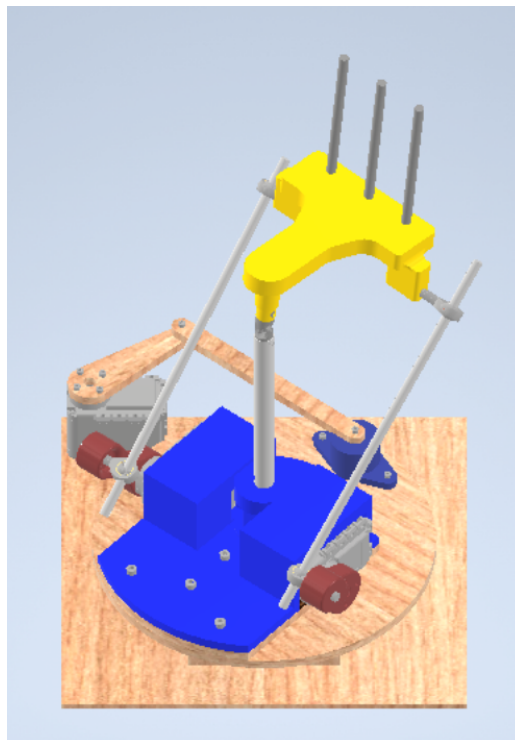


Figura 46: Módulo del cuello completo

Rediseño e implementación de piezas misceláneas

Al hacer una inspección de cada pieza se observó que habían algunas otras partes del rostro que necesitaban un rediseño para ajustarse a las nuevas, es por esto que se realizarón los cambios necesarios para el correcto funcionamiento del sistema completo.

Se rediseñó la pieza encargada de sostener los pómulos y labios del rostro, pieza que se muestra en la Figura 47:



Figura 47: Soporte de labios antiguo

Esto se debió modificar ya que anteriormente era única pieza que se encargaba de la función de sostener los labios, pómulos y la base de los ojos, una pieza que era extremadamente complicada de manufacturar. Además, era fácil de romper, por lo que se decidió separarla y así obtener piezas más simples de manufacturar y de reemplazar, el resultado obtenido se muestra en la Figura 48:

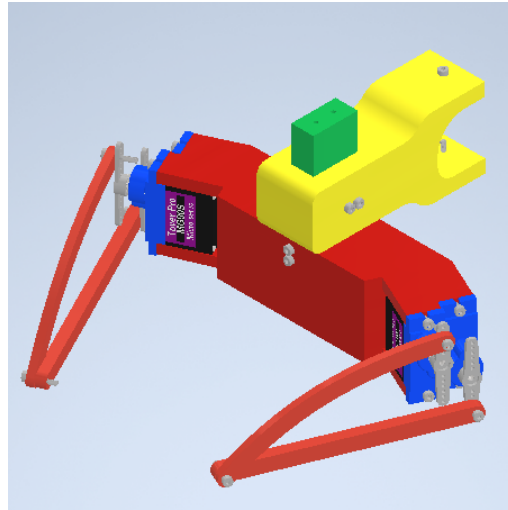


Figura 48: Soporte modificado de labios, pómulos y base para ojos

Que hizo que la pieza fuera más robusta pero más simple de modificar y de reemplazar. También se logro que ninguna que estas piezas utilizara algún tipo de pegamento como se hacía antes y se utilicen solamente tornillos.

Otra pieza que fue modificada para agilizar su manufactura y su ensamble fue la pieza del maxilar, que era una pieza muy grande, ya que era necesario manufacturar al maxilar cada vez que se decidiera modificar las cejas del rostro. Anteriormente se encontraba como en la Figura 49.

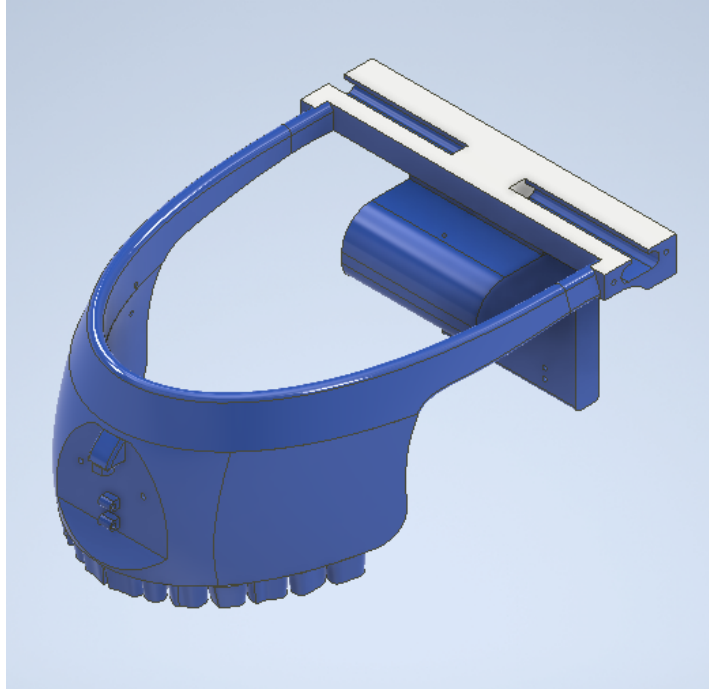


Figura 49: Máxilar anterior

Pero se modificó para que fuera posible manufacturar solamente la parte del máxilar que se edita, esto se logró haciendo una división del máxilar en dos, dejando una parte frontal y una parte trasera, siendo la parte trasera la que se modifica y que solamente fueran necesarios unos pines para poder ensamblar las piezas. La parte delantera la podemos observar en la Figura [50](#).

