

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Diseño y Construcción de una Prótesis Bio- Mecánica de un
Ala para una Lechuza Discapacitada**

Proyecto de Investigación

Shirley Monserrath Paredes Figueroa

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Mecánica

Quito, 14 diciembre de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño y Construcción de una Prótesis Bio-Mecánica de un Ala para
una Lechuza Discapacitada**

Shirley Monserrath Paredes Figueroa

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Patricio Gabriela Chiriboga PhD.

Firma del profesor

Quito, 14 de diciembre de 2018

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Shirley Monserrath Paredes Figueroa

Código: 00115544

Cédula de Identidad: 1723123848

Lugar y fecha: Quito, 14 diciembre de 2018

RESUMEN

En este proyecto se presenta el diseño detallado de una prótesis para reemplazar el ala de una lechuza discapacitada, basada en las características geométricas del ave y el mecanismo de apertura del ala. Se analiza tres opciones y en base a los requerimientos de diseño, se selecciona la mejor. Se presenta simulaciones con elementos finitos del sistema de la prótesis para estimar el rendimiento biomecánico y anclaje de este. Finalmente se obtienen los resultados de las pruebas del prototipo físico con la lechuza amputada. El desempeño biomecánico a largo plazo de este prototipo de prótesis, logrando brindar una mejor calidad de vida a la lechuza.

Palabras clave: Lechuza, Prótesis, Mecanismo, Grados de Libertad, Análisis de Fuerzas, Simulación.

ABSTRACT

This project presents the detailed design of a prosthesis to replace the wing of a disabled owl, based on the geometric characteristics of the bird and the opening mechanism of the wing. Three options are analyzed, the best option based on the designed requirements. Simulations of the prosthesis system are presented to estimate the biomechanical performance and anchorage of the same. Finally, the results of the physical prototype tests with the amputated owl are obtained. The long-term biomechanical performance of this prosthetic prototype demonstrates to achieve a better quality of life for the owl.

Key words:

Owl, Prosthesis, Mechanism, Degrees Of Freedom, Analysis Of Forces, Simulation.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
TABLA DE CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE GRÁFICAS	9
1. Introducción	13
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Biología y anatomía de una lechuza	15
2.2 Frecuencia y absorción del sonido en plumas.....	20
2.3 Teoría de Mecanismos	21
2.3.1 Fundamentos de Cinemática	21
2.3.2 Tipos de Movimiento:.....	22
2.3.3 Eslabones, Juntas.	23
2.3.4 Movilidad en mecanismos planos	24
2.3.5 Teoría del Análisis de posición.....	25
2.4 Diseño mecánico	26
2.4.1 Teoría de Análisis de Fuerzas	26
2.4.2 Esfuerzos.....	26
2.5 Análisis computacional.....	28
2.5.1 Elementos Finitos (FEA)	28
2.5.2 Teoría del Perfil y el Análisis De Arrastre Aerodinámico.....	29
2.5.3 Fluidos Dinámicos Computacionales (CDF)	33
3. Diseño	35
3.1 Biología y dimensiones morfológicas de una lechuza.....	35
3.2 Dimensiones reales de una lechuza.....	37
3.3 Análisis de peso del ala de una lechuza.	41
3.4 Parámetros de selección y análisis de alternativas del mecanismo y del anclaje	43
3.4.1 Selección de Alternativas.....	44
Alternativa 1: Mecanismo de 5 barras	44
Alternativa 2: Mecanismo de 3 barras.	44
Alternativa 3: Mecanismo de 6 barras	45
3.5 Análisis del mecanismo seleccionado para el anclaje.....	47
3.6 Movilidad Del Mecanismo	51
3.7 Análisis Posición.....	54

3.8	Ángulos Máximos y Mínimos	64
3.9	Análisis De Fuerzas	71
3.10	Análisis de fuerza en el eslabón DE.	80
3.11	Análisis de esfuerzo de flexión del ala.	85
3.12	Simulación Mecanismo FEA.	89
3.13	Simulación CFD.....	91
3.14	Simulación de Elementos finitos aplicando el peso y fuerzas aerodinámicas.	97
4.	Construcción y Pruebas.....	102
5.	Resultados y Discusión	107
5.1	Fuerzas resultantes del mecanismo.....	107
5.2	Resultados de elementos finitos.....	109
5.3	Resultados de CFD.	110
5.4	Apertura, cierre y aleteo del mecanismo.....	116
6.	Conclusiones	120
7.	recomendaciones.....	121
8.	Referencias bibliográficas.....	122
8.	Anexos	125
8.1	Presupuesto de la construcción de la prótesis	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades del material PVC	27
Tabla 2: Porcentaje de distribución de peso de un ave.	36
Tabla 3: Medidas de la Lechuza	37
Tabla 4: Medidas Ergonómicas de la lechuza	38
Tabla 5: Parámetros	47
Tabla 6: Análisis de alternativas anclaje.....	50
Tabla 7: Longitudes de cada eslabón del mecanismo del ala.	54
Tabla 8: Ángulos máximos utilizados en el mecanismo del ala.	54
Tabla 9: Resumen de ecuaciones	77
Tabla 10: Fuerza del eslabón X, Y.....	80
Tabla 11: Resultados coeficiente de lift y drag con variación.	93
Tabla 11: Resultados coeficiente de lift y drag con variación de velocidades.	110
Tabla 12: Resultados coeficiente de lift y drag con variación de velocidades	113
Tabla 13: Resultados obtenidos	116

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1: Plumaz, paleta interna y paleta externa.	15
Gráfico 2: Púas y barbillas de una pluma	16
Gráfico 3: Tipos de plumas de un ave.	16
Gráfico 4: Ala extendida de una lechuza	17
Gráfico 5: Hueso de Aves	18
Gráfico 6: Radiografía y tomografía del hombro codo de una lechuza.....	19
Gráfico 7: Vista vendrodosal del ala de una lechuza.....	19
Gráfico 8: Frecuencia de sonido vs absorción del sonido de las plumas.....	20
Gráfico 9: Variación de Frecuencia de sonido vs absorción del sonido de las plumas.	20
Gráfico 10: Esquema tridimensional	21
Gráfico 11: Rotación Pura	22
Gráfico 12: Traslación Pura	22
Gráfico 13: Movimiento de rotación y Traslación.....	23
Gráfico 14: Tipos de Eslabones	23
Gráfico 15: Clasificación de Juntas por GDL.....	24
Gráfico 16: Mecanismo de cadena abierta y cerrada.....	25
Gráfico 17: Análisis de elementos finitos de una junta.	28
Gráfico 18: Perfil 3D de una lechuza.....	29
Gráfico 19: Perfil 2D de una lechuza.....	29
Gráfico 20: Diagrama de cuerpo libre de un cuerpo en un fluido	30
Gráfico 21: Tipo de Flujos.....	31
Gráfico 22: Diagrama de Cuerpo libre de un perfil aerodinámico	31
Gráfico 23: Curva entre el coeficiente de elevación respecto a la velocidad	32
Gráfico 24: Curva entre el coeficiente de arrastre respecto a la velocidad.....	33
Gráfico 25: Simulación CFD de un perfil de ala.	34
Gráfico 26: Nombre de las partes del ala de un ave	35
Gráfico 27: Diámetro de huesos y unión.	37
Gráfico 28: Medidas Ergonómicas de la lechuza	39
Gráfico 29: Medidas Ergonómicas del ala.....	40
Gráfico 30: Ala de una lechuza.....	41
Gráfico 31: Mecanismo de 5 barras Alternativa 1.	44
Gráfico 32: Mecanismo Alternativa 2.....	45
Gráfico 33: Mecanismo de 6 barras Alternativa 3	46
Gráfico 34: Alternativa 1	48
Gráfico 35: Alternativa 2	49
Gráfico 36: Alternativa 3	49
Gráfico 37: Anclaje parte superior.....	51
Gráfico 38: Anclaje parte inferior.....	51
Gráfico 39: Número de eslabones y juntas del mecanismo	52
Gráfico 40: Trayectoria cinemática del mecanismo	53
Gráfico 41: Ángulos máximos del mecanismo seleccionado	53
Gráfico 42: Circuito 1	55
Gráfico 43: Circuito 2	57
Gráfico 44: Circuito 3	59
Gráfico 45: Circuito 4	60
Gráfico 46: Circuito 5	62

Gráfico 47: Ángulos máximos	64
Gráfico 48: Ángulos mínimos.....	64
Gráfico 49: Mecanismo de Chase Circuito 1	65
Gráfico 50: Mecanismo de Chace Circuito 2.....	67
Gráfico 51: Mecanismo de Chace Circuito 3.....	68
Gráfico 52: Mecanismo de Chace Circuito 4.....	69
Gráfico 53: Análisis de Fuerzas	71
Gráfico 54: Link 2.....	72
Gráfico 55: Link 4.....	73
Gráfico 56: Link 3.....	74
Gráfico 57: Link 6.....	75
Gráfico 58: Link 5.....	76
Gráfico 59: Eslabón DE	80
Gráfico 60: Ángulos máximos de la estructura.....	82
Gráfico 61: Eslabón DE	83
Gráfico 62: Análisis de Flexión	84
Gráfico 63: Diagrama de Cortante.....	84
Gráfico 64: Diagrama de Momento	84
Gráfico 65: Distribución del peso	85
Gráfico 66: Análisis de Flexión	86
Gráfico 67: Diagrama de Cortante.....	86
Gráfico 68: Diagrama de Momento	86
Gráfico 69: Elementos Finitos.	89
Gráfico 70: Mallado del mecanismo.....	90
Gráfico 71: Esfuerzo de Von Mises del mecanismo.....	90
Gráfico 72: Factor de seguridad.....	91
Gráfico 73: Anclaje del ala parte superior e inferior	91
Gráfico 74: Perfil de ala, corte transversal.....	92
Gráfico 75: Dominio para perfil de ala	92
Gráfico 76: Aplicación de ecuación en el programa.....	93
Gráfico 77: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CL.....	94
Gráfico 78: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CD en un ángulo de 0°	94
Gráfico 79: Simulación CFD, coeficientes aerodinámicos, perfil a 0°	95
Gráfico 80: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CL ángulo 60°	96
Gráfico 81: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CD ángulo 60°.....	96
Gráfico 82: Simulación CFD, coeficientes aerodinámicos, perfil a 60°	97
Gráfico 83: Elementos finitos, vuelo 0°	98
Gráfico 84: Von Mises, vuelo 0°	98
Gráfico 85: Factor mínimo de seguridad, vuelo 0°	99
Gráfico 86: Desplazamiento, vuelo 0°	99
Gráfico 87: Elementos finitos, vuelo 60°	100
Gráfico 88: Von Mises, vuelo 0°	100
Gráfico 89: Factor mínimo de seguridad, vuelo 0°	101
Gráfico 90: Desplazamiento, vuelo 0°	101
Gráfico 91: Lista de partes de la prótesis.....	103
Gráfico 92: Brocas de esmeril.....	103
Gráfico 93: Ensamble de la estructura de la prótesis.....	104
Gráfico 94: Plumaz primarias, secundarias y plumón.	104
Gráfico 95: Anclaje de plumas	105
Gráfico 96: Anclaje superior e inferior	105

Gráfico 97: Construcción del mecanismo con alas.....	106
Gráfico 98: Fuerzas aplicadas en cada punto.....	107
Gráfico 99: Distribución de fuerzas en el ala, ángulos máximos.	108
Gráfico 100: Distribución de fuerzas en el ala, ángulos mínimos.	109
Gráfico 101: Unión de Codo.....	109
Gráfico 102: Perfil de ala 3D.....	110
Gráfico 103: Caso 1 CFD 0° con una velocidad de 22[m/s]	111
Gráfico 104: Caso 2 CFD 0° con una velocidad de 15[m/s]	112
Gráfico 105: Caso 3 CFD 0° con una velocidad de 7 [m/s]	112
Gráfico 106: Caso 1 CFD 60° con una velocidad de 22[m/s]	114
Gráfico 107: Caso 1 CFD 60° con una velocidad de 15[m/s]	114
Gráfico 108: Caso 1 CFD 60° con una velocidad de 7[m/s]	115
Gráfico 109: Perfil de ala y mecanismo de ala	116
Gráfico 110: Apertura y cierre del mecanismo con acople.....	117
Gráfico 111: Aleteo del mecanismo con acople	117
Gráfico 112: Acople con topes	118
Gráfico 113: Acoples con la lechuza	118
Gráfico 114: Construcción final.....	119

A mis padres.....

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y la interacción de la bio-mecánica han dado paso al desarrollo de métodos e innovaciones de prótesis no intrusivas tanto para seres humanos como animales. Las prótesis reemplazan extremidades faltantes debido a traumatismo, deformidad congénita o en algunos casos amputaciones, para mejorar su calidad de vida. (Flynn et al., 2015).

En este proyecto de titulación se realizará una prótesis de ala para poder dar movilidad a una lechuza proveniente del centro de rescate Yanacocha, ubicado en el Oriente de Ecuador. Esta ave recibió un disparo por parte de personas que, debido a sus creencias culturales, creen que las lechuzas son símbolo de mala suerte, espiritismo y brujería, en regiones africanas creen que el ave representa la encarnación del demonio. Las personas que no poseen un criterio adecuado sobre la vida silvestre, aceptan estos mitos como realidades y agreden a los animales con el fin de acabar con su vida. (Liu, Hua, Yan, & Jin, 2016) (Sagar, Teotia, Sahlot, & Thakur, 2017). La lechuza fue herida en el ala derecha, en la parte superior del hombro, desgarrando completamente el ligamento propatagial, patagio y el húmero. El ave se encuentra discapacitada, por ende, no puede saltar, volar, ni cazar su propio alimento.

Martin Kaufmann, fundador de Orthopets, una empresa establecida en Estados Unidos que se dedica a la fabricación de prótesis y órtesis veterinarias tuvo la idea de realizar este tipo de artefactos para ayudar a mejorar la movilidad y funcionalidad de miembros de los animales, dándoles una mejor calidad de vida. Anteriormente los veterinarios tenían como opción a estas malformaciones la amputación de extremidades o la eutanasia (Redacción Medio Ambiente, 2015).

En el presente documento, en el capítulo 3, se especifica el diseño y construcción de una prótesis funcional del ala de una lechuza. En el capítulo 2 que comprende el Marco Teórico, se especifican los requerimientos necesarios para la selección de la mejor opción y de esta manera plantear el diseño. Posteriormente se realiza cálculos para el mecanismo de despliegue del ave, además, los resultados obtenidos del análisis del mecanismo y el análisis realizado en elementos finitos. En el capítulo 4 se encuentra la construcción del prototipo a realizarse en PVC con uniones, membrana, plumas y anclaje. Se realizan ajustes de construcción y anclaje, para proporcionar una ergonomía estable, también se realizan pruebas. En el capítulo 5 se establecen las conclusiones y recomendaciones sobre el prototipo en base a los análisis previamente realizados. Se muestra el margen de error, resistencia y

vida útil de la prótesis. De este modo, con los resultados obtenidos se busca mejorar la calidad de vida de la lechuza, aumentar el campo de investigación y aplicación de prótesis.

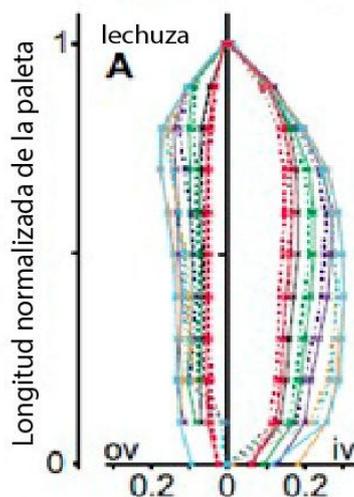
2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla las características anatómicas y biológicas que presentan las aves en su estructura ósea y distribución de plumas; la mecánica de vuelo de la lechuza y la teoría del diseño del mecanismo como: fundamentos de cinemática, tipos de movimiento, eslabones, juntas, grados de libertad, teoría sobre el análisis de posición del mecanismo para determinar los ángulos máximos y mínimos.

2.1 Biología y anatomía de una lechuza

La anatomía de las lechuzas posee características que las hacen aptas para el vuelo, su piel es fina, seca y posee terminaciones nerviosas. La funcionalidad del vuelo se atribuye a diferentes funciones en la paleta interna y externa. Durante el recorrido descendente, las paletas internas se presionan hacia los racks rígidos y las paletas externas de las plumas superpuestas, creando un perfil aerodinámico cerrado. Durante la carrera ascendente, las plumas se separan, permitiendo que el aire fluya entre rémiges a través del ala. Las rémiges son las plumas largas, duras, de forma asimétrica, pero simétricamente iguales, como se observa en el gráfico 1, las coberturas son las plumas largas (Bachmann. T, Klän. S, Baumgartner. W & Klaas. M., 2007)

PALETA INTERNA



PALETA EXTERNA

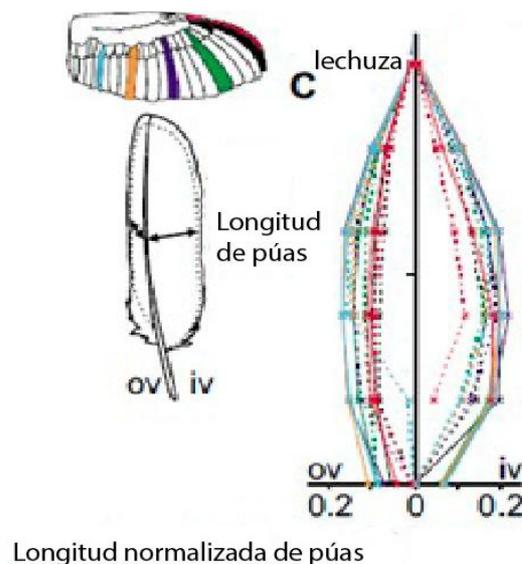


Gráfico 1: Plumas, paleta interna y paleta externa.

Fuente: (Bachmann. T, Klan. S, Baumgartner. W & Klaas. M., 2007)

El desarrollo del vuelo silencioso de las lechuzas se debe al cambio en el comportamiento aerodinámico del ala. La superficie blanda es el resultado de cambios en la forma de las púas de las plumas y barbas en comparación con otras especies de aves, como se observa en el gráfico 2. La característica aerodinámica de un ala cambia a lo largo de su sentido de acorde y de envergadura, también puede cambiar la forma de las púas y las barbillas en las direcciones de acorde y envergadura. (Wegger.M, 2017)

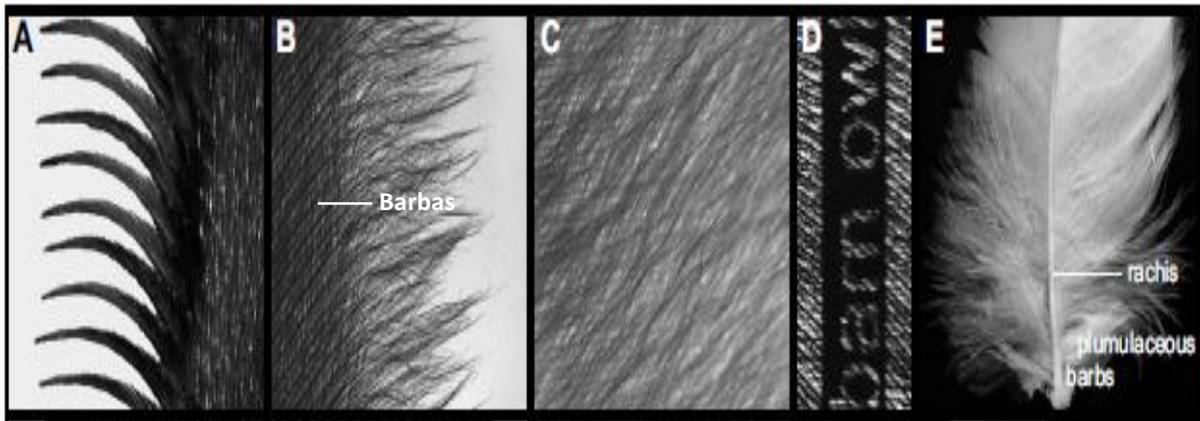


Gráfico 2: Púas y barbillas de una pluma

Fuente: (Wegger.M, 2017)

Las plumas cumplen funciones diversas como: controlar la temperatura corporal, sirven de fuerza aerodinámica durante el vuelo, su coloración permite el camuflaje o la comunicación entre los distintos individuos. Se describen tres tipos de plumas principales, como se observa en el gráfico 3: Plumas de revestimiento, subdivididas en coberteras tectrices, remeras que corresponden a las plumas primarias y secundarias y timoneras (Gil, 2011).

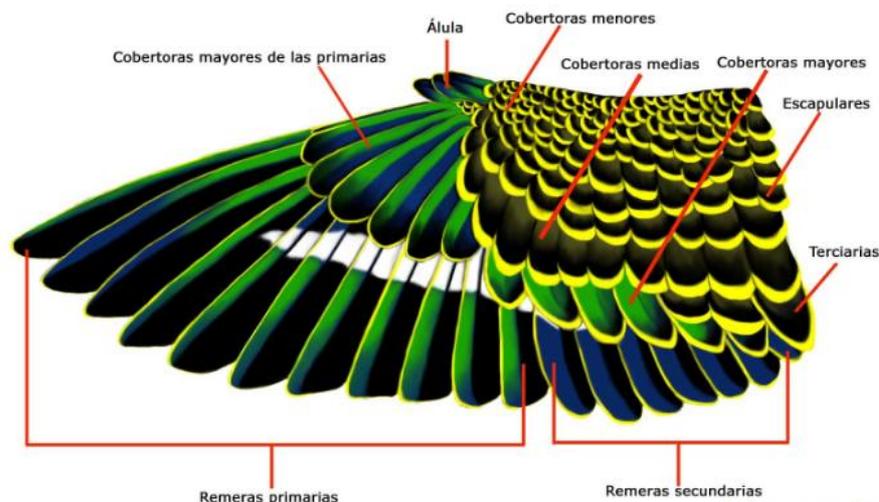


Gráfico 3: Tipos de plumas de un ave.

Fuente: (Rodríguez, 2006)

Los mecanismos que conducen a la reducción de emisión de ruido, se enfatiza en sus plumas como: la profundidad y el área de las paletas externas de las rémiges son más pequeñas que las interiores, posee radios menores, una cánula más grande y las plumas son translúcidas, como se observa a continuación en el gráfico 4. (Weger & Wagner, 2017).

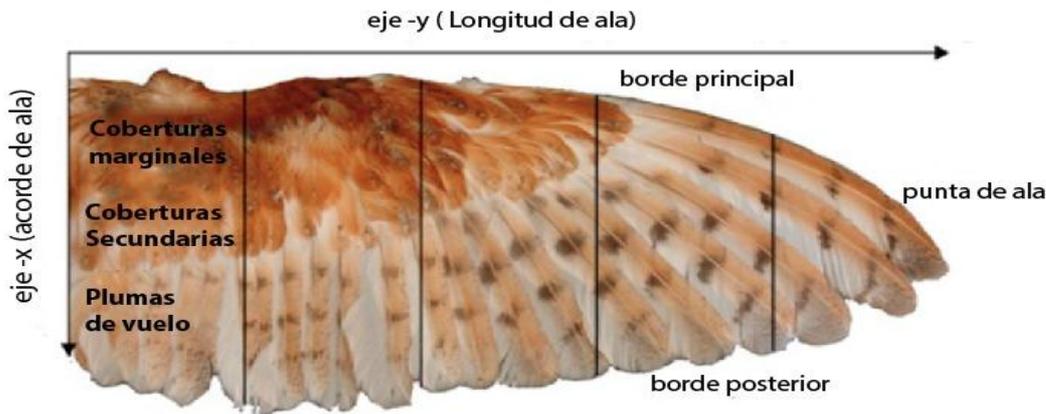


Gráfico 4: Ala extendida de una lechuza

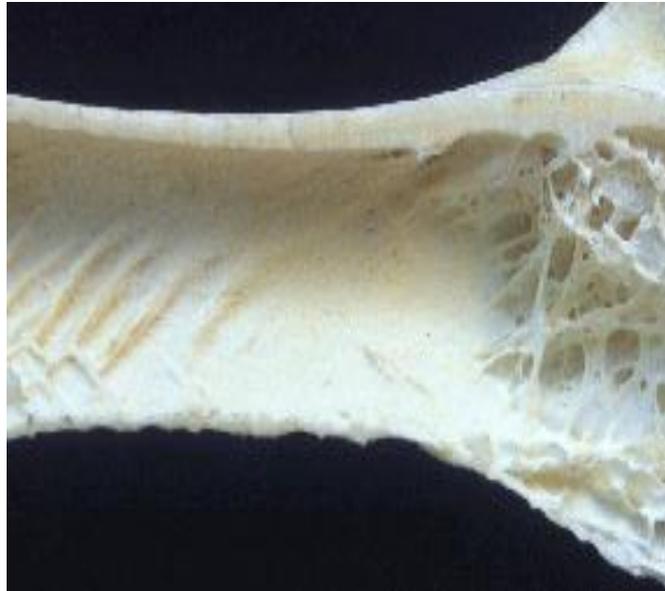
Fuente: (Weger & Wagner, 2017)

El aire no solo fluye entre las rémiges, sino también fluye a través de una sola pluma desde la parte ventral a la parte dorsal de la pluma y viceversa. Es interesante notar que Mueller y Patone midieron el flujo de aire a través de la veleta y descubrieron que las paletas internas eran menos permeables al aire que las paletas externas, la veleta es un dispositivo giratorio que consta de una placa que gira libremente, un señalador que indica la dirección del viento y una cruz horizontal que indica los puntos cardinales. (Bachman, 2007).

El esqueleto de las aves es ligero, sus huesos contienen aire, lo que se conoce con el nombre de neumatización que sustituye a la médula ósea. Las cavidades óseas neumatizadas están en comunicación con el sistema respiratorio, su finalidad es disminuir el peso corporal para favorecer el vuelo (Christina, 2017).

Los huesos de las aves son ricos en sustancias inorgánicas como fosfato cálcico. Los huesos largos presentan una cavidad medular que contiene una red de trabéculas como se observa en el gráfico 5, éstas aumentan la resistencia de los huesos que los hace más duros pero a la vez más frágiles y menos elásticos. Cuando se produce una fractura se astillan fácilmente, esto

imposibilita su reparación mediante empleo de placas de metal o clavos intramedulares que destruyen la estructura interna. Lo más apropiado para la corrección de fracturas es el uso de fijadores externos. (Gil, 2011),



Trabéculas

Gráfico 5: Hueso de Aves

Fuente: (Walsberg & King, 1978).

En el gráfico 6 y 7 se presenta una tomografía y radiografía de una lechuza en la cual se aprecia de mejor manera los huesos, músculos, ligamentos y la unión de las plumas al brazo de la lechuza. El esqueleto del miembro torácico está integrado por tres huesos: el coracoides, la clavícula y la escápula.

El hueso coracoides se encuentra conectando al esternón con el miembro torácico, ayuda a mantener alejada el ala del esternón durante el tiempo de vuelo del ave, las costillas evita que el tórax colapse durante el aleteo del ala. Los huesos cúbito y el radio están curvados, lo que los protege de fuerzas de doblamiento en el plano del ala. En la mano surgen tres dedos: el mayor que está provisto de dos falanges, el menor, con una falange y el anular (Smith & Smith, 1991)

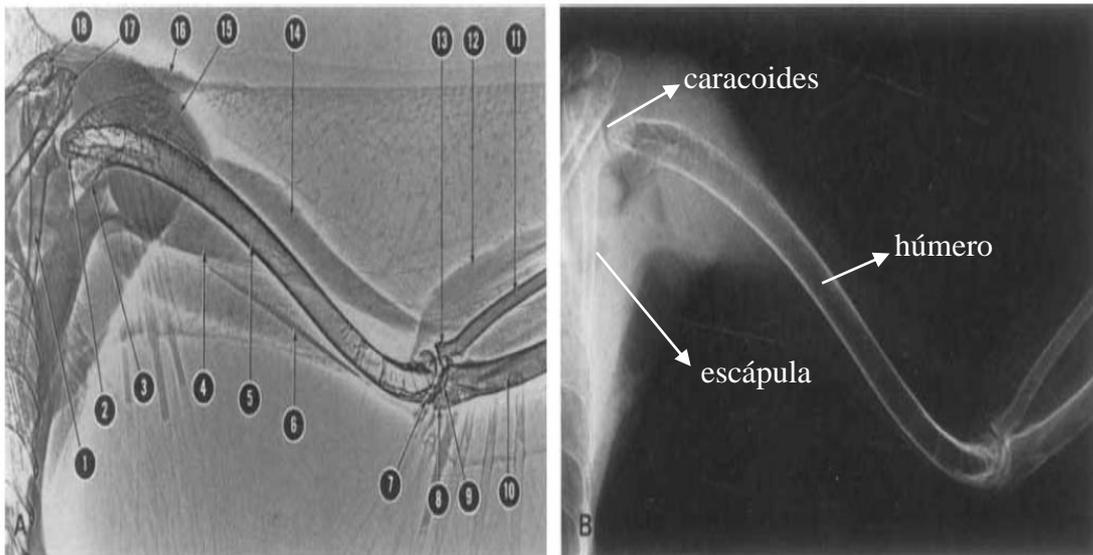


Gráfico 6: Radiografía y tomografía del hombro codo de una lechuza

Fuente: (Smith & Smith, 1991)

Las partes más importantes detalladas en el gráfico 6 se describen a continuación: 1 = Escápula, 5 = Húmero, 10 = Cúbito, 11 = Radio, 13 = Cabeza del radio, 17 = Caracoides

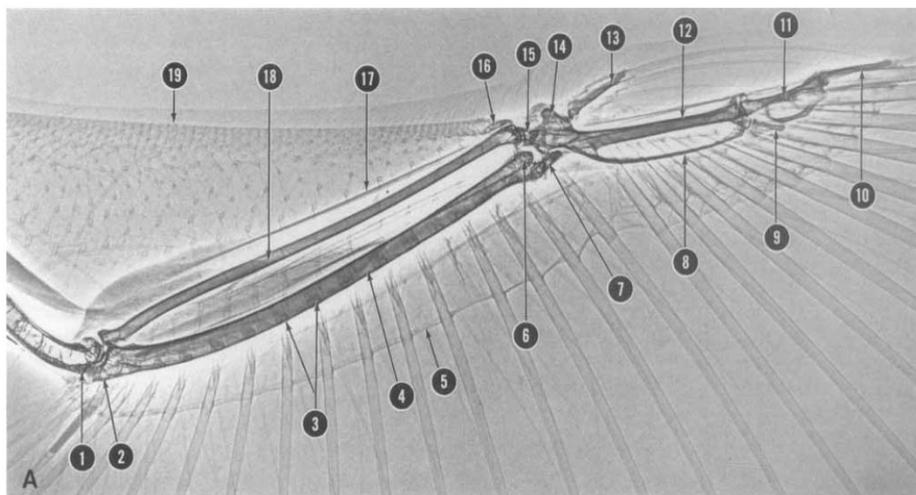


Gráfico 7: Vista vendrodorsal del ala de una lechuza

Fuente: (Smith & Smith, 1991)

Las partes más importantes detalladas en el gráfico 7 se describen a continuación: 3 = Colocación de plumas de vuelo secundarias en ulna, 4 = Cuerpo de ulna, 5 = Postpatagio, 7 = Hueso carpiano cubital, 8 = Menor hueso metacarpiano, 9 = Dígito menor, 10 = Falange distal (segunda) del dígito principal, 11 = Falange proximal (primera) del dígito principal, 12 = Metacarpiano mayor hueso, 13 = Dígito alular, 18 = Cuerpo de radio, 19 = Propatagio, (Smith & Smith, 1991).

2.2 Frecuencia y absorción del sonido en plumas

En la investigación de Kun Chen¹, Qingping Liu¹, Genghua Liao¹, Ying Yang¹, Luquan Ren¹, Hongxiu Yang, Xin Chen (2012), se encontró que la estructura porosa que poseen las plumas de las lechuzas sirven para la absorción del sonido y el coeficiente de absorción a mayor frecuencia, el coeficiente es el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente por una superficie. En el gráfico 8 se observa la comparación de propiedades de absorción del sonido con una lechuza y un buzzard (zopilote), que posee una envergadura de 110 [cm] aproximadamente, y de una lechuza con una envergadura aproximada de 80 [cm] (Chen et al., 2012).

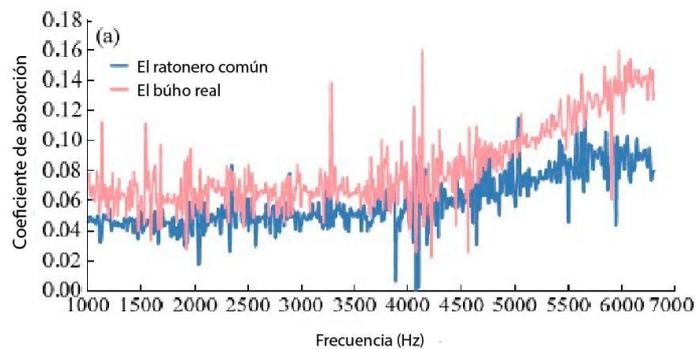


Gráfico 8: Frecuencia de sonido vs absorción del sonido de las plumas.

Fuente: (Chen et al., 2012)

El coeficiente de absorción aumenta significativamente en las frecuencias por encima de 4.5 kHz, un búho alcanza el 0.13 de coeficiente de absorción a la frecuencia de 6 kHz, mientras tanto el máximo el coeficiente de absorción acústica del zopilote, conocido también como el ratonero común es 0.08. La frecuencia de ruido de una lechuza se encuentra por encima de 1,6 kHz, la frecuencia es superior a 6.3 kHz. Los flecos que posee la parte superior del ala son útiles para suprimir la turbulencia y el vórtice, de esta manera se evita una fuente de ruido como se observa en el gráfico 9. (Chen et al., 2012).

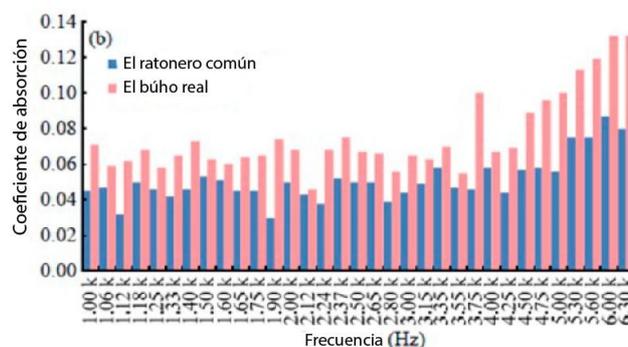


Gráfico 9: Variación de Frecuencia de sonido vs absorción del sonido de las plumas.

Fuente: (Chen et al., 2012)

2.3 Teoría de Mecanismos

Para este proyecto se emplea conocimientos de diseño mecánico, dinámica y cinemática de los mecanismos, de tal manera que el diseño del mecanismo de apertura y cierre de la prótesis pueda cumplir con los requerimientos y función. Un mecanismo es la conexión que existe entre cuerpos conectados por articulaciones móviles para formar una cadena con un eslabón fijo. El propósito de este es que el movimiento tenga cambios.

2.3.1 Fundamentos de Cinemática

La Cinemática es el estudio del movimiento sin la consideración de fuerzas. Uno de los objetivos de la cinemática es crear o diseñar los movimientos que se quieren obtener de partes mecánicas, para posteriormente realizar el cálculo matemático de la posición, velocidad, aceleraciones que se presentan en estas partes (Norton, 2009). Se requiere controlar el Grado De Libertad (GDL) para poder definir la posición bidimensional en cualquier punto en un sistema de coordenadas, es decir de dos longitudes x , y ; el tercero es una coordenada angular para definir el ángulo con respecto a los ejes.

En el gráfico 10 se observa un esquema tridimensional en el cual se encuentran seis GDL, tres longitudes (x , y , z) y tres ángulos (θ_x , θ_y , θ_z). Para propósitos de síntesis y análisis cinemáticos iniciales se define a los cuerpos cinemáticos como rígidos y sin masa. No se pueden determinar las deformaciones de un cuerpo hasta definir su tamaño, forma, propiedades de los materiales y cargas (Norton, 2009).

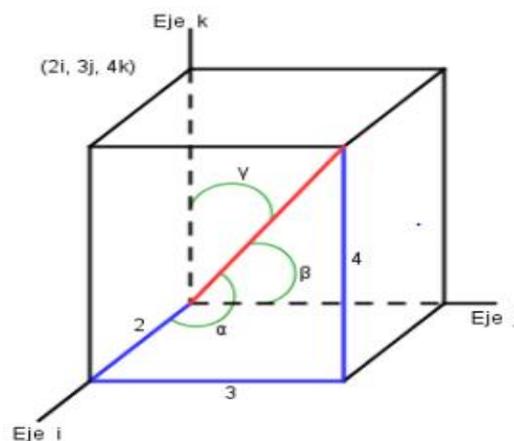


Gráfico 10: Esquema tridimensional

Fuente: (Shigley, 2001)

2.3.2 Tipos de Movimiento:

Un cuerpo rígido es libre de moverse dentro de un marco referencial, tiene la combinación simultánea de traslación y rotación. Si se encuentra en un plano tridimensional, este puede tener la rotación alrededor de un eje, y traslación simultánea. En un plano, o espacio bidimensional, existe la combinación de rotación simultánea alrededor de un eje, es decir perpendicular al plano, y la traslación descompuesta a lo largo de dos ejes en el plano. (Norton, 2009).

Existen varios tipos de movimientos de los cuales podemos mencionar la rotación y la traslación, la combinación de ambos se describe a continuación:

Rotación pura: El cuerpo posee un centro de rotación, este no tiene movimiento con respecto al marco de referencia es decir es un tipo de rotación “estacionario” como se observa el gráfico 11. Los otros puntos del cuerpo son los que describen arcos alrededor del centro. La línea de referencia trazada en el cuerpo a través del centro hace un cambio en su orientación angular (Norton, 2009).

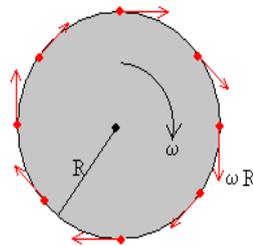


Gráfico 11: Rotación Pura

Fuente: (García, 2016)

Traslación pura: Los puntos del cuerpo describen trayectorias rectilíneas, paralelas, curvilíneas, como se observa en el gráfico 12. La línea de referencia trazada en el cuerpo cambia su posición lineal, sin embargo, no hay ningún cambio en la orientación angular. (Norton, 2009).

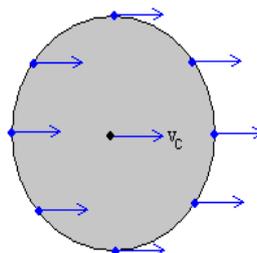


Gráfico 12: Traslación Pura

Fuente: (García, 2016)

La traslación y rotación: Este tipo de movimientos son independientes del cuerpo, no es necesario que los dos movimientos se encuentren juntos, como se presenta en el gráfico 13 (Norton, 2009).

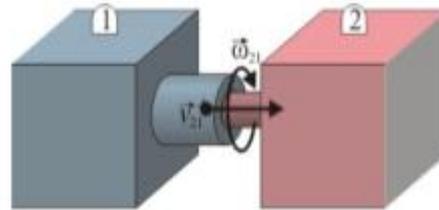


Gráfico 13: Movimiento de rotación y Traslación

Fuente: (Astudillo, 2014).