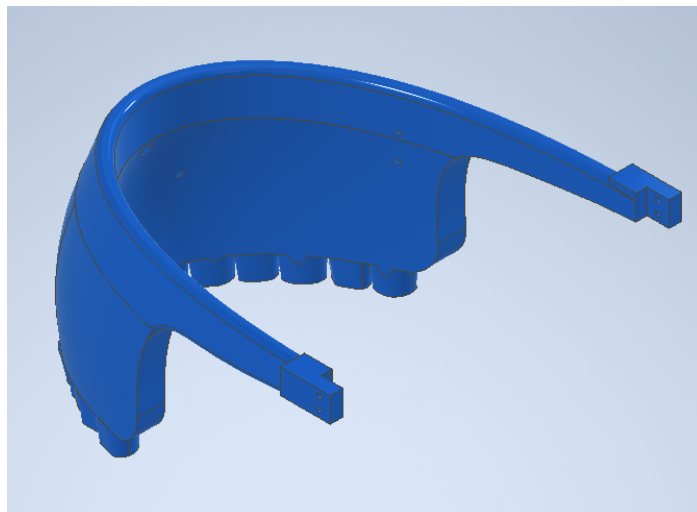


Figura 50: Máxilar frontal

Y la parte trasera del máxilar se ve en la Figura [51](#).

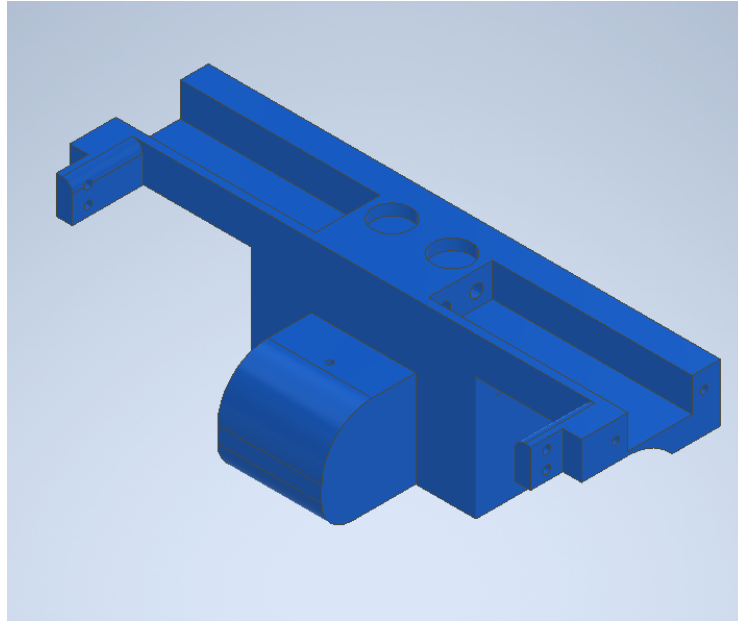


Figura 51: Máxilar trasero

Se realizaron análisis de esfuerzos a ambas partes, ambos análisis por von Mises. El análisis para la parte frontal del máxilar se observa en la Figura 52.

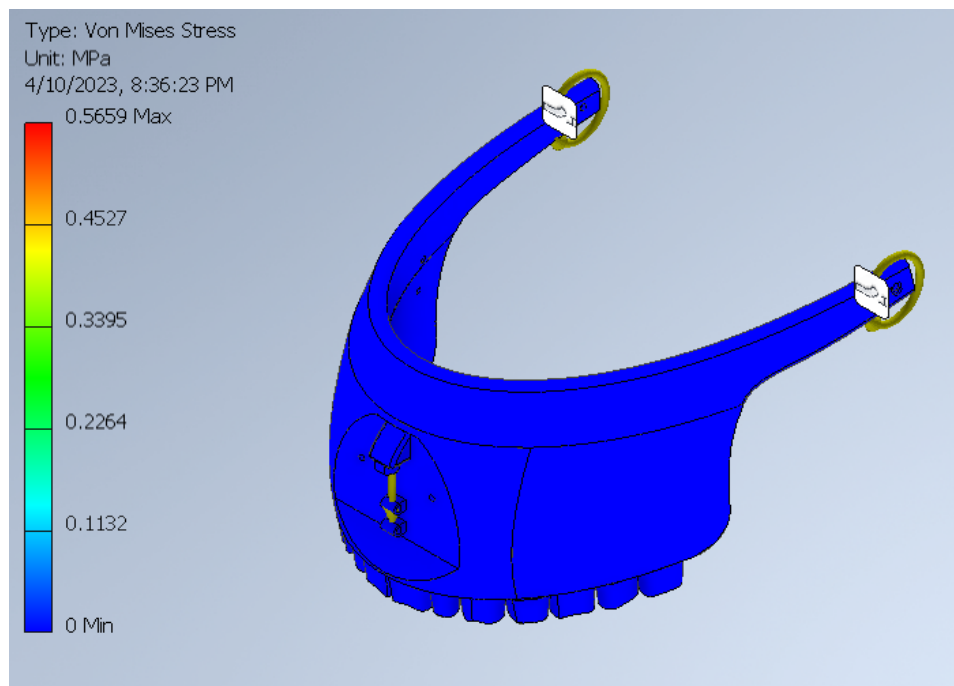


Figura 52: Análisis de esfuerzo por von Mises del maxilar frontal

El análisis de esfuerzos del maxilar trasero se ve en la Figura 53.

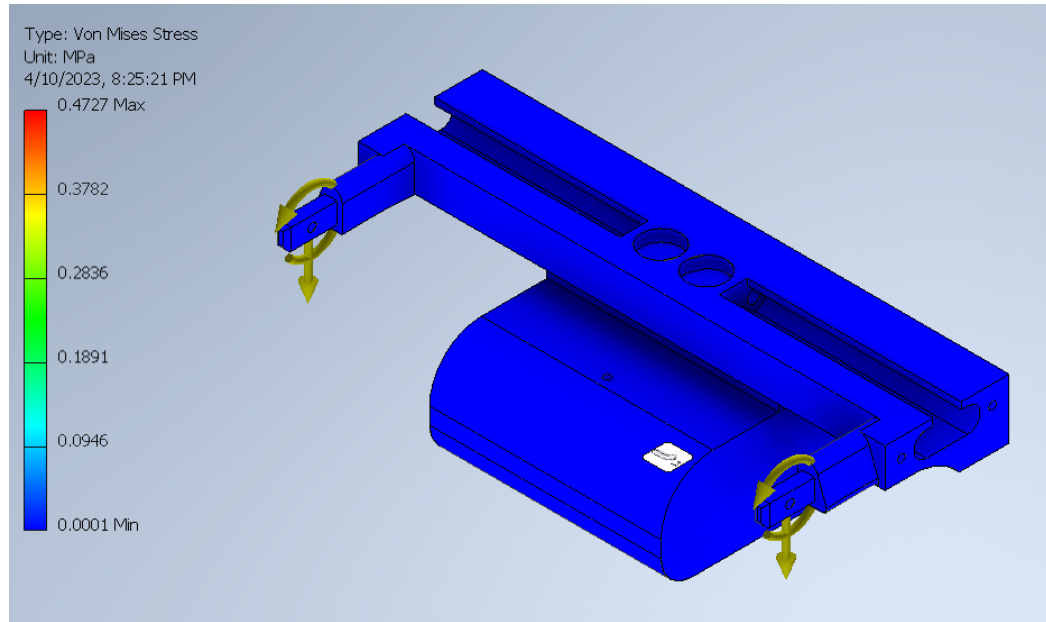


Figura 53: Análisis de esfuerzo por von Misses del maxilar trasero

14.1. Cableado de motores SG90

Adicional a lo anteriormente mencionado, también se arregló el cableado de los motores SG90 pues algunos necesitaban ser modificados para poder ser utilizados, es por esto que se decidió extender el largo de cada uno de sus cables, probar su funcionamiento y asignarles un número para poder identificarlos mejor y hacer un mapeo de ellos [10].

A continuación se muestra una tabla con los movimientos que realiza cada servo motor y como esta conectado al módulo que los controla.

Servomotor	Canal	Movimiento
Servo 0	Puerto 0	Ojos en 'x'
Servo 1	Puerto 1	Ojos en 'y'
Servo 2	Puerto 2	Párpado izquierdo
Servo 3	Puerto 3	Párpado derecho
Servo 4	Puerto 4	Ceja derecha 'y'
Servo 5	Puerto 5	Ceja izquierda 'y'
Servo 6	Puerto 6	Ceja derecha 'x'
Servo 7	Puerto 7	Ceja izquierda 'x'
Servo 8	Puerto 8	Labio iz delantero
Servo 9	Puerto 9	Labio iz trasero
Servo 10	Puerto 10	Labio der delantero
Servo 11	Puerto 11	Labio der trasero

Cuadro 1: Configuración de la conexión de servomotores y modulo

Troubleshooting para Open CM9.04 y motores Dynamixel

Al realizar distintas pruebas con el módulo OpenCM9.04 y los motores Dynamixel XL-320 y AX-12A se tuvieron varios inconvenientes a los que se le dió solución y se cree que dejandola forma de resolver estos problemas se deja una valiosa aportación para futuras iteraciones del proyecto.

15.1. Módulo microcontrolador OpenCM 9.04

Este módulo es fabricado y distribuido por Robotis, una empresa especializada en productos destinados a tener un uso dentro del mundo de la robótica. Es un microcontrolador con más de 10 años en el mercado, a continuación se hace una recapitulación de los errores más comunes presentados en su uso y su forma de resolverlos de manera segura, para obtener una vista de general de su funcionamiento se puede visitar el manual en la [página](#) de robotis o visitar la siguiente url: <https://emmanual.robotis.com/docs/en/parts/controller/opencm904/>. Donde se puede ver los drivers y librerías necesarias para poder trabajar en el IDE de Arduino versión 1.8.19.

Para poder resolver los siguientes problemas es necesario contar con los siguientes programas de Robotis: El primero es R+ Manager 2.0, programa en el que se puede realizar el firmware recovery del módulo OpenCm 9.04 y de los motores XL-320, y su simbolo es mostrado en la Figura [54](#).