2.3.3 Eslabones, Juntas.

Los eslabones conocidos con el nombre en inglés (links), son los bloques de construcción básicos de todos los mecanismos, éstos se conectan entre sí para tener y transmitir un movimiento, son rígidos, es decir no poseen movimiento relativo entre dos o más puntos arbitrarios del mismo eslabón.

En el gráfico 14 se observan varios ejemplos de eslabones entre estos: el eslabón binario posee dos nodos, el eslabón ternario posee tres nodos, el eslabón cuaternario posee cuatro nodos. (Norton, 2009).

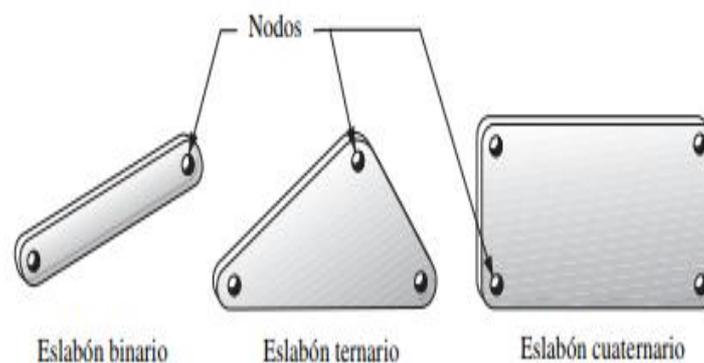


Gráfico 14: Tipos de Eslabones

Fuente: (Norton, 2009).

Para que un mecanismo tenga utilidad los movimientos que existen entre eslabones no deben ser completamente arbitrario, deben tener restricciones y así se empleen movimientos adecuados. Los movimientos relativos se obtienen mediante la elección de eslabones y tipos de juntas para conectarlos. Cada tipo de articulación posee características y movimientos específicos como se observa a continuación en el gráfico 15:

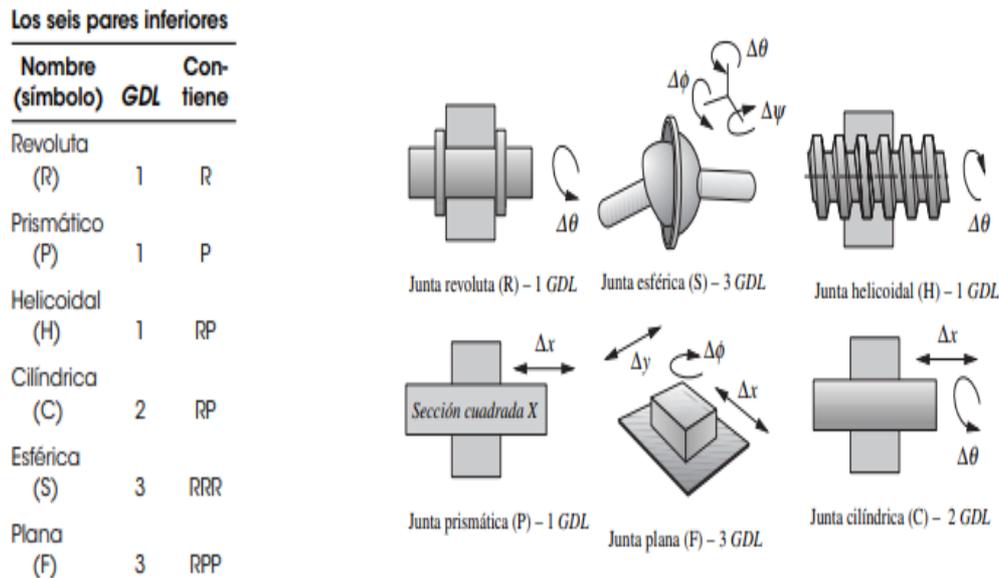


Gráfico 15: Clasificación de Juntas por GDL.

Fuente: (Norton, 2009)

El término *par inferior* describe las juntas que tienen contacto superficial como con un pasador rodeado por un orificio. El término *par superior* describe juntas que poseen contacto de punto o línea. Es necesario que exista holgura entre el orificio y el pasador, este contacto se vuelve de línea, conforme el pasador tiene contacto solo con un lado o parte del orificio. Un bloque que se desliza sobre una superficie plana, tiene contacto sólo en puntos discretos, son las partes superiores de las asperezas superficiales (Shigley, 2001). En el gráfico 15 se puede observar los seis pares inferiores posibles, sus grados de libertad y sus símbolos.

2.3.4 Movilidad en mecanismos planos

Para determinar la movilidad, se debe considerar el número de eslabones, así como las juntas y las interacciones entre ellos, como se observa en el gráfico 16. Cualquier eslabón en un

plano tiene tres GDL, cuando cualquier eslabón está conectado a tierra o unido al marco de referencia, se eliminarán sus tres GDL. Determinada por la ecuación de Gruebler, se utiliza este método para determinar los grados de libertad y se realiza con la ecuación [1].

$$GDL = M = 3(L - 1) - 2J_1 \quad [1]$$

donde M es el grado de libertad o movilidad, L es el número de eslabones, J₁ es el número de juntas de 1 GDL, J₂ es el número de juntas de 2 GDL.

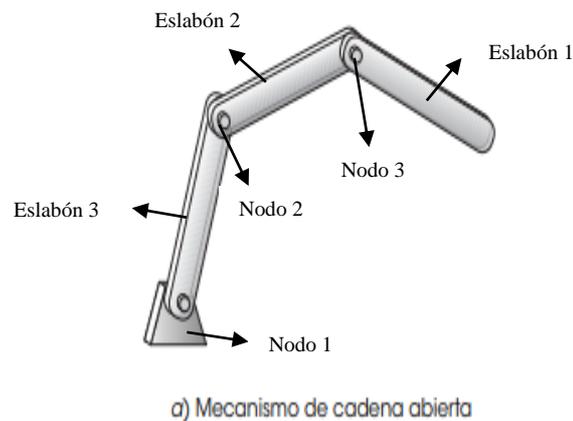


Gráfico 16: Mecanismo de cadena abierta y cerrada

Fuente: (Norton, 2009).

2.3.5 Teoría del Análisis de posición

Para el análisis de posición se toma en cuenta el cierre de circuito, en la cual se junta la posición y el desplazamiento del sistema tratado. Para la solución directa se puede resolver de forma gráfica, mediante el uso de vectores, magnitudes y dirección. Otra forma de resolución es plantear ecuaciones simultáneas, no lineales. Se sigue un planteamiento analítico con relación al cierre de circuito y el uso de álgebra compleja. A pesar de que los números complejos no son vectores, se pueden usar para la representación de estos en un plano tomando en consideración ejes reales e imaginarios, deben coincidir en los ejes (X_i, Y_i) del sistema absoluto de coordenadas. La utilidad de números complejos en el análisis de un plano es por la facilidad de pasar a la forma polar. Cualquier ecuación vectorial que se encuentre en el plano se puede reducir a una expresión de tres términos, con dos incógnitas como lo plantea el mecanismo de Chace, a continuación, se presenta la ecuación [2] y la clasificación por casos e incógnitas: (Shigley, 2001)

$$r_1 e^{j\theta_1} + r_2 e^{j\theta_2} = s e^{j\theta_s} \quad [2]$$

- Caso 1 Magnitud y dirección del mismo vector.
- Caso 2a Magnitudes de dos vectores diferentes.
- Caso 2b Magnitud de un vector y dirección de otro.
- Caso 2e Direcciones de dos vectores diferentes.

Se utiliza el Caso 2a Magnitudes de dos vectores, para cada uno de los links del mecanismo que se presentará en el capítulo 3.

2.4 Diseño mecánico

2.4.1 Teoría de Análisis de Fuerzas

En el análisis de fuerzas se utiliza cuerpos rígidos, se hace el estudio de eslabones por separado con cada una de sus reacciones. Se obtiene un sistema de ecuaciones e incógnitas que son las reacciones, para resolver se lo hace en forma matricial con la ecuación [3], como se explica a continuación (Shigley, 2001):

$$[A][R] = [b] \quad [3]$$

donde $[A]$ es la matriz de coeficientes, $[R]$ es el vector de reacciones, y $[b]$ es el vector de equilibrio, que representa todos los términos de los coeficientes que no se multiplican directamente con ninguna de las incógnitas en el sistema. El problema se resuelve teóricamente como se detalla con la ecuación [4].

$$[R] = [A]^{-1}[b] \quad [4]$$

donde $[A]^{-1}$ es la matriz inversa de la matriz $[A]$. Dado que es una matriz que posee el mismo número de ecuaciones e incógnitas, se utiliza herramientas computacionales para un cálculo con mayor exactitud.

2.4.2 Esfuerzos

El análisis de estructuras complejas se determina mediante la separación de cada elemento, para un estudio y análisis posterior, empleando diagramas de cuerpo libre y obtener información del comportamiento del sistema total (Shigley, 2001).

Para el análisis de esfuerzos, se analiza: el esfuerzo normal, el esfuerzo de flexión, mediante la ubicación de los esfuerzos más grandes que posea el sistema, y el tipo de material a ser utilizado. Con ayuda de elementos finitos se obtiene una mejor visualización del sistema en estudio. En la ecuación [5] se representa al esfuerzo, donde F es fuerza, A es área. En la ecuación [6] se representa la ecuación de flexión (bending), M es el momento, C es la distancia del eje neutro a la fibra más alejada, I es la inercia del cuerpo.

$$\sigma_x = F / A \quad [5]$$

$$\sigma_{bending} = \frac{M_C}{I} \quad [6]$$

En el factor de seguridad para la estructura se utiliza la ecuación [7] de diseño mecánico, donde se compara S_y que es el esfuerzo máximo permisible de la estructura del mecanismo con $\sigma_{admisible}$ que es la fuerza del material propuesto (Shigley, 2001).

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{admisible}} \quad [7]$$

El material a ser utilizado es el PVC, debido al peso ligero y a las propiedades que este posee como se presenta en la Tabla 1, que serán utilizados para el cálculo de esfuerzos y factor de seguridad con las ecuaciones [5,6,7].

Tabla 1: Propiedades del material PVC

Fuente: (Shigley, 2001)

Propiedades	Símbolo	Equivalencia	Unidades
Densidad	ρ_{PVC}	1450	$\frac{kg}{m^3}$
Módulo de Elasticidad	E	2.4	GPa
Resistencia a la Tracción	UTS	$52 * E6$	Pa
Resistencia al Rendimiento o Límite Elástico	σ_y	$4.14 * E7$	Pa

2.5 Análisis computacional

2.5.1 Elementos Finitos (FEA)

El análisis de elementos finitos conocido como FEA, siglas en inglés (Finite Element Analysis) es una técnica numérica que ayuda al análisis, diseño estructural y desarrollo, mediante la comparación de resultados analíticos con resultados hechos por simulaciones de elementos finitos que permite al diseñador cambios y mejoras de prototipos antes que este sea manufacturado. En el gráfico 17 se observa un ejemplo del análisis estructural de elementos finitos, existe una mejor visualización de esfuerzos, torque, desplazamientos, y apreciación de los elementos críticos de diseño.

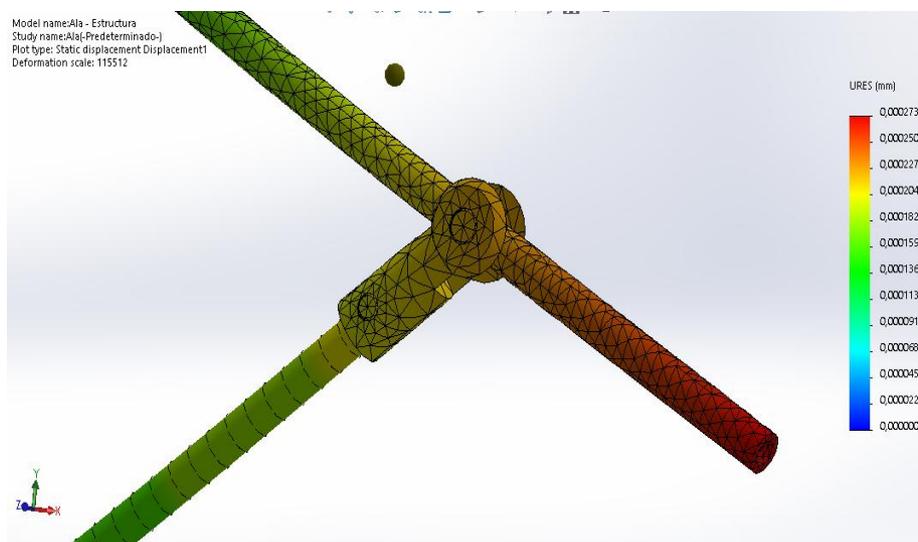


Gráfico 17: Análisis de elementos finitos de una junta.

Respecto a un sistema de coordenadas globales se presenta una ecuación que permita la transformación de coordenadas locales a globales.

$$K^e \cdot a^e = f^e$$

Donde K^e es la matriz de rigidez del elemento, f^e los vectores de fuerza nodales y a^e la matriz.

Un sistema de coordenadas globales se representa con la ecuación $r' = T^{-1} \cdot r$, donde T es un vector ortogonal y se utiliza para pasar de un sistema local a coordenadas globales.

Interpretando el vector r' como $[U_i' V_j']^T$ y r como $[U_i V_j]^T$

Se presenta la ecuación matricial:

$$r' = T^{-1} \cdot r$$

$$\begin{bmatrix} U_i' \\ V_i' \\ U_j' \\ V_j' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{21} & 0 & 0 \\ n_{12} & n_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{11} & n_{21} \\ 0 & 0 & n_{12} & n_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i' \\ V_i' \\ U_j' \\ V_j' \end{bmatrix}$$

2.5.2 Teoría del Perfil y el Análisis De Arrastre Aerodinámico

Para imitar la estructura de superficie aterciopelada natural del ala de una lechuga con características importantes como: diámetro, longitud, densidad de filamentos que son cuerpos en forma de hilo muy fino, los mismos que tienen una variación mínima en el ala. La superficie natural consta de 200 pelos delgados aproximadamente con un diámetro $d \approx 6 \mu\text{m}$ por mm^2 , estos pelos tienden a permanecer unidos como se observa en el gráfico 18.

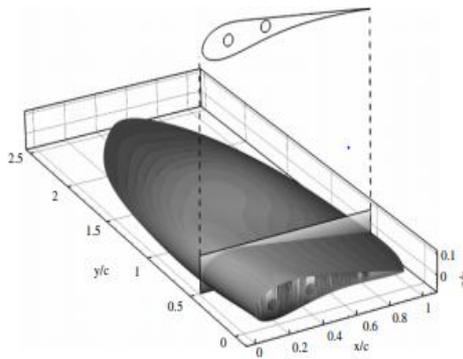


Gráfico 18: Perfil 3D de una lechuga

Fuente: (Kln et al., 2012)

A continuación, en el gráfico 19 se presenta la estructura superficial del ala en 2D basadas en lechuzas, de modo que la superficie superior del ala quede completamente cubierta. (Kln et al., 2012).

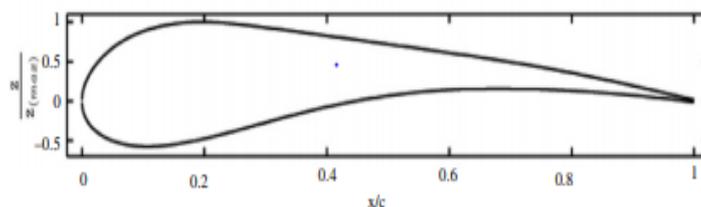


Gráfico 19: Perfil 2D de una lechuga

Fuente: (Kln et al., 2012)

Para realizar un análisis aerodinámico se debe definir conceptos como: el coeficiente de elevación conocido en las siglas en inglés como C_L (Lift coeficient), el coeficiente de arrastre conocido por las siglas en inglés como C_D (Drag Coeficient) y cómo actúan estas fuerzas en una superficie que atraviesa un fluido. En el análisis de fluidos se sabe que cualquier objeto que atraviese un fluido tiene un campo de presión en su proximidad, este campo posee una variación de presión y crea una resultante de fuerza en la superficie del objeto (Kln et al., 2012)

El C_L , es el componente de fuerza normal a la trayectoria. El C_D , es el componente de la fuerza que se encuentra tangente a la trayectoria. El propósito del análisis de arrastre es crear funciones que permitan describir al coeficiente de arrastre de todo un perfil, en función del coeficiente de sustentación. La resultante es el componente de la fuerza resultante entre Lift y Drag como se observa a continuación en el gráfico 20 (Gudmondsson. S, 2010).

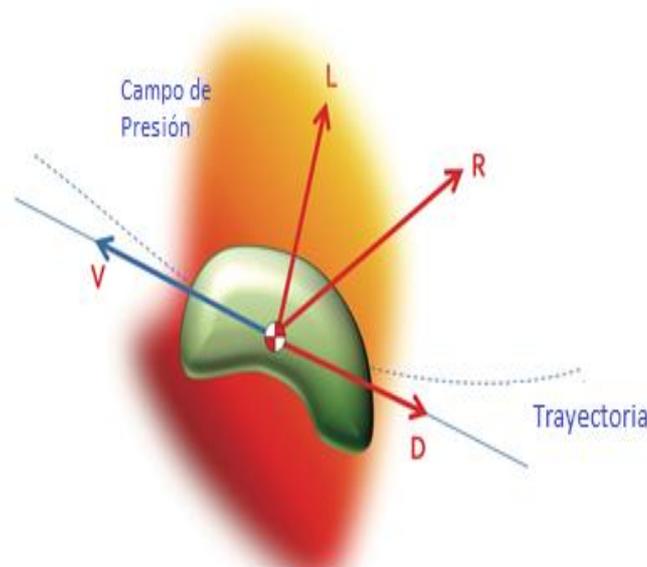


Gráfico 20: Diagrama de cuerpo libre de un cuerpo en un fluido

Fuente: (Gudmondsson. S, 2010).

Los tres diferentes tipos de flujo dependen del tipo de número de Reynold (Re) que es entre estos: Flujo Laminar ($Re < 2000$), en este caso las líneas de corriente fluyen a velocidad constante, el Flujo Turbulento ($Re > 4000$) las líneas de corriente son caóticas y va en diferentes direcciones, el Flujo Separado tiene las líneas de corriente separadas de la superficie, como se observa en el gráfico 21. (Gudmondsson. S, 2010)

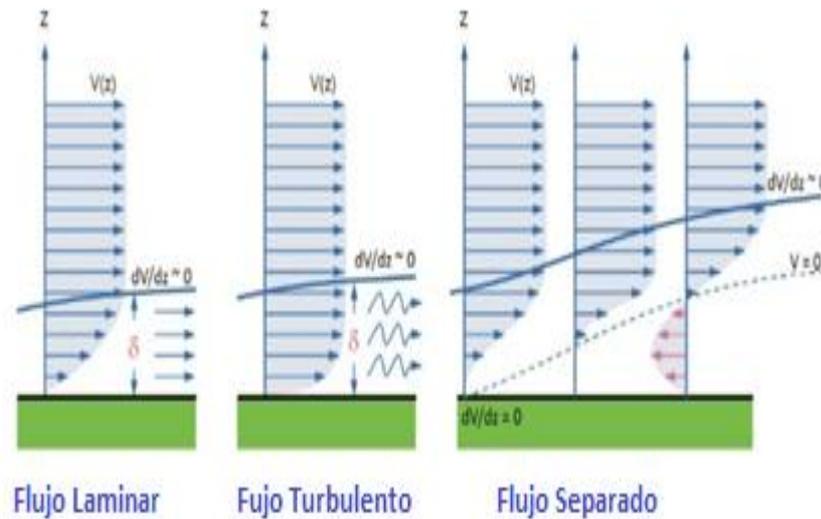


Gráfico 21: Tipo de Flujos

Fuente: (Gudmondsson. S, 2010)

Cuando un flujo atraviesa un perfil a la R , se genera momento y fuerzas aerodinámicas debido a la distribución de presiones del flujo y el esfuerzo cortante sobre la superficie del cuerpo, el esfuerzo de cizallamiento o cortante se debe a la acción en la superficie causada por la fricción entre el aire y el cuerpo. Las ecuaciones que se presentan a continuación se utilizan para el cálculo del coeficiente de los coeficientes de elevación Lift y Drag planteados en un perfil aerodinámico, como se demuestra en el gráfico 22. (Gudmondsson. S, 2010)

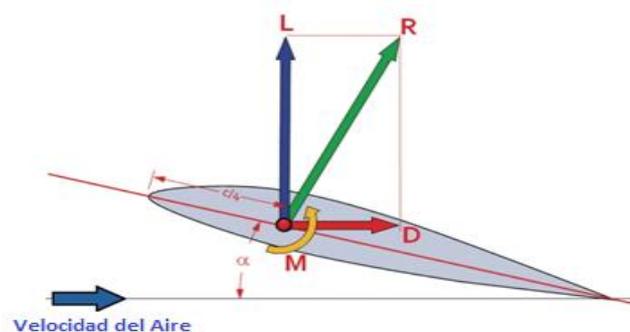


Gráfico 22: Diagrama de Cuerpo libre de un perfil aerodinámico

Fuente: (Gudmondsson. S, 2010)

El coeficiente de Lift C_L se calcula con la ecuación [8], la sustentación es la presión generada sobre un cuerpo que atraviesa un fluido,

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 * S} \quad [8]$$

Donde ρ es la densidad del aire medida en [kg/m³] o [slugs/ft³], L es la sustentación, que se encuentre en dirección perpendicular a la velocidad de corriente incidente, V es la velocidad del aire medida en [m/s] o [ft/s], S es el área referencial de un perfil de área referencial, en el gráfico 23 se observa la curva entre el coeficiente de elevación respecto a la velocidad.