Figura 54: Ícono de R+ Manager 2.0

Al abrir el programa nos encontramos con la interfaz gráfica, como se muestra en la Figura 55:

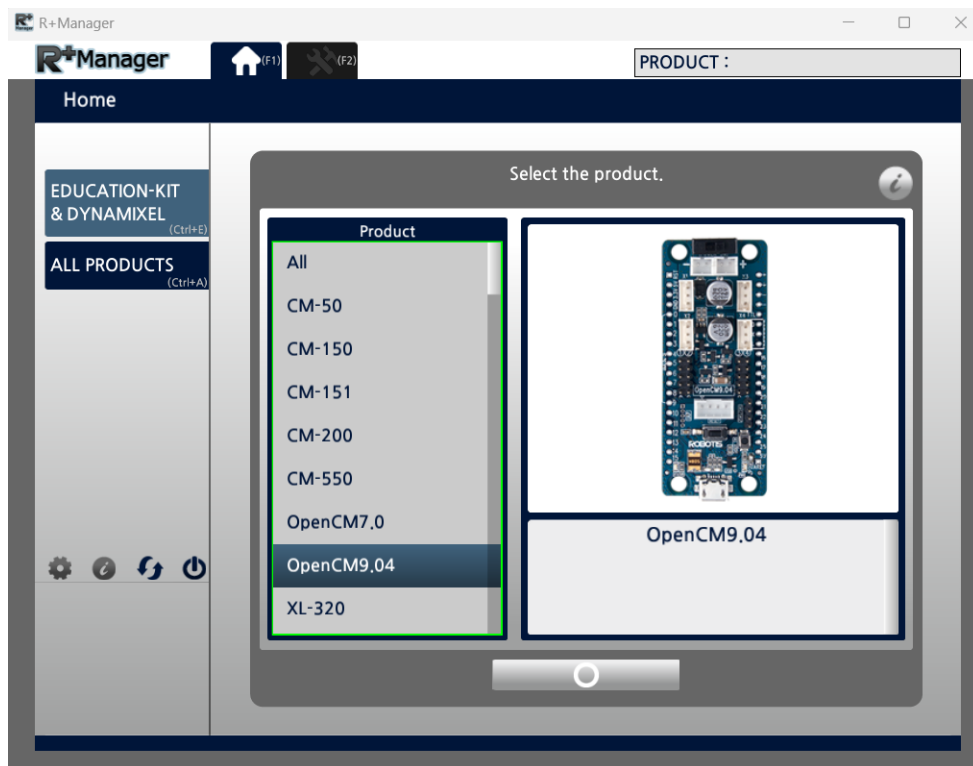


Figura 55: Interfaz de R+ Manager 2.0

El problema más común se muestra en la Figura 56:

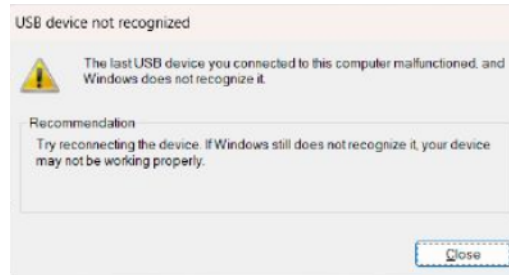


Figura 56: Problema más común

Este problema se da cuando nuestro computador no reconoce al módulo en uno de los puertos USB, esto puede suceder porque el módulo no se ha utilizado en mucho tiempo o ya hay una versión de firmware más reciente en el que se puede actualizar.

Y es en este caso en el que es necesario realizar un firmware recovery del módulo OpenCM 9.04, por lo que regresamos a R+ Manager y seleccionamos la opción de Firmware Recovery, como se ve en la Figura 57:

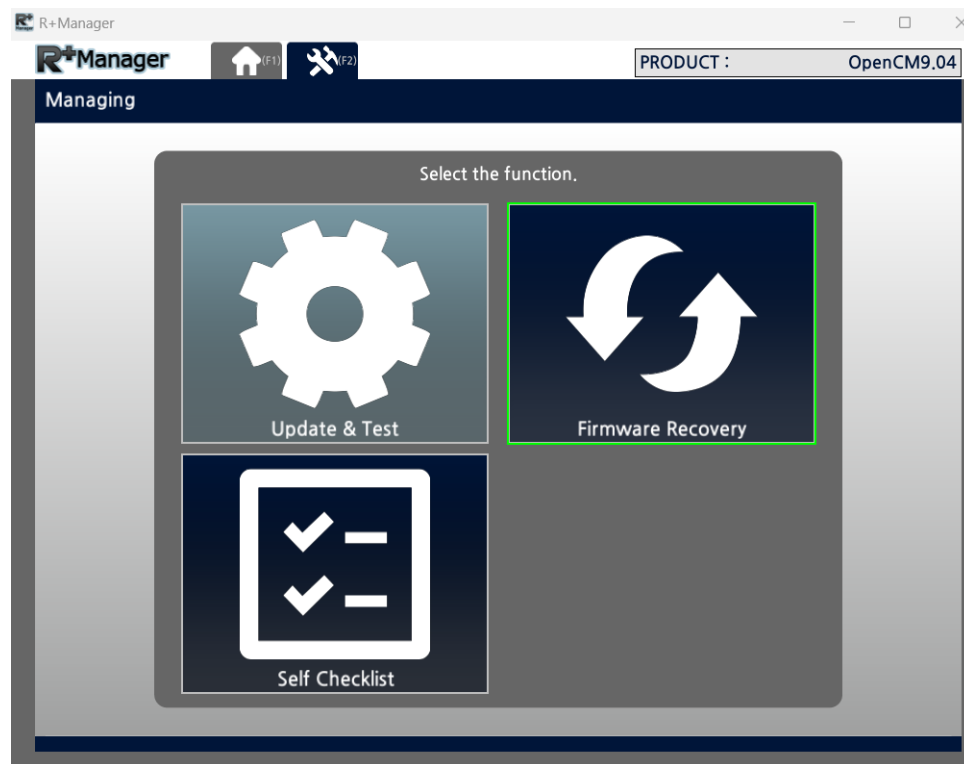


Figura 57: Firmware Recovery para OpenCM 9.04

Luego de seleccionar esa opción, seguimos con la recuperación del Firmware seleccionando la opción Next hasta culminar con el proceso. Como se puede observar en la Figura 58:

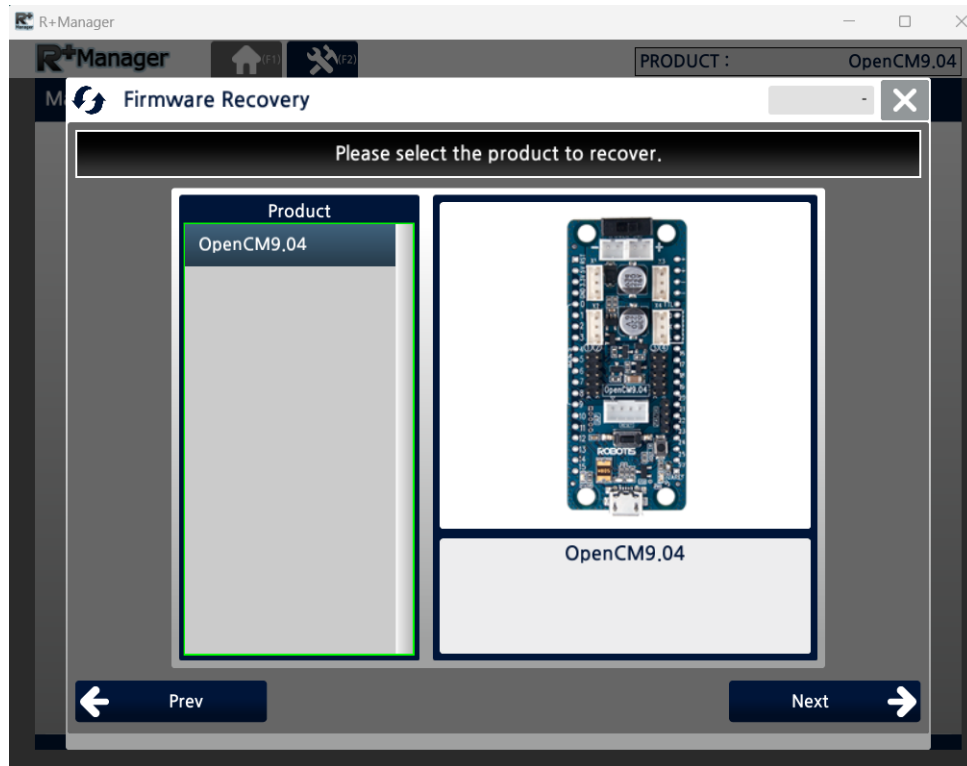


Figura 58: Proceso de Firmware Recovery para OpenCM 9.04

15.2. Motores Dynamixel XL-320

Al conectar estos motores al módulo OpenCM 9.04, lo primero que hay que revisar es que el Switch implementado en la placa, se encuentre en el lado positivo o '+' como se muestra en la Figura 59:



Figura 59: Switch implementado en OpenCM 9.04

De no estar seleccionado de manera correcta, los motores no funcionarán y no se podrán programar.

Si el switch se encuentra bien seleccionado, los leds rojos implementados en la parte trasera de los motores se encenderán al momento de conectarlos al módulo, si los leds no se encienden, significa que el Firmware de los motores no está funcionando de manera correcta. Es en este caso cuando regresamos al programa R+ Manager y seleccionamos la opción de XL-320 como se muestra en la Figura 60:

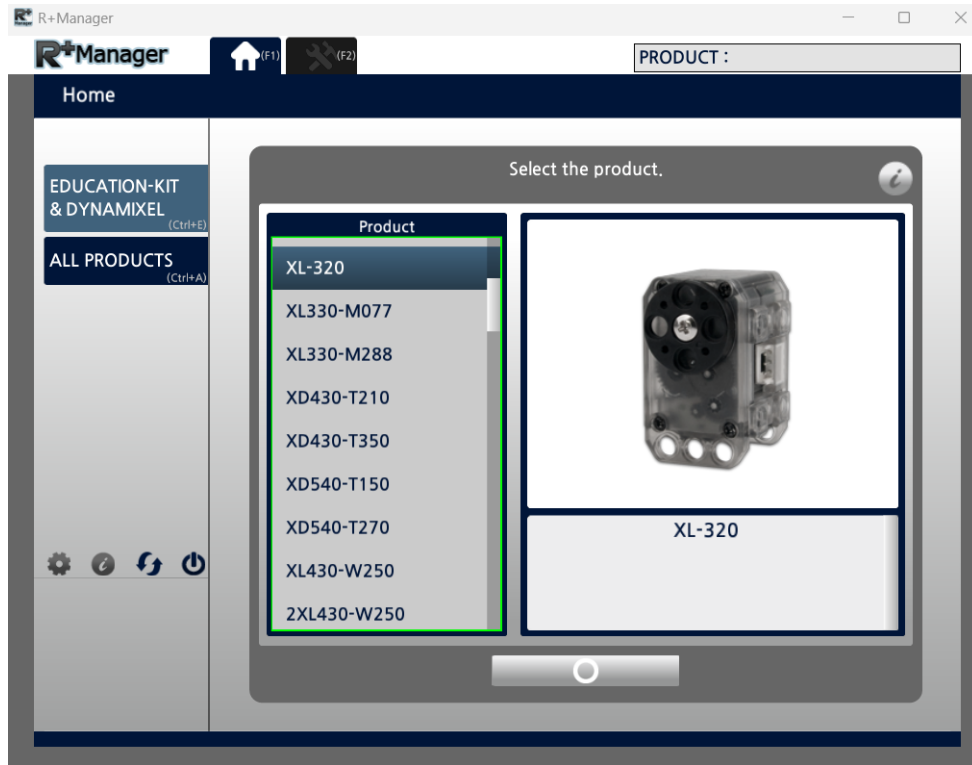


Figura 60: Selección de XL-320 en R+ Manager 2.0

Por lo que luego se procede a hacer un Firmware Recovery como se hizo con el módulo OpenCM 9.04 y siguiendo los mismos pasos, como se ve en la Figura 61:



Figura 61: Firmware Recovery de motor XL-320

Hay que recordar que para hacer el Firmware Recovery de estos motores se debe conectar uno por uno y no hacerlo con todos los motores a la vez.

15.3. Dynamixel Wizard

Este programa nos servirá para determinar el torque, velocidad y temperatura a la que operan los motores Dynamixel, su ícono lo podemos observar en la Figura [62](#).



Figura 62: Ícono de Dynamixel Wizard

En este programa podemos variar las características antes mencionadas tanto para los motores XL-320 y los motores AX-12A, su interfaz se muestra en la Figura 63:

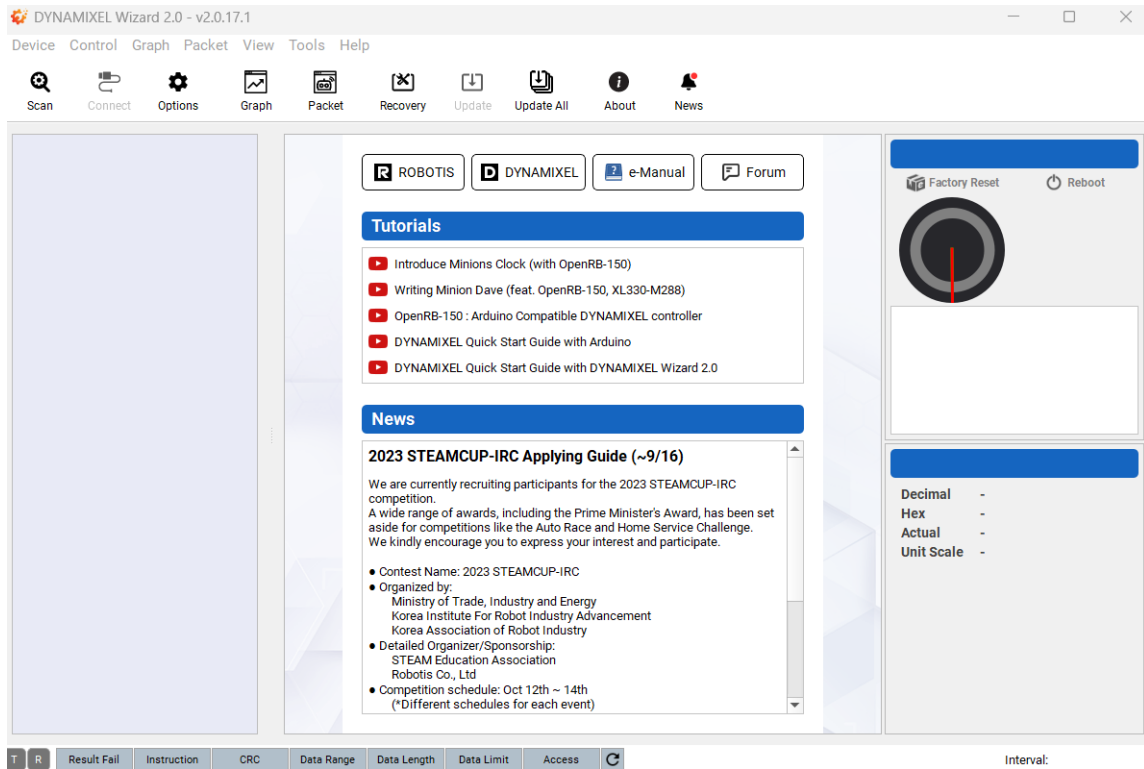


Figura 63: Interfaz de Dynamixel Wizard

15.4. ID motores Dynamixel

En el programa de Dynamixel Workbench también se puede cambiar el ID de cada uno de los motores, es importante saber el ID de cada motor pues en la programación estos obedecen al nombre que se les fue asignado. A continuación se muestra una tabla con cada motor, el ID que le fue asignado y el movimiento que realiza.

Servomotor	ID	Movimiento
XL-320	1	Motor derecho mandíbula
XL-320	2	Motor izquierdo mandíbula
XL-320	3	Labio frontal maxilar
XL-320	4	Labio frontal mandíbula
AX-12A	20	Motor derecho cuello
AX-12A	21	Motor izquierdo cuello
AX-12A	22	Rotación cuello

Cuadro 2: ID asignado a cada motor Dynamixel

Manuales implementados para el rostro animatrónico

Se implementaron 2 manuales para el rostro animatrónico, los cuales fueron el *Manual de ensamblaje* y el *Manual de mantenimiento*. Esto para en usos futuros darle un correcto funcionamiento al rostro. Se puede encontrar ambos manuales en el Capítulo 13: Anexos, en un link que redirige a una carpeta en Drive que tiene todos los documentos.

16.1. *Manual de ensamble*

En el *Manual de ensamblaje* se explica a detalle la forma de ensamblar cada uno de los módulos del rostro y no deformar las piezas que lo conforman, además, se incluye una lista de partes y links de donde conseguir la mayoría de los materiales en Guatemala.

Consta de un total de 34 páginas, con las secciones del ensamblaje y recomendaciones para los módulos de ojos, párpados, cejas, labios frontales y laterales, mandíbula, cuello y finalmente el ensamblaje completo.

El índice del manual se muestra en la Figura [64](#). La página tres del manual se encuentra en la Figura [65](#) para observar su formato. Se puede encontrar el manual actualizado en el capítulo de Anexos.

ÍNDICE

1. Módulo de ojos y párpados	3
1.1 Listado de partes de ojos y párpados	3
1.2 Ensamble de párpados	9
1.3 Ensamble de ojos	9
2. Módulo de cejas	11
2.1 Listado de partes de cejas	11
2.2 Ensamble de cejas	14
3. Módulo de labios, pómulos y mandíbula	16
3.1 Listado de partes de labios, pómulos y mandíbula	16
3.2 Ensamble de labios	20
3.3 Ensamble de pómulos	22
3.4 Ensamble de mandíbula	24
4. Módulo del cuello	25
4.1 Listado de partes del cuello	25
4.1 Ensamble del cuello	29
5. Ensamble completo	34

Figura 64: Índice del manual de ensamblaje

1. Módulo de ojos y párpados

1.1 Listado de partes de ojos y párpados

Las partes utilizadas para el ensamble de ojos y párpados se encuentra en la Tabla 1:




Nombre	Imagen	Cantidad
Base estacionaria ojos y párpados (1)		1
Ele base estacionaria ojos (2)		2
Soporte interno ojos (3)		2

Figura 65: Página 3 del manual de ensamblaje

16.2. *Manual de mantenimiento*

En el *Manual de mantenimiento* podemos encontrar el contenido necesario para poder darle un mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. Esto con el objetivo de alargar la vida útil de las piezas y actuadores de cada uno de los módulos del rostro animatrónico y del animatrónico en sí.

También se incluyen los tipos de cuidados y materiales que se deben de tener para mantener un correcto funcionamiento del rostro, además, los mantimientos programados en un año recomendados.

El índice del *Manual de mantenimiento* se observa en la Figura 66. La página tres del manual se encuentra en la Figura 67 para observar su formato. Se puede encontrar el manual actualizado en el capítulo de Anexos.

ÍNDICE	
1. Recomendaciones generales de mantenimiento	3
2. Mantenimiento de módulo de ojos y párpados	3
2.1 Revisión visual de piezas de base de ojos y párpados	3
2.2 Cambio de párpados	4
3. Mantenimiento de módulo de cejas	4
3.1 Revisión visual de piezas de cejas	4
4. Mantenimiento de módulo de labios, pómulos	5
4.1 Mantenimiento de labios	5
4.2 Mantenimiento de pómulos	5
5. Mantenimiento de módulo del cuello	6

Figura 66: Índice del *Manual de mantenimiento*

1. Recomendaciones generales de mantenimiento

- Mantener en un ambiente limpio y sin humedad, con temperaturas no mayores a 30 grados centígrados y no menores a 10 grados centígrados.
- No exponerse al sol.
- No exponerse a lluvias.
- Cambiar tornillos, resortes y barras roscaadas en caso de presentar oxidación o erosión.
- Dar mantenimiento cada 6 meses si uso no es continuo y cada 3 meses si se usa continuamente.
- Manufacturar piezas nuevas de 12 a 18 meses, dependiendo del estado.
- En el caso de los servomotores, hacer pruebas de funcionamiento cada 6 meses.
- No manejar abruptamente ni de manera indebida.
- Utilizar las herramientas adecuadas para ensamblar.
- No mantener en funcionamiento por más de 8 horas seguidas.
- Desconectar de la fuente después de terminar su uso.

2. Mantenimiento de módulo de ojos y párpados

2.1 Revisión visual de piezas de base de ojos y párpados

Se observa detenidamente y cuidadosamente si cada una de las piezas que se encuentra insertada a presión a la base no se encuentra deformada o en mal estado. Si alguna de estas piezas se encuentra rota o en mal estado, se procede a sacar los tornillos de las bielas que conectan motores y ojos, para poder sacar los ojos de los párpados ejerciendo pequeña presión. Como se ve en la Figura 1:

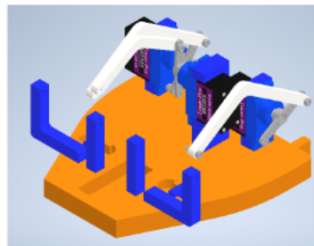


Figura 1: Base sin ojos ni párpados

Figura 67: Página 3 del *Manual de mantenimiento*

Conclusiones

- El rediseño implementado para el mecanismo de las cejas permite un movimiento fluido y con mayor rango que en el diseño original.
- El rediseño implementado para el mecanismo de las cejas es de más fácil manufactura y reemplazo que el diseño original.
- Se rediseñó y se implementó exitosamente en el párpado superior en material de resina.
- El rediseño e implementación del cuello soporta el peso completo de la cabeza y le permite un movimiento fluido de flexión y extensión y movimientos laterales.
- Se redactaron manuales de ensamblaje y mantenimiento del rostro animatrónico.
- Se rediseñaron e implementaron diversas piezas, de tal forma que su manufactura sea más eficiente y robusta.