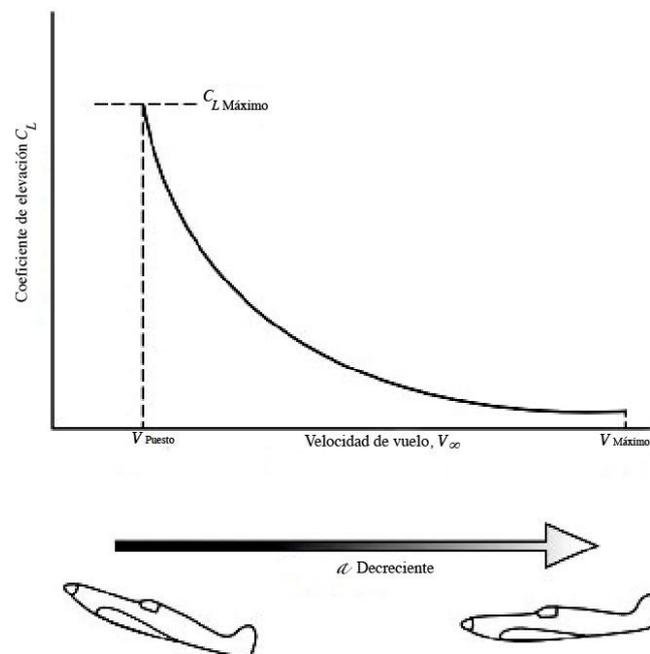


Gráfico 23: Curva entre el coeficiente de elevación respecto a la velocidad

Fuente: (Gudmondsson. S, 2010).

El coeficiente de Drag C_D se calcula con la [9]:

$$C_D = \frac{2D}{\rho V^2 * S} \quad [9]$$

donde ρ es la densidad del aire medida en [kg/m³] o [slugs/ft³], V es la velocidad a la que se encuentra el objeto que atraviesa el fluido medido en [m/s] o [ft/s], S es el área referencial de un perfil de área referencial, D es la fuerza de drag, que se obtiene en la multiplicación del área y la presión, como se observa en el gráfico 24. (Gudmondsson. S, 2010)

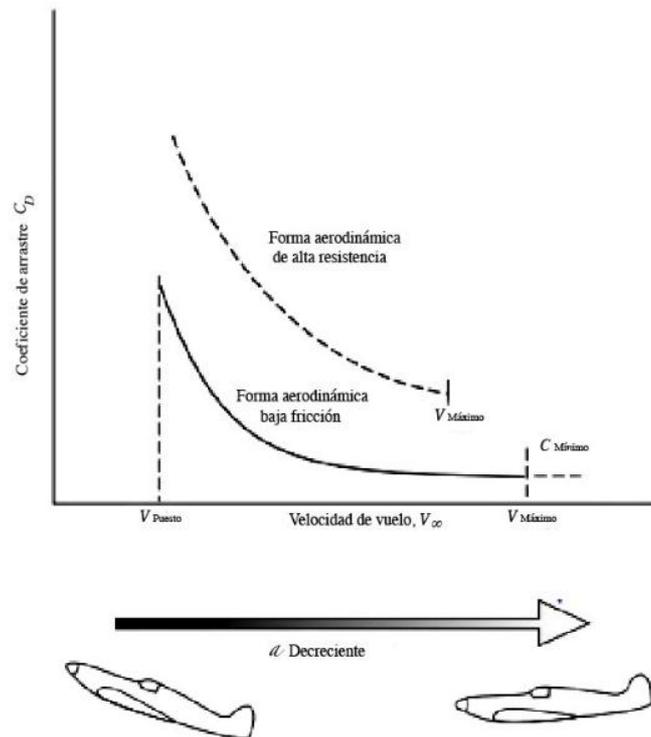


Gráfico 24: Curva entre el coeficiente de arrastre respecto a la velocidad

Fuente: (Gudmondsson. S, 2010)

2.5.3 Fluidos Dinámicos Computacionales (CDF)

La dinámica de fluidos computacional conocido con las siglas en inglés CFD, (Computer Dynamic Fluids). Se ha desarrollado para dar soluciones a problemas complejos de la mecánica de fluidos en busca de predecir el flujo de fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas, etc. CFD utiliza métodos y modelos numéricos gobiernan el fenómeno como: conservación de masa, momento, energía, cantidad de momento (Stokes, 2016).

En el gráfico 25 se observa un ejemplo de CFD, aplicado en la industria aeroespacial en el ala de prueba para un avión. Existe una mejor visualización de presión y velocidad que atraviesa este objeto en un fluido.

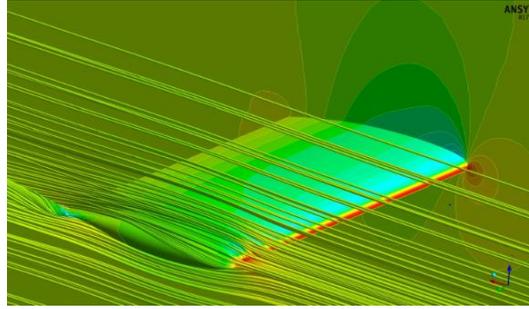


Gráfico 25: Simulación CFD de un perfil de ala.

Fuente: (Stokes, 2016)

El CFD se presentan diferentes a métodos como la discretización por ejemplo si se quiere calcular la derivada de una función escalar $U(x)$ evaluada en un punto x_0 , tenemos:

$$U(x_0 + \Delta x) = U(x_0) + \Delta x \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x_0} + \frac{\Delta x^2}{2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \Big|_{x_0} + \dots$$

Con esto se tiene que la primera derivada de $U(x)$ puede aproximarse por:

$$\frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{x_0} = \frac{U(x_0 + \Delta x) - U(x_0)}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

3. DISEÑO

En este capítulo se da a conocer el estudio para el diseño de la prótesis, para el peso adecuado que debe poseer la prótesis, se establecen tres alternativas, para el diseño del mecanismo que tendrá la prótesis se seleccionará la mejor alternativa en base a parámetros establecidos. Posteriormente se realiza el análisis del mecanismo estructural de la prótesis, el análisis de esfuerzo normal de flexión en los eslabones donde existe la mayor fuerza, el modelado en 3D, la simulación de cargas en el punto más crítico, el análisis de elementos finitos y CFD del vuelo a velocidad máxima y de frenado.

3.1 Biología y dimensiones morfológicas de una lechuza

El ala de las aves está conformada por 8 huesos llamados: Húmero, Radio, Cúbito, Cubital, Carpo metacarpus, Primer Dígito (Pulgar), Segundo Dígito como se muestra en el gráfico 26.

La densidad de los huesos de aves se encuentra en un rango de 1.5 a 2 [kg/m³]. Esto varía de acuerdo con: la especie, el tamaño, la formación de la parte inorgánica de los huesos es decir las sales, la parte orgánica como fosfato, calcio que conforma el 84% de sustancias, la cortical fina y la cavidad medular del hueso. (Walsberg & King, 1978).

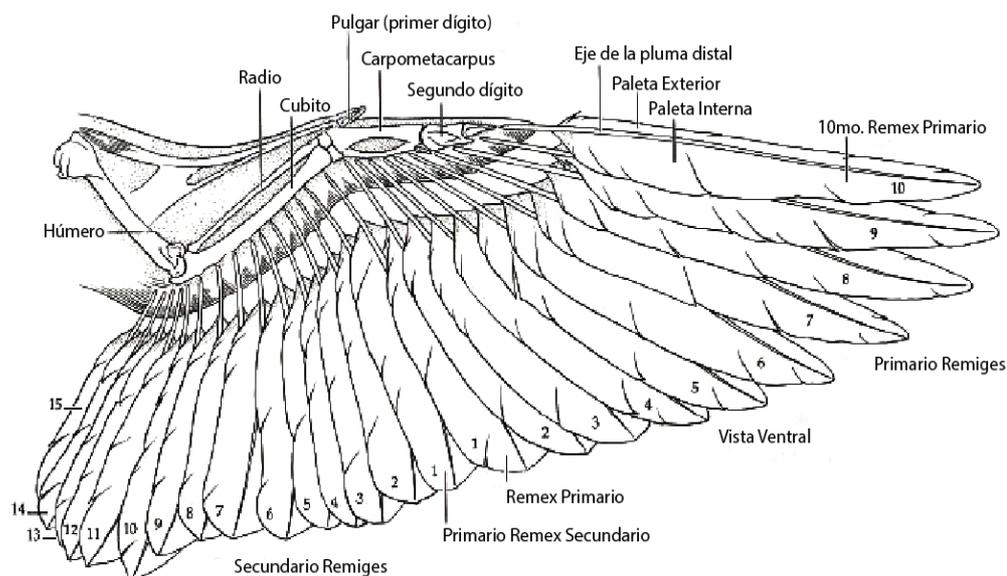


Gráfico 26: Nombre de las partes del ala de un ave

Fuente: (Trail, 2001)

El ala de una lechuza se forma mediante la unión de huesos, tejidos y plumas; las plumas del ala se dividen en 10 plumas primarias estas se encuentran unidas fuertemente a la parte dorsal de la mano y apenas poseen movilidad, cada una de ellas es asimétrica esto ayuda a la aerodinámica en forma individual o en conjunto; y 12 plumas secundarias que forman el borde de salida del ala; estas tienen mayor movilidad. Cuando existe algún tipo de daño en las plumas estas se sustituyen en la muda. Las plumas son vitales en un ave debido al peso y al movimiento que estas generan. (O'Malley et al., 2009).

El peso de las plumas es de dos a tres veces mayor que el peso del esqueleto del ave. El tamaño y número de plumas dependen de la tasa metabólica, la temperatura y la masa corporal. En los datos encontrados que se observan en la Tabla 2 provienen de la publicación de Walsberg & King , “The Relationship Of The External Surface Area Of Birds To Skin Surface Area And Body Mass”, en la cual se detallan los porcentajes de peso en base al plumaje, huesos, piel, plumaje y órganos de aves (Walsberg & King, 1978).

Tabla 2: Porcentaje de distribución de peso de un ave.

Partes que conforman el peso	Porcentajes [%]
Huesos	16
Piel	9
Plumaje	52
Órganos	23

3.2 Dimensiones reales de una lechuza.

Para realizar la prótesis del ala se debe tomar en cuenta la mayor cantidad de medidas en el cuerpo y la estructura. Se realizaron mediciones en un ejemplar Tito Alba, en el zoológico de Guayllabamba, debido a que el espécimen anterior falleció. Las medidas reales se presentan a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3: Medidas de la Lechuza

	Medidas	Unidades
Lechuza		
Peso	0,98	[kg]
Altura	400	[mm]
Diámetro Unión	0,10	[mm]
Radio Huesos	0,5	[mm]

En el gráfico 27 se observa el radio de los huesos y la unión de estos, es decir cuando se une el húmero con el radio y el cúbito, obtenido de la medición del animal. Como se observa estos animales poseen huesos delgados y las plumas tienen un orden y medidas diferentes que se encuentran adheridas a la piel, cercanas al hueso.



Gráfico 27: Diámetro de huesos y unión.

Las dimensiones se basan en medidas reales de este animal, con una escala 1:1. En la Tabla 4 se presentan las medidas ergonómicas de la lechuza y los gráficos de estas.

Tabla 4: Medidas Ergonómicas de la lechuza

N°	Nombre	Medida	Unidades
1	Envergadura	780	[mm]
2	Cúbito	70	[mm]
3	Húmero	150	[mm]
4	Borde interior ala	125	[mm]
5	Cabeza – Cloaca	300	[mm]
6	Parte posterior del cuello	24	[mm]
7	Espalda	156	[mm]
8	Ala extendida	270	[mm]
9	Envergadura del ala	366	[mm]

Las medidas ergonómicas se presentan de mejor manera en el gráfico 28. Estas medidas se muestran en unidades milimétricas. Las medidas obtenidas son importantes ya que de éstas dependerá la longitud de la prótesis.

La ergometría es la rama de la antropología biológica o física que estudia las medidas del cuerpo con un porcentaje de error mínimo.



Gráfico 28: Medidas Ergonómicas de la lechuza

Fuente: (Colodrero, 2009).

En el gráfico 29 se observa la envergadura del ala extendida con una longitud de 366[mm], y la longitud del húmero, cúbito, metacarpianos y dedos con una longitud de 270 [mm]. La numeración de las plumas primarias desde la parte superior del 1 al 10 y las secundarias del 1 al 12.



Gráfico 29: Medidas Ergonómicas del ala

Fuente: (Sentañes, 2007).

3.3 Análisis de peso del ala de una lechuza.

En esta sección se determina el peso del ala. Se toma en cuenta varios factores necesarios para determinar el peso del mecanismo que debe tener la prótesis y para el acople de la prótesis con el ave.

Para determinar el peso del ala de la lechuza, en el gráfico 30 se observa el ala extendida de una lechuza, se toma en cuenta las medidas de longitud de los huesos del ala y los diámetros como se mencionó en las Tablas 3 y 4.

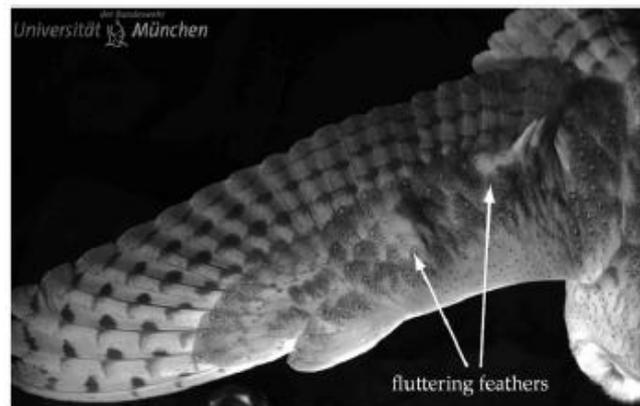


Gráfico 30: Ala de una lechuza.

Fuente: (Kln et al., 2012)

se determinó el peso del ala de la lechuza mediante la siguiente ecuación:

$$W = mg \quad [11]$$

donde W es el peso que se quiere obtener del ala, m es masa, g es gravedad. La masa se puede describir como la densidad ρ por el volumen V como se presenta a continuación

$$W = \rho V g$$

y el volumen se define como:

$$V = Al$$

Donde A es el área del hueso y l es la longitud de la envergadura del ala. Se trata a los huesos como cilindros para obtener una aproximación del área, mediante la ecuación 12

$$A = \pi * R^2_{hueso} \quad [12]$$

donde R_{hueso} es el radio del hueso, multiplicado por el número π . Por lo tanto, se obtiene la ecuación [1] como:

$$W = \rho\pi * R^2_{hueso} * l * g$$

se obtiene la igualdad que el peso (W) es proporcional al cuadrado del radio de la sección transversal de los huesos, como se presenta en la ecuación [13]:

$$W = \alpha R^2 \quad [13]$$

para obtener el peso referencial del ala de la lechuza, se utiliza la ecuación [1]. Como el ala posee tres huesos diferentes se realiza este cálculo para cada uno de estos y al final se suma para obtener el peso total de los huesos del ala.

$$W = mg = \rho * V * g = \rho * Al * g$$

para el cálculo del peso se toma en cuenta la densidad del hueso de $1,74 [Kg/m^3]$, la gravedad de $9,81 [m/s^2]$ y las diferentes medidas para los huesos como: el húmero una longitud de $0,15 [m]$, diámetro de $0,05 [m]$; el radio una longitud de $0,07[m]$, diámetro de $0,04 [m]$; el cúbito una longitud de $0,07[m]$, y un diámetro de $0,05 [m]$.

$$W_{húmero} = 1,74 [Kg/m^3] \left(\frac{\pi}{4} * (0,005 [m])^2 \right) * (0,15 [m]) * (9,8 [m/s^2]) = 5,027E - 5 [N]$$

$$W_{radio} = 1,74 [Kg/m^3] \left(\frac{\pi}{4} * (0,004 [m])^2 \right) * (0,07 [m]) * (9,8 [m/s^2]) = 1,5E - 5 [N]$$

$$W_{cúbito} = 1,74 [Kg/m^3] \left(\frac{\pi}{4} * (0,005 [m])^2 \right) * (0,07 [m]) * (9,8 [m/s^2]) = 2,34E - 5 [N]$$

se suma el peso de cada uno de los huesos para obtener el peso total de los huesos del ala como se presenta a continuación.

$$W_{huesos\ del\ ala} = 8,867E - 5 [N]$$

el peso total del animal es de $0,98[kg]$, las plumas representan el 52% del peso total de la lechuza, es decir:

$$W_{plumas} = \frac{0,5096 [kg]}{2} = 0,2548 [kg]$$

se divide para dos el peso ya que se hace una estimación aproximada de un ala, para el cambio de unidades de kilogramos a newton se utiliza la conversión $1\text{kg} = 9,81\text{[N]}$, el peso total de los huesos y las plumas es la suma de:

$$W_{\text{ala}} = W_{\text{huesos del ala}} + W_{\text{plumas}}$$

$$W_{\text{ala}} = 8.867E - 5\text{[N]} + (0,02548 \text{ kg} * 9,81 \text{ [N]})$$

$$W_{\text{ala}} = 0.25 \text{ [N]}$$

3.4 Parámetros de selección y análisis de alternativas del mecanismo y del anclaje

En esta sección se determinan los parámetros como: ergonomía, peso, funcionalidad del mecanismo, simplicidad, movilidad, costos, estructura y resistencia, los cuales son necesarios para la selección de la alternativa óptima. Se plantean tres diferentes alternativas de mecanismo para la prótesis de la lechuza discapacitada, los que serán calificados en base a los parámetros establecidos.

Los parámetros utilizados para la selección de alternativa del mecanismo son:

- **Ergonomía:** La ergonomía es referente a las condiciones de adaptación de la prótesis a la lechuza.
- **Peso:** El peso es esencial al momento de realizar el mecanismo ya que este debe ser acorde a todo el peso de la lechuza, se toma en cuenta que las estructuras de los huesos del ave corresponden al 16% y el 52% de plumas del peso total del ave.
- **Funcionalidad del mecanismo:** La funcionalidad del mecanismo corresponde a la resolución del problema, es decir, genere el movimiento deseado de la prótesis de abrir y cerrar mediante un solo movimiento.
- **Simplicidad:** La simplicidad comprende que la estructura debe ser lo más sencilla posible para evitar peso en la misma.
- **Estructura y Resistencia:** La estructura corresponde al número de eslabones que constituyen ala prótesis.
- **Movilidad:** La movilidad corresponde al movimiento que puede realizar el ave utilizando la prótesis, o que esta pueda simular el movimiento.

- **Costo:** El costo comprende el valor de una cantidad aproximada de material necesario para la prótesis, debido a que el material es ligero y es necesario poner plumas en la estructura

3.4.1 Selección de Alternativas

En la selección de alternativas se toma en cuenta el estudio del mecanismo en cuanto al objetivo principal de apertura y cierre el mecanismo, con un solo movimiento. Se toma en cuenta los parámetros establecidos anteriormente.

Alternativa 1: Mecanismo de 5 barras

Este mecanismo posee 5 barras y tiene como finalidad tener una movilidad requerida que es el abrir y cerrar su estructura. Las partes fijas son en el punto A y E, el eslabón principal que da la movilidad es el $r1$, los eslabones utilizados son binarios, las uniones que posee este mecanismo es una junta cilíndrica que posee 2 GDL, posee un resorte en la parte superior como se observa en el gráfico 31 que este ayudará al momento de cerrar el mecanismo. Sin embargo, el resorte generará una mayor fuerza al momento de abrir. Posee espacio suficiente para el montaje de las plumas al momento de construcción del prototipo.

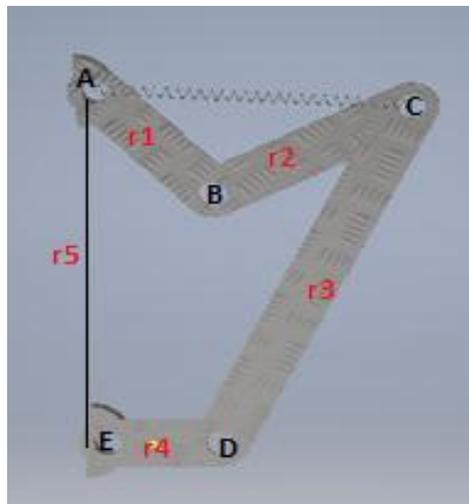


Gráfico 31: Mecanismo de 5 barras Alternativa 1.

Alternativa 2: Mecanismo de 3 barras.

Este mecanismo posee 3 barras, el cual tiene como finalidad tener una movilidad requerida que es el abrir y cerrar su estructura. Las partes fijas son en el punto A y D, el eslabón principal que da la movilidad es el $r1$, los eslabones utilizados son binarios, las uniones que

posee este mecanismo es una junta cilíndrica que posee 2 GDL, posee un resorte en la parte superior como se observa en el gráfico 32 que este ayudará al momento de cerrar el mecanismo. Sin embargo, posteriormente en la creación del prototipo, las plumas cumplen un papel importante y en esta alternativa, faltaría el espacio para el acople de estas.

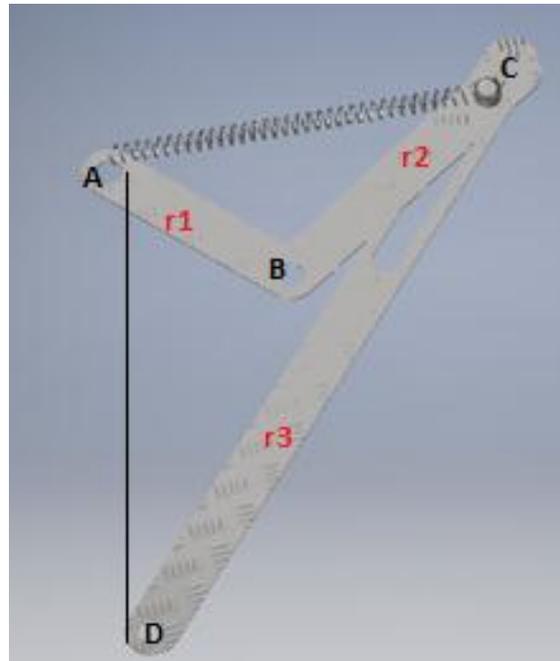


Gráfico 32: Mecanismo Alternativa 2

Alternativa 3: Mecanismo de 6 barras

Este mecanismo posee 6 barras y tiene como finalidad tener una movilidad requerida que es el abrir y cerrar su estructura. En el gráfico 33 se observan las partes fijas el punto A y G. El eslabón principal que da la movilidad es el r1, los eslabones utilizados son binarios, las uniones que posee este mecanismo es la unión de dos tipos de juntas: la junta cilíndrica que posee 2 GDL, y la junta revoluta que posee 1 GDL. Este mecanismo no posee resortes ya que el movimiento que genera el eslabón GF facilita el abrir y cerrar de la prótesis. Este mecanismo utiliza el principio inversor de Chevishev, el cual es una conexión mecánica que convierte a un movimiento rotacional en movimiento rectilíneo. El mecanismo posee espacio suficiente para la adición de las plumas al momento de realizar el prototipo.

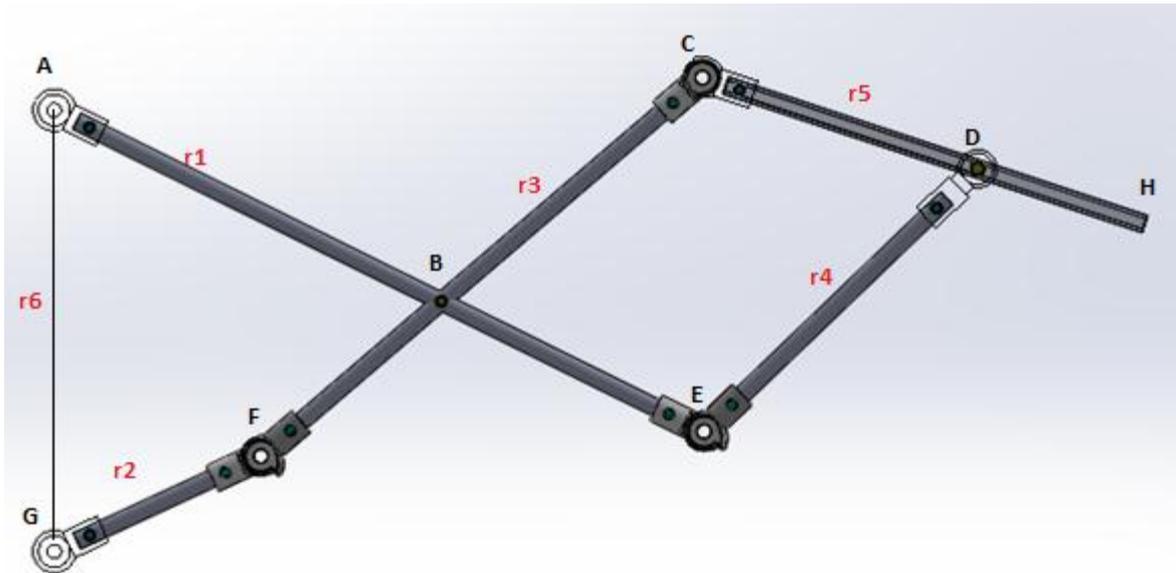


Gráfico 33: Mecanismo de 6 barras Alternativa 3

Para la selección de alternativas se discute la ergonomía que las alternativas 1 y 2 proponen, ya que al poner resortes puede llegar a ser intrusivo o molesto para el animal. La alternativa 3 tiene un mecanismo que permite la movilidad cómoda del ave. Las alternativas 1 y 2 poseen poca cantidad de eslabones y sus uniones son simples, esto aligeran el peso del mecanismo, la alternativa 3 posee mayor cantidad de eslabones y uniones por lo cual tendrá un mayor peso que las anteriores alternativas; sin embargo, se debe recordar que el peso del ala de una lechuzca depende del peso del plumaje, entonces se puede variar el peso con el mismo. Las tres alternativas de mecanismo cumplen con la funcionalidad de este. La simplicidad en las alternativas 1 y 2 se ve contrariada debido al uso del resorte; la alternativa 3 posee mayor cantidad de eslabones, por lo cual su estructura es más compleja, sin embargo, esta no posee ningún resorte. Para las tres opciones se utilizará PVC debido a que es un material ligero y posee gran resistencia. En cuanto a la movilidad, la alternativa 1 no está en el rango de aprobación ya que ésta, a pesar de cumplir con abrir y cerrar la estructura, posee más de un tipo de movimiento, la alternativa 2 permite el movimiento, sin embargo, el resorte no permite una movilidad constante es decir los movimientos son limitados, la alternativa 3 permite el movimiento del brazo de abrir y cerrar teniendo un solo movimiento de arriba abajo. En las alternativas 1 y 2 el costo es similar, la alternativa 3 es la más costosa ya que posee mayor estructura y por ende se utiliza mayor cantidad de material.

La ponderación de parámetros se realizó con calificaciones del 1 al 3 donde cada número significa: 1 malo, 2 regular, 3 bueno. Se repartió en porcentajes los requerimientos según su importancia. En la Tabla 5 se detalla los requerimientos de diseño que fueron calificados.

Tabla 5: Parámetros

Análisis de Alternativas				
Porcentajes	Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
0,1	Ergonomía	2	2	3
0,2	Peso	3	3	3
0,2	Funcionalidad de mecanismos (aleteo)	1	3	3
0,1	Resistencia mecánica	3	3	3
0,2	Simplicidad	2	2	3
0,12	Acoplamiento de prótesis al ave	2	1	3
0,08	Costo	2	3	2
1	Total	2,1	2,46	2.92

La mejor opción fue la 3 ya que esta permite obtener el movimiento deseado teniendo un grado de libertad, es decir, que el movimiento posea un solo movimiento hacia arriba y hacia abajo. El mecanismo posee además facilidad de diseño y de acoplamiento.

3.5 Análisis del mecanismo seleccionado para el anclaje

En esta sección se realiza el análisis del mecanismo de la alternativa seleccionada en base a la teoría descrita en el capítulo 2. Se propone realizar el estudio del mecanismo basándose en la relación de cargas estáticas y fuerzas que actúan en el sistema, con el fin de tomar decisiones acerca del material, geometría y fabricación que satisfagan los requerimientos de funcionalidad y seguridad.

Los parámetros utilizados para la selección del anclaje son:

- **Ergonomía:** La ergonomía es referente a las condiciones de adaptación de la prótesis a la lechuga en la alternativa seleccionada.
- **Simplicidad:** La simplicidad comprende la adaptación al animal y la obtención del menor peso posible en la misma.

- **Estructura y Resistencia:** La estructura del acople debe poder acoplarse tanto en la parte amputada como en la estructura de la prótesis. Se debe utilizar un material resistente liviano que pueda acoplarse al cuerpo del ave.
- **Movilidad:** La movilidad corresponde al movimiento que puede realizar el ave utilizando el anclaje de la prótesis, y esta pueda realizar el movimiento de apertura. Es necesario que el acople sea estable y que se pueda adaptar al cuerpo.
- **Fijación:** Garantizar una fijación adecuada de la prótesis a la parte del húmero de la lechuza, sin producir daños en la sujeción de esta.

A continuación, se presentan las tres alternativas en los gráficos 33, 34 y 35 de sujeción que tendrá la prótesis. Para seleccionar el diseño del anclaje se realiza una valoración en base a los parámetros determinados anteriormente en esta sección.

Alternativa 1.

En el gráfico 33 se observa la alternativa 1, la cual consta de una sujeción del mecanismo del dedo a presión con la mano. Este ajuste tiene una ergonomía adecuada debido a su simpleza y adaptación, y permite una movilidad de apertura y cierre.

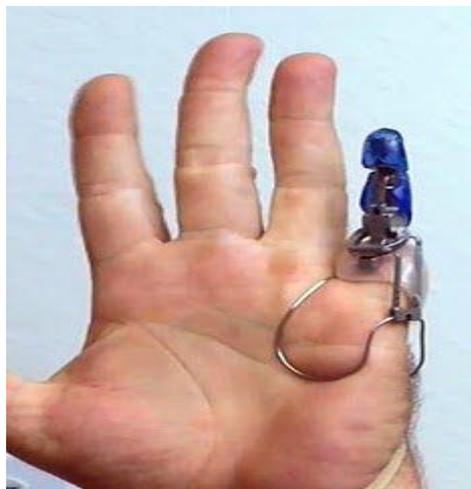


Gráfico 34: Alternativa 1

Fuente: (Beschizza, 2007)

Alternativa 2

En el gráfico 34, se presenta un estilo de ajuste de prótesis con correas y sujeción de la parte afectada, soporte con la parte delantera y posterior de la espada, lo cual brinda un mejor ajuste y soporte de la extremidad faltante, en este caso la pierna.



Gráfico 35: Alternativa 2

Fuente: (Christiansen, 2005)

Alternativa 3

En el gráfico 35 se presenta la alternativa 3. Este tipo de sujeción es la más utilizada debido al soporte y comodidad que genera a lo que se está sujetando. Es necesario tener un ajuste correcto para permitir la funcionalidad con la prótesis.

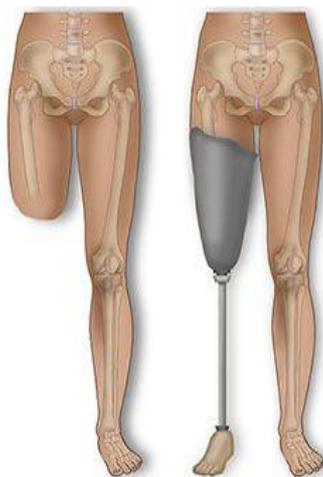


Gráfico 36: Alternativa 3

Fuente: (American Physical Therapy Association, 2014)

Para la selección de la mejor alternativa se tomaron en cuenta los parámetros establecidos. Se puede decir, con respecto a las tres alternativas, que la unión de las tres son aceptables debido a que los tres son métodos que se utilizan en la industria de prótesis. Estas poseen un acople de presión y adaptación del hueso y la prótesis, para obtener una fijación y ergonomía adecuadas, además el poseer un cinturón ayuda a sostener de mejor manera la unión de estos elementos.

En la Tabla 6, se presentan las ponderaciones resultados que posee cada uno de los parámetros establecidos anteriormente. La ponderación de parámetros se realizó con calificaciones del 1 al 3 donde cada número significa: 1= malo, 2= regular, 3= bueno. Se repartió en porcentajes los requerimientos según su importancia.

Tabla 6: Análisis de alternativas anclaje

Análisis de Alternativas				
Porcentajes	Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
0,2	Ergonomía	2	2	2
0,2	Estructura del acople	3	3	3
0,2	Simplicidad	1	2	3
0,2	Movilidad	3	3	3
0,2	Fijación	2	2	2
1	Total	2,2	2,4	2,6

En la tabla 6 se observa que la alternativa 3 posee mayor ponderación, por tal motivo es la alternativa seleccionada.

En el gráfico 36 se observa el modelo CAD del diseño del anclaje. Se puede observar la parte superior cuya funcionalidad es sujetar al hueso y a la prótesis. En el gráfico 40 se puede observar el mecanismo que permite la movilidad que realiza el hombro. La parte inferior está diseñada para sujetar a la prótesis. Esta parte es cónica por lo que no existen puntos de presión en el muñón.

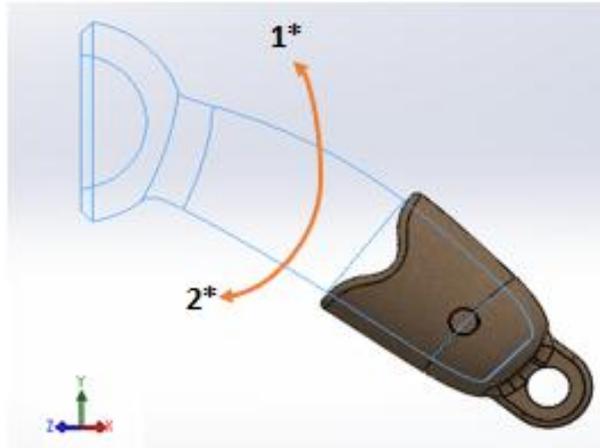


Gráfico 37: Anclaje parte superior

En el gráfico 37 se presenta el anclaje de la parte inferior de la prótesis la cual permite los movimientos de apertura, cierre que se observa en el movimiento 3 a 4 y el movimiento del aleteo es decir adelante y atrás que se representa con los números 1 a 2.

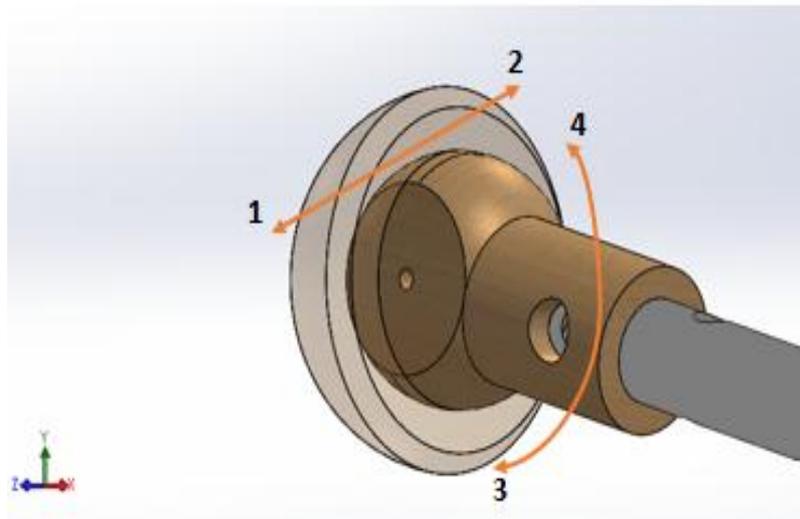


Gráfico 38: Anclaje parte inferior

3.6 Movilidad Del Mecanismo

En esta sección se realiza el cálculo de movilidad utilizando la ecuación [1].

$$GDL = M = 3(L - 1) - 2J1 \quad [1]$$

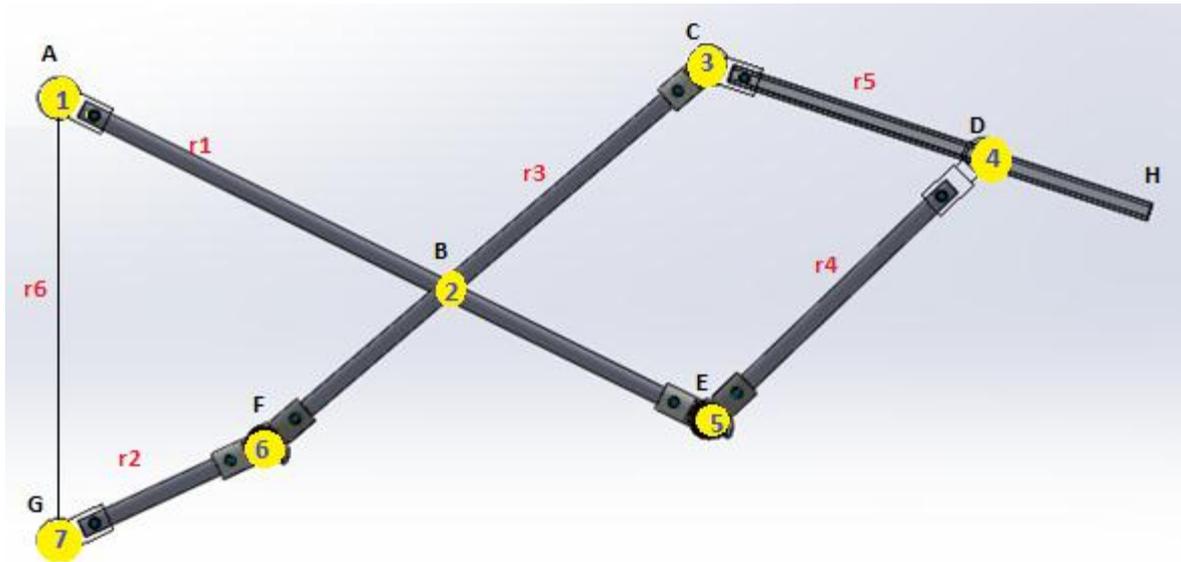


Gráfico 39: Número de eslabones y juntas del mecanismo

En el gráfico 38 se observa el número de eslabones L con un total de 6, los cuales se encuentran marcados con rojo, el número de juntas $J1$ que posee el mecanismo son 7 y están marcados de color amarillo.

$$\mathbf{GDL} = 3 (6 - 1) - 2 (7) - 0$$

Y de esta manera se obtiene un grado de libertad el cual permite un movimiento de apertura y cierre del mecanismo con un solo movimiento (arriba y abajo).

$$\mathbf{GDL} = 1 //$$

Trayectoria cinemática del mecanismo

En el gráfico 39 se observa la trayectoria mínima y máxima que recorre el mecanismo al momento de abrir y cerrar, el punto D, E y H son quienes recorren una mayor trayectoria, el punto A es el cual recorre menor trayectoria.