- Utilizar materiales distintos a PLA para piezas que son altamente probables a fallar mecánicamente para probar distintas resistencias de materiales. Pues durante la manufactura se tenían piezas que si se tuvieran materiales más flexibles o más rígidos pues se hubieran ampliado la cantidad de experimentación. Ciertos materiales recomendados serían: PETG, ABS, NAILON, TPE, TPEU, TPC. Los cuales cuentan con distintas características mecánicas que ayudarían a determinar el mejor material en cada módulo del rostro.
- Implementar una capa de látex que simule ser piel o de materiales similares, para observar el funcionamiento del rostro animatrónico con este recubrimiento. Esto pues la última versión del rostro todavía tiene una apariencia muy mecánica y no muy similar a la de un humano. En el rostro se añadieron pines que ayudan a la posible sujeción de algún material y hacer pruebas mecánicas y de funcionamiento al rostro.
- Investigar sobre alternativas para disminuir el peso en impresiones 3D. Esto es importante pues hay partes del rostro como la mandíbula que tiene motores XL-320 que aunque suficientes pues pudieran funcionar mejor con un menor peso. Otro punto importante es el peso de la cabeza completa pues el cuello podría tener un mayor rango de movimiento y permitir marcar mejor ciertas emociones.
- En caso de ser necesario el reemplazar los resortes, cambiarlos llevando los mismos a una fabrica de resortes, pues en Guatemala solo se puede fabricar resortes teniendo una muestra. De no ser posible, pues será necesario probar unos nuevos resortes con un estudio experimental a prueba y error.
- Al tener 12 motores SG90 y que cada uno vaya conectado al módulo de 16 canales, será necesario utilizar un espiral para evitar que estos interfieran en el movimiento del rostro y si es necesario conectar o desconectar un motor, no sea una tarea complicada.
- Imprimir las piezas de ojos y párpados en material de resina para facilitar su uso, pues el coeficiente de fricción entre este material es menor.

- Imprimir los engranes utilizados en el módulo de las cejas en material de PLA para evitar que estos sufran desgastos importantes durante su uso.
- Utilizar hilo de Kevlar para nivel de ingeniería en los módulos de labios frontales y de cejas. Ya que este hilo soporta las cargas ejercidas por los motores para poder ejercer el movimiento deseado.
- Utilizar la versión 1.8.19 del IDE de Arduino para poder utilizar el módulo OpenCM 9.04. En otras versiones las librerías DynamixelWorkbench y Dynamixel2Arduino, que son las utilizadas en el proyecto, no funcionan pues tienen cierta incompatibilidad.

-
-
- [1] C. Jenatz, “Diseño de cabeza y cuello animatrónicos con dieciocho grados de libertad con movimientos suaves,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2020.
 - [2] E. Arts, “Ameca: The future face of robotics,” vol. 1, n.º 1-9, págs. 1-9, 2022.
 - [3] M. Benegas, “Diseño mecánico de cabeza humana robótica animatrónica,” Tesis de licenciatura, Universidad del Valle de Guatemala, 2018.
 - [4] A. Torres, “Músculos de la cara,” vol. 1, 2022.
 - [5] G. Rivera-Cardona, “Nervio facial, aspectos esenciales desde las ciencias biomédicas,” *Rev. Estomat*, vol. 20, n.º 2, págs. 36-44, 2012.
 - [6] B. Navarro, “Músculos del Cuello,” vol. 1, 2022.
 - [7] R. Norton, “Fundamentos de cinemática,” en *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*, Mc Graw Hill, 2013, págs. 29-31.
 - [8] A. Eskola, “Piñón Cremallera,” vol. 1, 2022.
 - [9] R. Budynas, “Poleas,” en *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, Mc Graw Hill, 2015, págs. 29-31.
 - [10] R. Ramdan, L. Lasmadi y P. Setiawan, “Sistem pengendali On-Off lampu dan motor servo sebagai penggerak gerendel pintu berbasis Internet of Things (IoT),” *Aviation Electronics, Information Technology, Telecommunications, Electricals, Controls*, vol. 4, n.º 2, págs. 211-224, 2022.
 - [11] F. E. Giesecke et al., “Dibujo técnico con gráficas de ingeniería,” *Biblioteca Hernán Malo González*, 2018.
 - [12] A. F. Choiri y B. Widiawan, “Penerapan IC 74LS241 Untuk Multi Aktuator Dynamixel AX-12A Pada Biped Robot,” *SEMNASKIT 2015*, 2018.

- Se puede consultar los archivos CAD en [CAD](#) o visitar la siguiente url: https://drive.google.com/drive/folders/1-8VmFBjiHtZq71Ls_TLqBzVKwlahvTPA
- Se puede consultar los archivos multimedia en [multimedia](#) o visitar la siguiente url: <https://drive.google.com/drive/folders/1SOB-DCLCOGGLCf8FkBmmSYYVHQe7NAmP>
- Se puede consultar los archivos y manuales en [documentos](#) o visitar la siguiente url: <https://drive.google.com/drive/folders/1-5Hnj3Rr90fHgh7zY2jcyTx2Hw4VHSxZ>