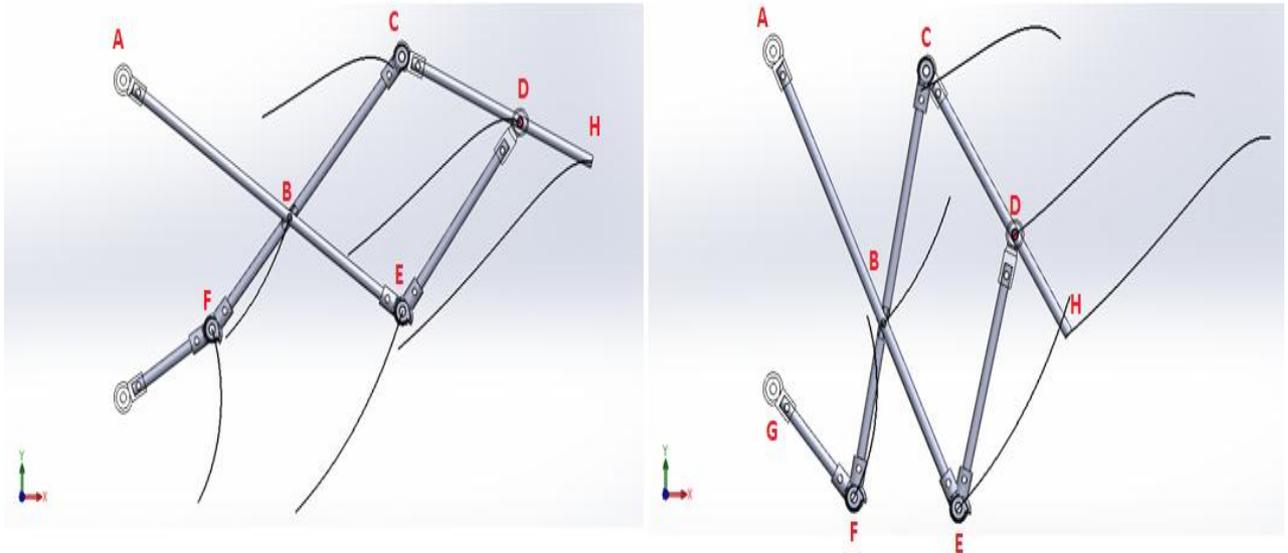


Gráfico 40: Trayectoria cinemática del mecanismo

Para realizar el cálculo del mecanismo en cuanto a grados de libertad, posición y análisis de fuerza se presenta el mecanismo con los datos de las longitudes y ángulos obtenidos mediante la graficación del mecanismo en el software solidworks, el cual nos ayudó en la medición, como se presenta a continuación en el gráfico 40.

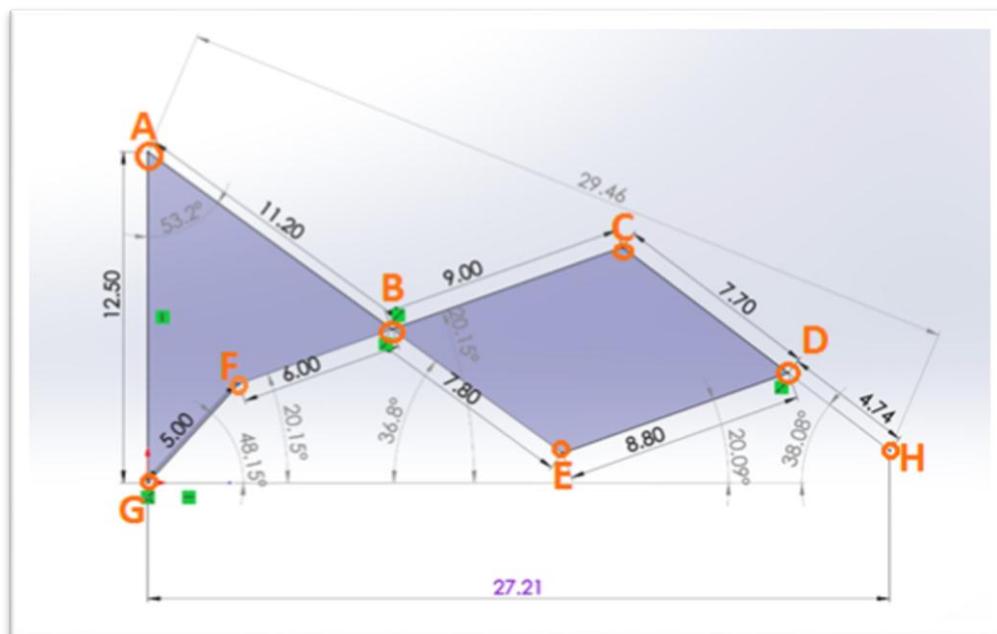


Gráfico 41: Ángulos máximos del mecanismo seleccionado

En la Tabla 7 y 8 se observa las longitudes, ángulos máximos y mínimos utilizados en el mecanismo, para el estudio del análisis de posición, y el análisis de fuerzas que se presenta a continuación.

Tabla 7: Longitudes de cada eslabón del mecanismo del ala.

N°	Eslabón	Longitud [m]
r1	AG	0,125
r2	GF	0,05
r3	AE	0,19
r4	CF	0,15
r5	CH	0,124
r6	ED	0,088
r3p	BE	0,078
r4p	FB	0,06
r5p	DH	0,047

Tabla 8: Ángulos máximos utilizados en el mecanismo del ala.

Nombre	Ángulos Máximos	Ángulos Mínimos
θ GAB	48,15°	55.38
θ AGF	20,13°	96.05°
θ AED	164°	71.94°
θ AE2	20,08°	32°
θ AH	142°	79.28°

3.7 Análisis Posición

En esta sección se presenta el análisis de posición del mecanismo seleccionado. Donde se obtuvieron las ecuaciones que rigen el mecanismo, en base a la posición crítica, es decir cuando el ala se encuentre extendida. Para comparar los resultados obtenidos en el software SolidWorks gráficamente y los realizados algebraicamente como se presenta a continuación.

Al realizar el análisis de posición del mecanismo se utiliza números complejos, debido a la facilidad de pasar estos a forma polar

Circuito 1:

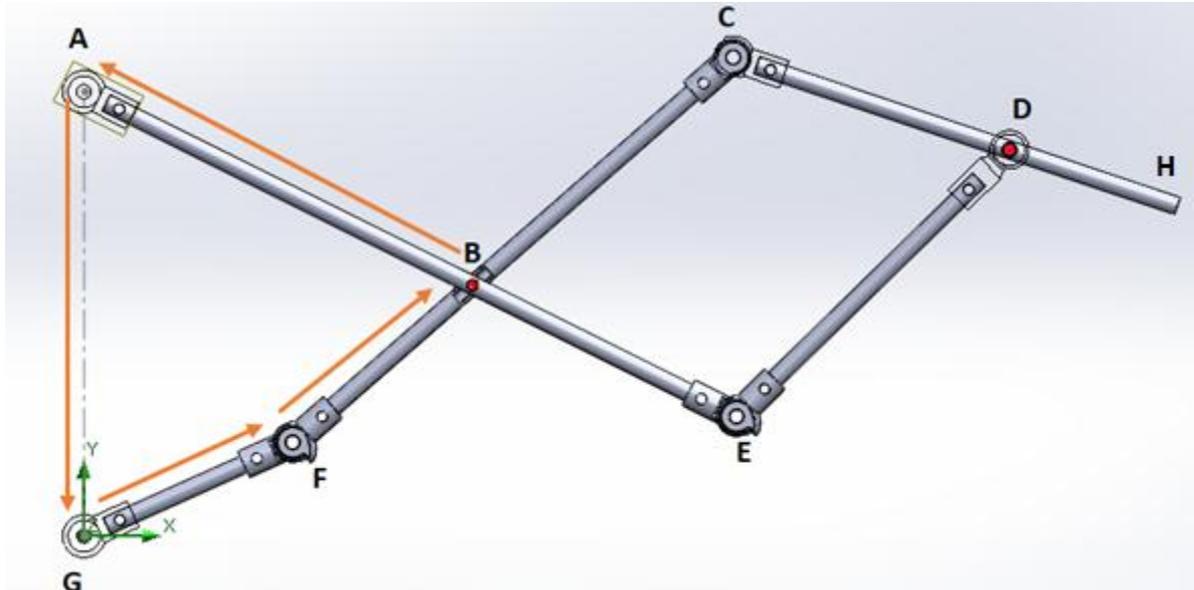


Gráfico 42: Circuito 1

Se presenta el circuito 1 en el cual se unen los vectores que se presentan en la ecuación [14],

$$RAG + RBA + RBF + RGF = 0 \quad [14]$$

para lo cual se utiliza las medidas de las longitudes de los eslabones y los ángulos obtenidos mediante el programa SolidWorks para obtener una mejor aproximación de los ángulos como se presenta en la Tabla 7 y Tabla 8.

se debe obtener dos ecuaciones y para esto se utiliza números complejos, de esta manera se obtiene la parte real e imaginaria como se realiza a continuación:

Real

Se realiza la parte real con los vectores, un circuito cerrado con el fin de encontrar las ecuaciones que permitan determinar la posición del mecanismo al realizar una variación de los ángulos, y longitudes.

$$RAG \cos(\theta_{AG}) + RBA \cos(\theta_{BA}) + RBF \cos(\theta_{FB}) + RGF \cos(\theta_{GF}) = 0$$

cada uno de los vectores R_{AG} , R_{BA} , R_{FB} , R_{GF} , se compone de una magnitud y dirección presentados en la Tabla 7 y 8, y se determina la primera ecuación con la identidad trigonométrica de coseno.

$$12,5 \cos(90^\circ) + 11,20 \cos(\theta) + 6 \cos(\theta_{FB}) + 5 \cos(48,15^\circ) - 11,20 \cos(\theta) = 3,335 + 6 \cos(\theta_{FB}) \quad (1)$$

Imaginario

Para encontrar la segunda ecuación imaginaria, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación:

$$R_{AG} \text{SEN}(\theta_{AG}) + R_{BA} \text{SEN}(\theta_{BA}) + R_{FB} \text{SEN}(\theta_{FB}) + R_{GF} \text{SEN}(\theta_{GF}) = 0$$

con la identidad trigonométrica de sen para cada uno de los vectores con sus respectivos ángulos y longitudes.

$$12,5 \text{SEN}(90^\circ) + 11,20 \text{SEN} \theta + 6 \text{SEN}(\theta_{FB}) + 5 \text{SEN}(48,15^\circ) = 0 \quad (1)$$

se obtiene la ecuación 2, como se observa a continuación:

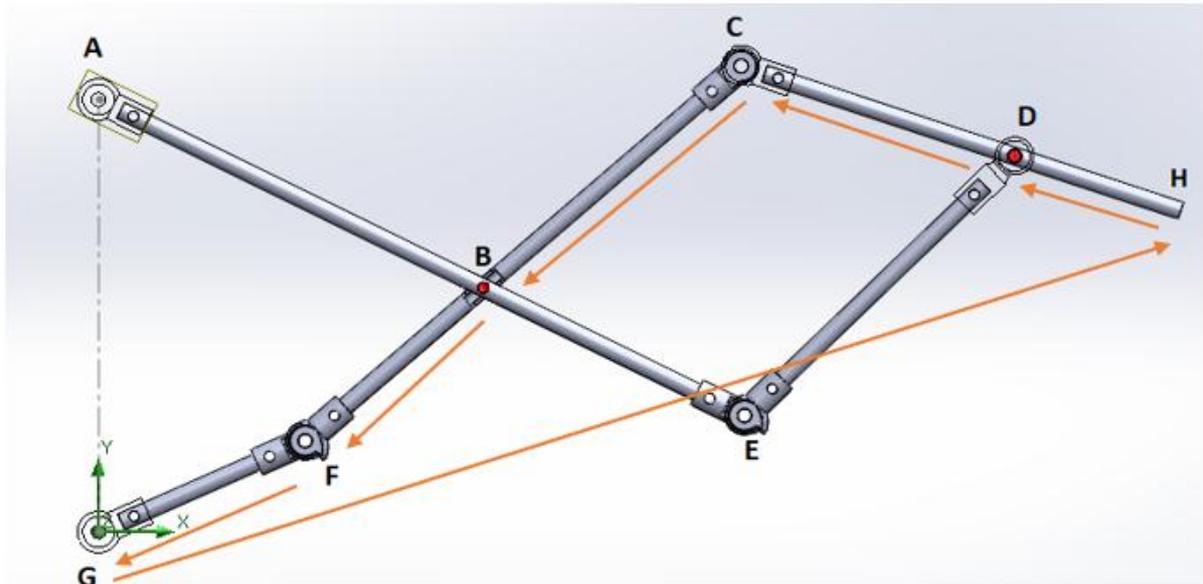
$$-11,2 \text{SEN}(\theta_{BA}) = 16,22 + 6 \text{SEN}(\theta_{FB}) \quad (2)$$

se elevan al cuadrado las dos ecuaciones ($1^2 + 2^2$), para obtener una ecuación general que determine al circuito como se observa a continuación:

$$0 = 440,91 + 160,02 \cos(\theta_{FB}) + 194 \text{SEN}(\theta_{FB})$$

resolviendo la ecuación general obtenida del circuito 1, se realiza con los ángulos determinados en la Tabla 7, se obtiene el ángulo θ_{FB} :

$$\theta_{FB} = 230 \approx 228,15 ; \theta_{BA} = 142 \approx 143,1.$$

Circuito 2:**Gráfico 43:** Circuito 2

En el circuito 2 se realiza el mismo procedimiento realizado en el circuito 1, para obtener una ecuación general del circuito. Se determina dos ecuaciones con números complejos, obteniendo la parte real e imaginaria como se realiza a continuación con un circuito cerrado de vectores. Se presenta el circuito 2 en el cual se unen los vectores dados por la ecuación [15],

$$R_{FG} + \underbrace{R_{BF} + R_{CB} + R_{DC}}_{\theta =} + \underbrace{R_{HD} + R_{GH}}_{\theta =} = 0 \quad [15]$$

En este cierre de circuito se obtienen dos ángulos iguales debido a la relación de ángulos en el cierre de circuito.

Real

Para encontrar la primera ecuación, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación:

$$R_{FG} \cos(\theta_{FG}) + R_{BF} \cos(\theta_{BF}) + R_{CB} \cos(\theta_{CB}) + R_{DC} \cos(\theta_{DC}) + R_{HD} \cos(\theta_{HD}) + R_{GH} \cos(\theta_{GH}) = 0$$

se toma en cuenta que el ángulo a encontrarse es el mismo:

$$\theta_{BF} = \theta_{CB}; \theta_{DC} = \theta_{HD}$$

de esta manera se obtiene la primera ecuación.

$$225 \cos \theta_{BF} = 41,08 + 718,35 \cos \theta_{GH} + 739,84 \cos^2 \theta_{GH} \quad (1)$$

Imaginario

Para encontrar la segunda ecuación imaginaria, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación:

$$R_{FG} \text{SEN}(\theta_{FG}) + R_{BF} \text{SEN}(\theta_{BF}) + R_{CB} \text{SEN}(\theta_{CB}) + R_{DC} \text{SEN}(\theta_{DC}) + R_{HD} \text{SEN}(\theta_{HD}) + R_{GH} \text{SEN}(\theta_{GH}) = 0$$

se utiliza las longitudes y ángulos determinados en la Tabla 7 y 8

$$5 \text{SEN}(48,15) + 6 \text{SEN}(\theta_{BF}) + 9 \text{SEN}(\theta_{CB}) + 7,7 \text{SEN}(142^\circ) + 4,7 \text{SEN}(142^\circ) + 272 \text{SEN}(\theta_{GH}) = 0 \quad (1)$$

los ángulos $\theta_{BF} = \theta_{CB}$; $\theta_{DC} = \theta_{HD}$ son iguales debido a la posición en la que se encuentran, por lo que se obtiene la segunda ecuación.

$$6 \text{SEN} \theta_{BF} + 9 \text{SEN} \theta_{BF} = -11,35 - 27,2 \text{SEN}(\theta_{GH}) \quad (2)$$

se elevan al cuadrado las dos ecuaciones ($1^2 + 2^2$), para obtener una ecuación general que determine al circuito como se observa a continuación:

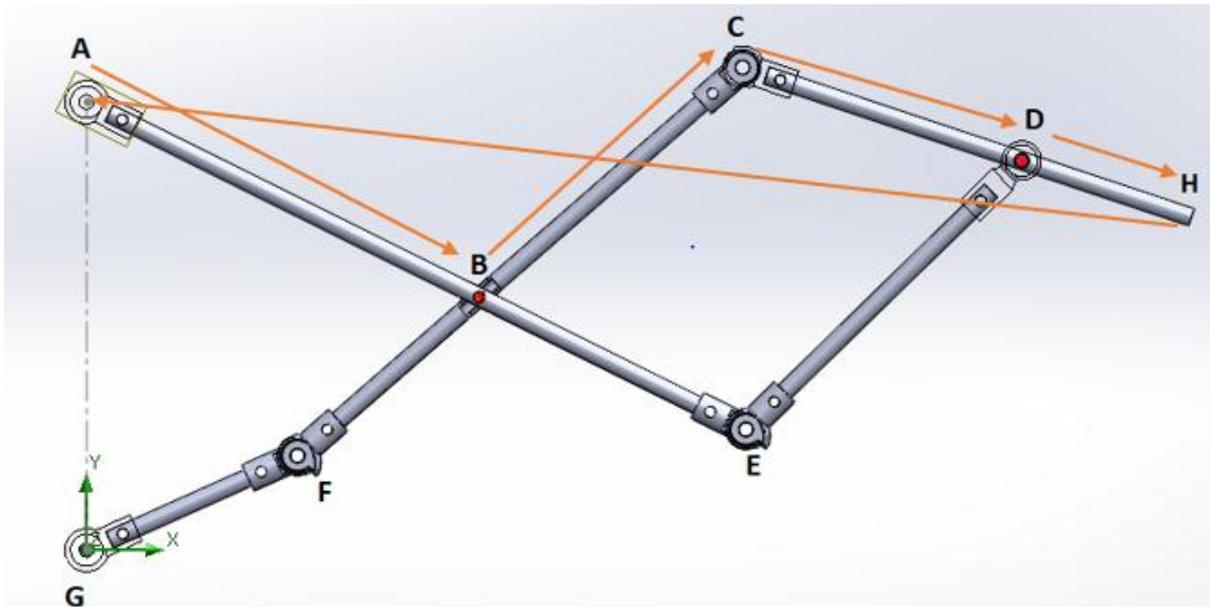
$$(15 \text{SEN}(\theta_{BF}))^2 = (-11,35 - 27,2 \text{SEN}(\theta_{GH}))^2$$

se obtiene la ecuación general de posición para el circuito 2:

$$225 \text{SEN}(\theta_{BF}) = 128 + 617,44 \text{SEN}(\theta_{GH}) + 739,84 \text{SEN}^2(\theta_{GH})$$

resolviendo la ecuación general obtenida del circuito 2, se realiza con los ángulos determinados en la Tabla 8, y se obtiene el ángulo θ_{CB} ; θ_{GH} ; θ_{BF} ;

$$(\theta_{GH}) = 360^\circ; (\theta_{BF}) = (\theta_{CB}) = 198^\circ$$

Circuito 3:**Gráfico 44:** Circuito 3

En el circuito 3 se realiza el mismo procedimiento realizado en el circuito 1 y 2, para obtener una ecuación general del circuito. Se determina dos ecuaciones con números complejos, obteniendo la parte real e imaginaria como se realiza a continuación con un circuito cerrado de vectores. Se presenta el circuito 3 en el cual se unen los vectores dado por la ecuación [16],

$$\mathbf{RAB} + \mathbf{BC} + \mathbf{RCD} + \mathbf{RDH} + \mathbf{RHA} = \mathbf{0} \quad [16]$$

Real

Se toma en cuenta el vector con el ángulo del coseno \bar{r} para todo el cierre de circuito, como se observa en el gráfico 31, que se rige por la ecuación [16]. Se utiliza los datos de la Tabla 7 y 8 en las variables de la ecuación.

$$RAB \cos(\theta AB) + RBC \cos(\theta BC) + RCD \cos(\theta CD) + RDH \cos(\theta DH) + RHA \cos(\theta HA) = 0$$

$$11,20 \cos(\theta AB) + 9 \cos(\theta BC) + (-6,11) + (-3,76) + (-23,38) = 0$$

Se obtiene la primera ecuación del circuito 3

$$125,44 \cos^2(\theta AB) = 1106,23 + 598,68 \cos(\theta BC) + 81 \cos^2(\theta BC) \quad (1)$$

Imaginario

Para encontrar la segunda ecuación imaginaria, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación.

$$R_{AB} \text{ SEN } (\theta_{AB}) + R_{BC} \text{ SEN } (\theta_{BC}) + R_{CD} \text{ SEN } (\theta_{CD}) + R_{DH} \text{ SEN } (\theta_{DH}) + R_{HA} \text{ SEN } (\theta_{HA}) = 0$$

se reemplaza las variables de la Tabla 7 y 8 respectivamente

$$11,20 \text{ SEN } (\theta_{AB}) + 9 \text{ SEN } (\theta_{BC}) + 7,70 (\text{SEN } 142,54) + 4,74 \text{ SEN } (142,54) + 29,46 \text{ SEN } (142,54) = 0 \quad (1)$$

una vez obtenidas las dos ecuaciones, se suman y se elevan al cuadrado ($1^2 + 2^2$). Se obtiene la ecuación general de posición del circuito 3

$$125,44 \text{ SEN}^2 (\theta_{AB}) = 649,23 + 458,64 \text{ SEN } (\theta_{BC}) + 81 \text{ COS}^2 (\theta_{BC}) \quad (2)$$

Se resuelve la ecuación y se obtiene los ángulos:

$$125,44 = 1755,46 + 1057,32 \text{ COS } (\theta_{BC}) + 81(\theta_{BC}) = 35,2^\circ$$

$$(\theta_{AB}) = + 145 + 180 = 325^\circ$$

Circuito 4:

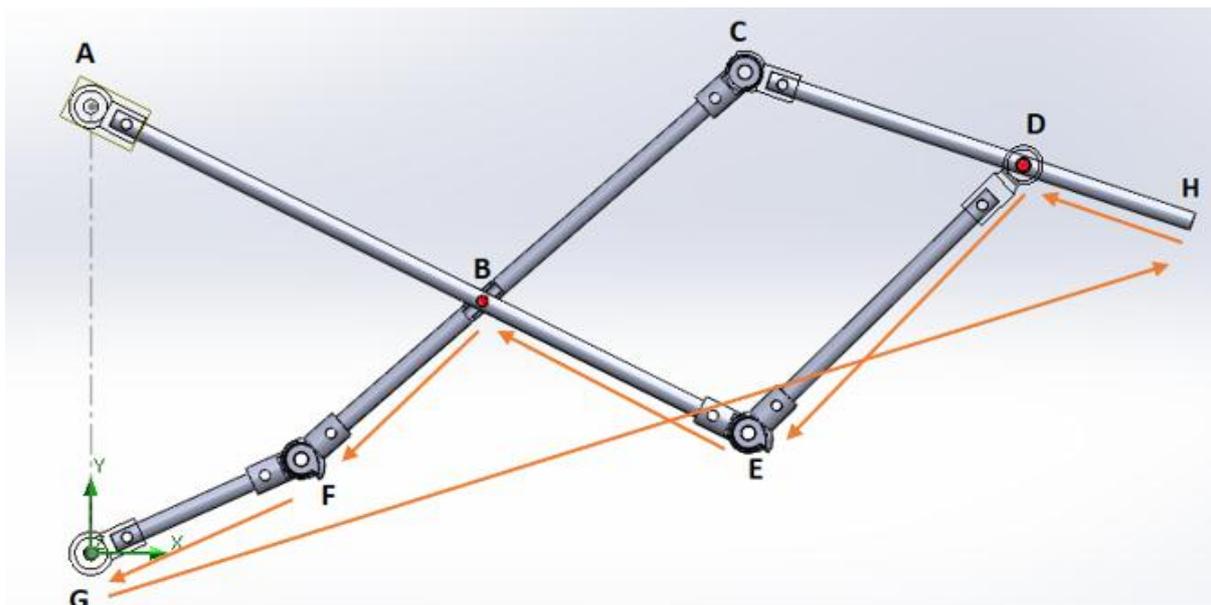


Gráfico 45: Circuito 4

En el circuito 4 se realiza el mismo procedimiento realizado en los circuitos 1, 2 y 3 para obtener una ecuación general del circuito. Se determinan dos ecuaciones con números complejos, obteniendo la parte real e imaginaria, como se realiza a continuación con un circuito cerrado de vectores. Se presenta el circuito 4 en el cual se unen los vectores dado por la ecuación [17],

$$\mathbf{RFG} + \mathbf{RBF} + \mathbf{REB} + \mathbf{RDE} + \mathbf{RHD} + \mathbf{RGH} = \mathbf{0} \quad [17]$$

Real

Para encontrar la primera ecuación, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito, como se observa a continuación.

$$RFG \cos(\theta_{FG}) + RBF \cos(\theta_{BF}) + REB \cos(\theta_{EB}) + RDE \cos(\theta_{DE}) + RDH \cos(\theta_{HD}) + RGH \cos(\theta_{GH}) = 0$$

se realiza los cambios de variables de ángulos y longitudes presentadas en las Tablas 7 y 8

$$5 \cos(48,15) + 6 \cos(198^\circ) + 7,80 \cos \theta_{EB} + 8,8 \cos \theta_{DE} + 4,74 \cos(142^\circ) + 27,2 \cos(360) = 0$$

$$3,33 + (-5,706) + 7,80 \cos \theta_{EB} + 8,8 \cos \theta_{DE} + (-3,73) + 27,2 = 0$$

para obtener la ecuación 1 del circuito 4

$$60,84 \cos^2 \theta_{EB} = 444,78 + 371,184 + 77,44 \cos^2 \theta_{DE} \quad (1)$$

Imaginario

Para encontrar la segunda ecuación imaginaria, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación:

$$RFG \sin(\theta_{FG}) + RBF \sin(\theta_{BF}) + REB \sin(\theta_{EB}) + RDE \sin(\theta_{DE}) + RDH \sin(\theta_{HD}) + RGH \sin(\theta_{GH}) = 0$$

Se utiliza las variables obtenidas de la Tabla 7 y 8, para obtener la ecuación 2.

Real

Para encontrar la primera ecuación, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación:

$$R_{BA} \cos \theta (BA) + R_{EB} \cos \theta (EB) + R_{DE} \cos \theta (DE) + R_{HD} \cos \theta (HD) + R_{AH} \cos \theta (AH) = 0$$

se obtiene la primera ecuación, las variables son tomadas de las Tablas 7 y 8

$$11,2 \cos (325^\circ) + 7,8 \cos (164) + 8,8 \cos (\theta DE) + 4,7 \cos (142) + 29,46 \cos (\theta AH) = 0 \quad (1)$$

Imaginario

Para encontrar la segunda ecuación imaginaria, se realiza la suma de los vectores para el cierre de circuito como se observa a continuación:

$$R_{BA} \sin (\theta BA) + R_{EB} \sin (\theta EB) + R_{DE} \sin (\theta DE) + R_{HD} \sin (\theta HD) + R_{AH} \sin (\theta AH) = 0$$

se utilizan las variables de las Tablas 7 y 8 para determinar la segunda ecuación del circuito 5

$$11,2 \sin (325^\circ) + 7,8 \sin (164) + 8,8 \sin (\theta DE) + 4,7 \sin (142) + 29,46 \sin (\theta AH) = 0 \quad (2)$$

$$(-6,42) + (2,149) + 8,8 \sin (\theta DE) + 2,89 + 29,46 \sin (\theta AH) = 0$$

una vez obtenidas las dos ecuaciones se suman y se elevan al cuadrado ($1^2 + 2^2$)

$$(8,80 \sin (\theta DE))^2 = (1,381 - 29,46 \sin (\theta AH))^2$$

se obtiene la ecuación general de posición del circuito 5

$$77,44 \sin^2 (\theta DE) = 1,9 + 81,3 \sin (\theta AH) + 867,8 \sin^2 (\theta AH)$$

se resuelve la ecuación y se obtienen los ángulos para el circuito 5, como se presenta a continuación:

$$77,44 = 5,98 + 200,318 \cos (\theta AH) + 867,8$$

$$(\theta AH) = 38^\circ ; (\theta DE) = -25,2 + 180 = 205,2$$

3.8 Ángulos Máximos y Mínimos

Para la obtención de ángulos máximos, se utiliza las ecuaciones del caso 1 del mecanismo de Chase, planteada en el capítulo 2, en la sección 2.3.5. Utilizando la ecuación de cierre de circuito, en el cual el sistema debe partir y terminar en un mismo punto, los eslabones deben estar unidos y la suma de todos sus vectores debe ser igual a cero. De esta manera se van realizando sucesivamente para el cálculo de los parámetros faltantes. Se utiliza los ángulos y longitud establecidas como se muestra en el gráfico 46 y en las tablas 7 y 8.

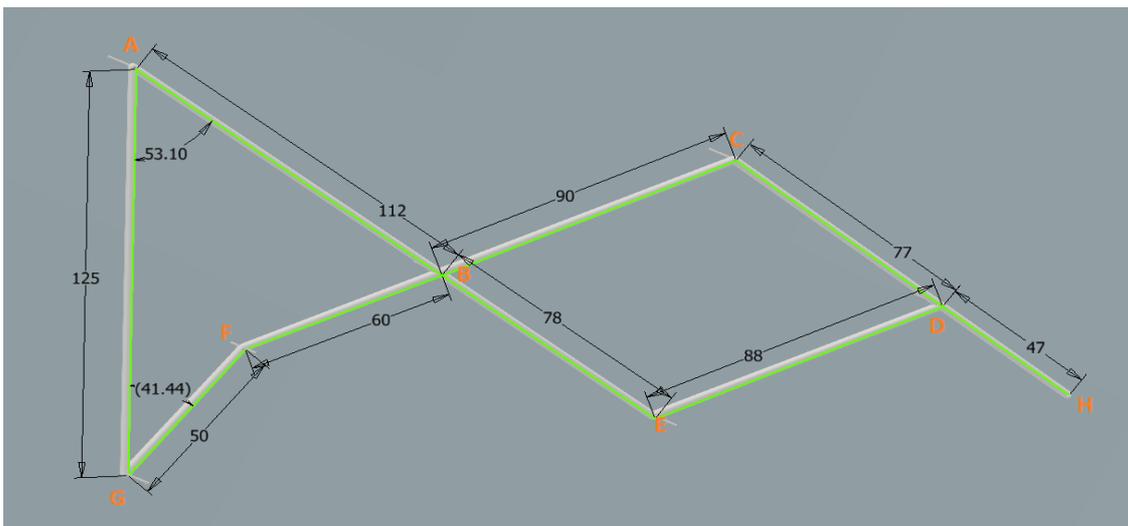


Gráfico 47: Ángulos máximos

Ángulos Mínimos

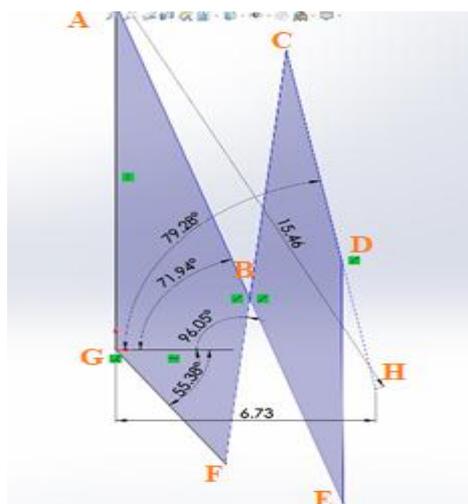


Gráfico 48: Ángulos mínimos

Mecanismo de Chace: Circuito 1, Caso 1:

Para determinar los ángulos máximos del mecanismo se realiza el análisis con el mecanismo de Chace del caso 1 donde se tiene la magnitud y dirección del mismo vector, se puede resolver mediante el cálculo de los ángulos máximos cuando el mecanismo se encuentra abierto se debe realizar un cierre de circuito y determinar los ángulos máximos.

diante la ecuación compleja polar [19], se determina el circuito 1, utilizando las variables de ángulos y distancias que se presenta en el gráfico 51

$$r_2 e^{j\theta_1} + (-r_1 e^{j\theta_2}) = s e^{j\theta_s} \quad [19]$$

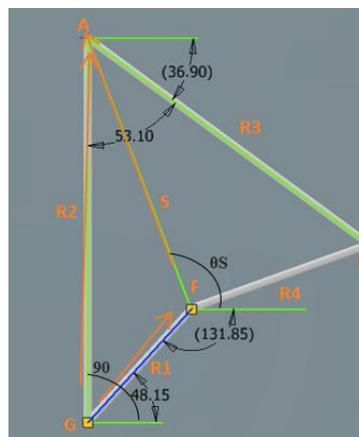


Gráfico 49: Mecanismo de Chace Circuito 1

se debe separar la parte real de la parte imaginaria, y mediante la sustitución de la ecuación de Euler se obtienen componentes reales que corresponden a la parte horizontal y vertical de la ecuación vectorial bidimensional.

$$r_2 \cos(\theta_2) - r_1 \cos(\theta_1) = s \cos(\theta_s)$$

$$r_2 \sin(\theta_2) - r_1 \sin(\theta_1) = s \sin(\theta_s)$$

elevamos al cuadrado las ecuaciones y se suman,

$$r_2^2 \cos^2(\theta_2) - 2r_2r_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_1) + r_1^2 \cos^2(\theta_1) = s^2 \cos^2(\theta_s)$$

$$r_2^2 \sin^2(\theta_2) - 2r_2r_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_1) + r_1^2 \sin^2(\theta_1) = s^2 \sin^2(\theta_s)$$

$$r_2^2 + r_1^2 - 2r_2r_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_1) - 2r_2r_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_1) = s^2$$

Para determinar la longitud del vector S se saca la raíz cuadrada:

$$S = \sqrt{r_2^2 + r_1^2 - 2r_2r_1 \cos(\theta_2)\cos(\theta_1) - 2r_2r_1 \sin(\theta_2)\sin(\theta_1)}$$

en el gráfico 46 se observan las variables a ser utilizadas que son:

$$\theta_2 = 48.15^\circ, \theta_1 = 90^\circ, r_2 = 5 \text{ cm}, r_1 = 12.5 \text{ cm}.$$

$$S = \sqrt{12.5^2 + 5^2 - 2 * 12.5 * 5 \cos(90)\cos(48.15) - 2r_2r_1 \sin(90)\sin(48.15)}$$

$$S = 9,38 \text{ (cm)} \approx 9,32 \rightarrow \text{(solid/inventor)}$$

se obtiene una longitud de 9.38 [cm], mientras que en el software SolidWorks 2018 se obtiene una distancia de 9,32[cm], lo cual tiene una pequeña variación, que es aceptable, se puede apreciar los ángulos máximos obtenidos en el software al finalizar el cálculo de los mecanismos de Chase en el gráfico 59.

el ángulo máximo de θ_S , se obtiene con la identidad trigonométrica tangente, se determina como:

$$\tan \theta = \frac{\text{Sen } \theta}{\text{Cos } \theta}$$

en la identidad trigonométrica de la tangente se reemplaza las igualdades de seno, coseno obtenidas anteriormente en la sustitución de la ecuación de Euler y se obtiene:

$$\frac{S \sin \theta}{S \cos \theta} = \frac{r_2 \sin \theta_2 - r_1 \sin \theta_1}{r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1}$$

Las variables obtenidas del gráfico 46 son reemplazadas para obtener el ángulo

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{12.5 \sin(90^\circ) - 5 \sin(48.15^\circ)}{12.5 \cos(90^\circ) - 5 \cos(48.15^\circ)} \right)$$

El ángulo es $\theta_S = 110.81^\circ$, y en el software se obtiene un ángulo de 110.81° .

Mecanismo de Chace: Circuito 2, Caso 1:

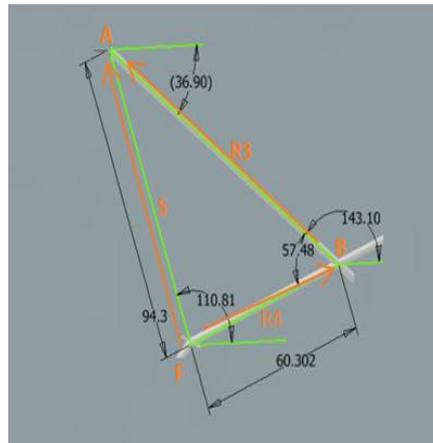


Gráfico 50: Mecanismo de Chace Circuito 2

Mediante la ecuación compleja polar [20], se determina el circuito 2 a ser utilizado

$$r_4 e^{j\theta_4} = S - r_3 e^{j\theta_3} \quad [20].$$

se debe separar la parte real de la parte imaginaria, y mediante la sustitución de la ecuación de Euler se obtienen componentes reales que corresponden a la parte horizontal y vertical de la ecuación vectorial bidimensional. Se eleva a cuadrado las ecuaciones y se suman.

$$r_3 \cos \theta_3 - 2 S r_3 \cos \theta_3 \cos \theta_4 + S \cos \theta_4 = r_4 \cos \theta_4$$

$$r_3 \sin \theta_3 - 2 S r_3 \sin \theta_3 \sin \theta_4 + S \sin \theta_4 = r_4 \sin \theta_4$$

$$r_3^2 + S^2 - (2 S r_3 \cos \theta_3 \cos \theta_4) - (2 S r_3 \sin \theta_3 \sin \theta_4) = r_4^2$$

Para determinar la longitud del vector r_4 se saca la raíz cuadrada:

$$S = \sqrt{r_3^2 + S^2 - (2 S r_3 \cos \theta_3 \cos \theta_4) - (2 S r_3 \sin \theta_3 \sin \theta_4)}$$

en el gráfico 46 se observan las variables a ser utilizadas que son:

$$\theta_3 = 143.10^\circ, \theta_2 = 110.81^\circ, r_1 = 5 \text{ cm}, r_3 = 12.5 \text{ cm}.$$

$$r_4 = \sqrt{11.20^2 + 9.38^2 - 2 * 11.20 * 9.38 \cos(143.10) \cos(110.81) - 2 * 11.20 * 9.38 \sin(143.10) \sin(110.81)}$$

$$r_4 = 6.3 \text{ (cm)} \approx 6.27 \text{ (cm)} \rightarrow \text{(solid/inventor)}$$

se obtiene una longitud de 6.3 [cm], mientras que en el software SolidWorks 2018 se obtiene una distancia de 6.27[cm], lo cual tiene una pequeña variación, que es aceptable, se puede apreciar los ángulos máximos obtenidos en el software al finalizar el cálculo de los mecanismos de Chase en el gráfico 59.

para determinar el ángulo máximo de θ_4 , se utiliza la identidad trigonométrica tangente. Se determina como:

$$\tan \theta = \frac{\text{Sen } \theta}{\text{Cos } \theta}$$

en la identidad trigonométrica de la tangente se reemplaza las igualdades de seno, coseno obtenidas anteriormente en la sustitución de la ecuación de Euler y se obtiene:

se despeja el ángulo θ_4 y se obtiene:

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{S \text{ sen } \theta_5 - r_3 \text{ sen } \theta_3}{S \text{ cos } \theta_5 - r_3 \text{ cos } \theta_3} \right)$$

se reemplaza las variables obtenidas del gráfico 46 que son : $\theta_3 = 143.10^\circ$, $\theta_5 = 90^\circ$, $r_3 = 11.20$ cm, $r_2 = 9.38$ cm.

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{11,20 \text{ sen } (143,1^\circ) - 9,38 \text{ sen } \theta (110,81)}{11,20 \text{ cos } (143,1^\circ) - 9,38 \text{ cos } (110,81)} \right)$$

Se obtiene el ángulo de 199° , mientras que en el programa SolidWorks un ángulo de 198° .

Mecanismo de Chace: Circuito 3, Caso 1:

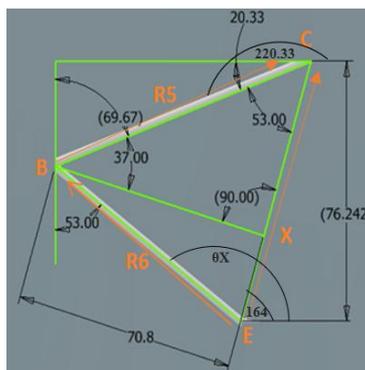


Gráfico 51: Mecanismo de Chace Circuito 3

Mediante la ecuación compleja polar [21], se determina el circuito 2 a ser utilizado

$$r_6 e^{j\theta_6} + r_5 e^{j\theta_5} = X e^{j\theta_X} \quad [21]$$

Se debe separar la parte real de la parte imaginaria, y mediante la sustitución de la ecuación de Euler se obtienen componentes reales que corresponden a la parte horizontal y vertical de la ecuación vectorial bidimensional.

$$r_6 \cos \theta_6 - 2r_6 r_5 \cos \theta_6 \cos \theta_5 + r_5 \cos \theta_5 = x^2 \cos^2 \theta_x$$

$$r_6 \sin \theta_6 - 2r_6 r_5 \sin \theta_6 \sin \theta_5 + r_5 \sin \theta_5 = x^2 \sin^2 \theta_x$$

$$r_6^2 + r_5^2 - 2r_6 r_5 \cos \theta_6 \cos \theta_5 - 2r_6 r_5 \sin \theta_6 \sin \theta_5 = x^2$$

Para determinar la longitud del vector X se saca la raíz cuadrada:

$$x = \sqrt{r_6^2 + r_5^2 - 2r_6 r_5 \cos \theta_6 \cos \theta_5 - 2r_6 r_5 \sin \theta_6 \sin \theta_5}$$

Se reemplaza las variables obtenidas del gráfico 46 $\theta_6 = 164^\circ$, $\theta_5 = 200.33^\circ$, $r_6 = 7.80$ cm, $r_5 = 9$ cm y se obtiene una distancia de 8.6 (cm)

$$x = \sqrt{7.80^2 + 9^2 - 2 * 7.80 * 9 \cos 164^\circ \cos 200.33^\circ - 2 * 7.80 * 9 \sin 164^\circ \sin 200.33^\circ}$$

$$x = 8.6[\text{cm}].$$

$$\mathbf{X} = 8.6 \text{ (cm)} \approx 8.61 \text{ (cm)} \rightarrow \text{(solid/inventor)}$$

Mecanismo de Chace: Circuito 4, Caso 1:

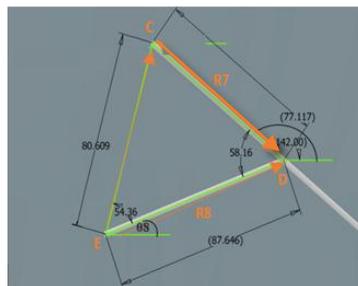


Gráfico 52: Mecanismo de Chace Circuito 4

Mediante la ecuación compleja polar [22], se determina el circuito 4 a ser utilizado

$$\mathbf{r_8 e^{j\theta_8}} = \mathbf{X e^{j\theta_x}} + \mathbf{r_8 e^{j\theta_7}} \quad [22]$$

Se debe separar la parte real de la parte imaginaria, y mediante la sustitución de la ecuación de Euler se obtienen componentes reales que corresponden a la parte horizontal y vertical de la ecuación vectorial bidimensional. Se eleva a cuadrado las ecuaciones y se suman.

se plantea la ecuación [22] elevada al cuadrado.

$$X^2 + r7^2 - 2 * X * r7 \cos \theta 8 \cos \theta x - 2 * X * r7 \sin \theta 7 \sin \theta X = r8^2$$

Para determinar el ángulo máximo de $\theta 8$, se obtiene con la identidad trigonométrica tangente, se determina como:

$$\tan \theta 8 = \frac{\text{Sen } \theta}{\text{Cos } \theta}$$

se despeja el ángulo $\theta 8$ y se obtiene

$$\theta 8 = \tan^{-1} \left(\frac{X \sin \theta X + r7 \sin \theta 7}{X \cos \theta X + r7 \cos \theta 7} \right)$$

reemplazando las variables obtenidas del gráfico 46 que son: $\theta X = 90^\circ$, $\theta 7 = 142^\circ$, $r7 = 7.70 \text{ cm}$, $X = 8.7 \text{ cm}$ y se obtiene una distancia de 8.6 (cm)

$$\theta 8 = \tan^{-1} \left(\frac{8,7 \sin (90) + 7,7 \sin (142)}{8,7 \cos (90) + 7,7 \cos (142)} \right)$$

resolviendo, se obtiene como resultado un ángulo máximo de:

$$\theta 8 = 205,2^\circ$$

3.9 Análisis De Fuerzas

En esta sección se realiza el análisis de fuerza para el punto más crítico del mecanismo. Se conoce las distancias de los eslabones (links), ángulos máximos, y el peso de la estructura (huesos y plumas). Se utiliza

el método de la matriz: en este método se pone las direcciones de la fuerza en 'x' e 'y'. Se obtiene un total de 15 ecuaciones con 15 incógnitas. Se organiza una ecuación matricial, y finalmente, utilizando el software Matlab se resuelve el sistema de matriz.

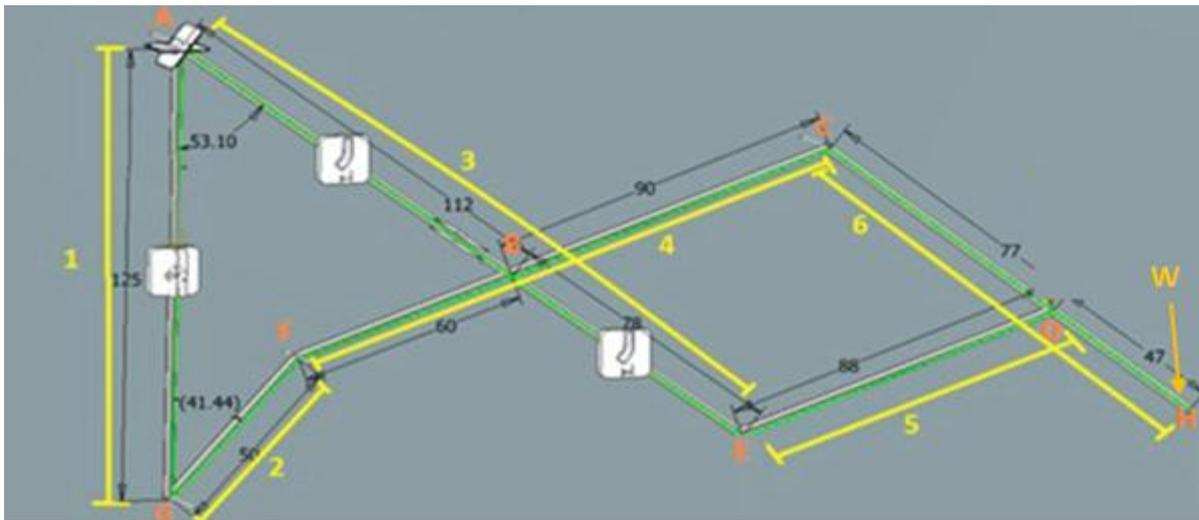


Gráfico 53: Análisis de Fuerzas

Para realizar el análisis de fuerza se realiza un análisis estático de cada uno de los eslabones que conforman el mecanismo para posteriormente determinar las fuerzas. Se asume que el peso del mecanismo actúa en el extremo derecho del eslabón 5 y esto es equivalente a la fuerza peso de la suma de las masas de todos los eslabones por la aceleración de la gravedad.

$$W = mg \quad [11]$$

donde m es la masa, g gravedad, M es la sumatoria de todas masas de los eslabones que se tiene para el cálculo de fuerzas.

$$M = m1 + m2 + m3 + m4 + m5 + m6$$

y g es la gravedad medida en unidades internacionales.

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Se quiere encontrar cuál es el torque T requerido por el ala de la lechuza para lograr vencer el peso W del mecanismo y levantar el ala. Se realiza el análisis estático del mecanismo utilizando las 3 ecuaciones de equilibrio para cada eslabón.

Ecuaciones:

$$\sum F_x = 0 \quad ; \quad \sum F_y = 0 \quad ; \quad \sum M = 0 \quad [14]$$

Se procede a realizar la sumatorias de fuerzas y momentos para cada una de las uniones de los eslabones del mecanismo.

Link 2

En el gráfico 53 se visualiza las reacciones en las uniones G y F, donde se realiza la sumatoria de las tres ecuaciones de equilibrio [14].

la sumatoria de fuerzas en el eje x se presenta:

$$+\rightarrow \sum f_x = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [1]

$$= RG_y + RF_y \quad [1.]$$

La sumatoria de fuerzas en el eje y se presenta:

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

y de esta manera se presenta la ecuación [2.]

$$= RG_x + RF_x \quad [2.]$$

La sumatoria de momentos en la unión G, para determinar la ecuación [3]:

$$\sum MG = 0$$

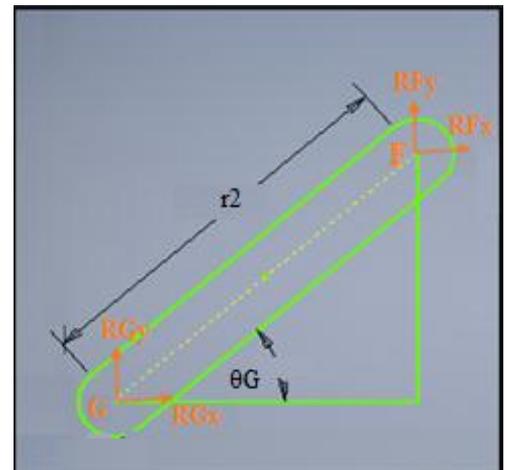


Gráfico 54: Link 2

$$= (RFy)r_2 \cos \theta G - (RFx)r_2 \sin \theta G \quad [3.]$$

Link 4

En el gráfico 54 se visualiza las reacciones en las uniones F, B y C, donde se realiza la sumatoria de las tres ecuaciones de equilibrio [14].

la sumatoria de fuerzas en el eje x se presenta:

$$+\rightarrow \sum F_x = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [4.]

$$= RCx + RFx + RBx = 0 \quad [4.]$$

la sumatoria de fuerzas en el eje y se presenta:

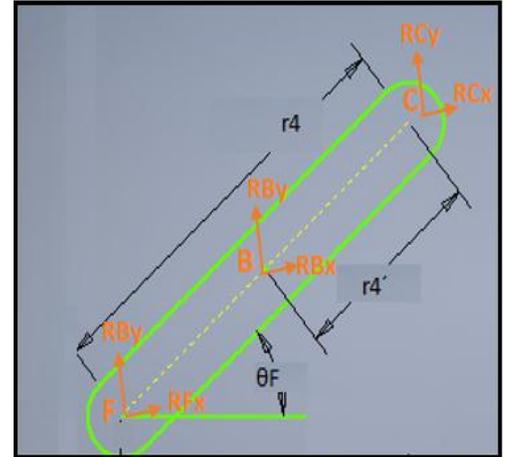


Gráfico 55: Link 4

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [5.]

$$RCy + RFy + RBy = 0 \quad [5.]$$

La sumatoria de momentos en la unión B, para determinar la ecuación [6.]

$$\sum MB = 0$$

Se obtiene la ecuación [6.]

$$(RCy)r_4 \cos \theta G - (RCx) \operatorname{sen} \theta F + (RBy)r_4 \cos \theta G - (RBx) r_4 \operatorname{sen} \theta F = 0 \quad [6.]$$

Link 3

En el gráfico 55 se visualizan las reacciones en las uniones A, B y E. Se realiza la sumatoria de las tres ecuaciones de equilibrio [14]. En este eslabón se cuenta con un torque requerido por el ala de la lechuza para lograr vencer el peso W del mecanismo y levantar el ala.

la sumatoria de fuerzas en el eje x se presenta:

$$+\rightarrow \sum F_x = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [7.]

$$R_{Ex} + R_{Bx} + R_{Ax} = 0 \quad [7.]$$

la sumatoria de fuerzas en el eje y se presenta:

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [8.]

$$R_{Ey} + R_{By} + R_{Ay} = 0 \quad [8.]$$

La sumatoria de momentos en la unión A:

$$\sum M_A = 0$$

Se obtiene la ecuación [9.]

$$\begin{aligned} &= (R_{Ax})r_3 \sin(180 - \theta E) + (R_{Ay})r_3 \cos(180 - \theta E) \\ &+ (R_{Bx})r_3 \sin(180 - \theta E) + (R_{By})r_3 \cos(180 - \theta E) + T = 0 \quad [9.] \end{aligned}$$

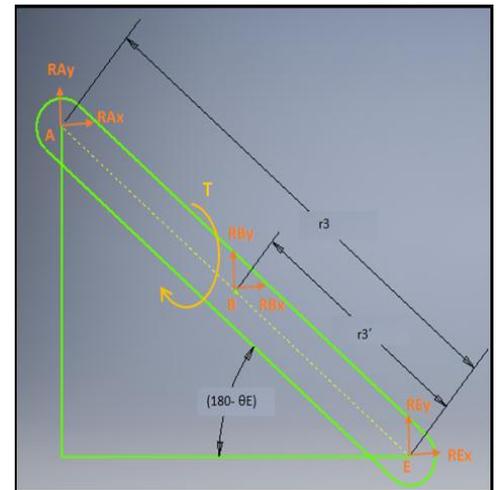


Gráfico 56: Link 3

Link 6

En el gráfico 56 se visualiza las reacciones en las uniones D y E donde se realiza la sumatoria de las tres ecuaciones de equilibrio [14].

La sumatoria de fuerzas en el eje x se presenta:

$$+\rightarrow \sum F_x = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [10.]

$$RD_x + RE_x = 0 \quad [10.]$$

La sumatoria de fuerzas en el eje y se presenta:

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [11.]

$$RD_y + RE_y = 0 \quad [11.]$$

La sumatoria de momentos en la unión F:

$$\sum MF = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [12.]

$$(RD_y)r_6 \cos\theta_E - (RD_x)r_6 \sin\theta_E = 0 \quad [12.]$$

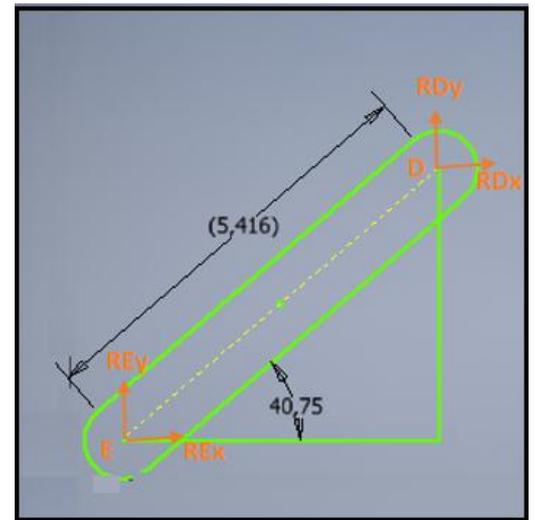


Gráfico 57: Link 6

Link 5

En el gráfico 57 se visualizan las reacciones en las uniones C, D y H, donde se realiza la sumatoria de las tres ecuaciones de equilibrio y la fuerza del peso aplicado en la unión H. [14].

la sumatoria de fuerzas en el eje x se presenta:

$$+\rightarrow \sum F_x = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [13.]

$$RC_x + RD_x = 0 \quad [13.]$$

La sumatoria de fuerzas en el eje y se presenta:

$$+\uparrow \sum F_y = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [14.]

$$RC_y + RD = 0 \quad [14.]$$

La sumatoria de momentos en la unión F:

$$\sum M_H = 0$$

y de esta manera se obtiene la ecuación [15.]

$$-(RC_y)r_5 \cos(180 - H) - (RC_x)r_5 \sin(180 - H)$$

$$- (RD_y)r_5 \cos(180 - H) - (RD_x)r_5 \cos(180 - H) = 0$$

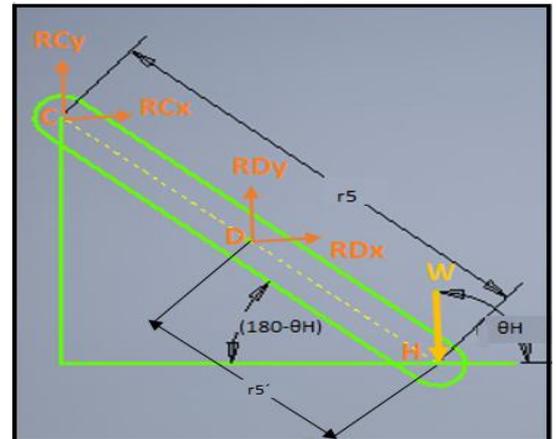


Gráfico 58: Link 5

A continuación, se observa la Tabla 9, con el resumen de las ecuaciones obtenidas para las reacciones en cada una de las uniones que conforman el mecanismo para el ala de la lechuga.

Tabla 9: Resumen de ecuaciones

N°	Ecuaciones
1.	$RGy + RFy = 0$
2.	$RGx + RGy = 0$
3.	$(RFy)12 \cos \theta G - (RFx) 12 \sin \theta G$
4.	$RCx + RFx + RBx = 0$
5.	$RCy + RFy + RBy = 0$
6.	$(RCy)r4 \cos \theta F - (RCx)r4 \sen \theta F$ $+ (RBy)r4 \cos \theta F - (RBx)r4 \sen \theta F$
7.	$REx + RBx + RAx = 0$
8.	$REy + RBy + RAy = 0$
9.	$(RAx)r3 \sen (180 - \theta E)$ $+ (RAy)r3 \cos(180 - \theta E) + (RBx)r3 \sen (180 - \theta F)$
10.	$RDx + REx = 0$
11.	$RDy + REy = 0$
12.	$(RDy)r6 \cos \theta E - (RDx)r6 \sin \theta E = 0$
13.	$REx + RDx = 0$
14.	$REy + RDy = 0$
15.	$(REy)r5 \cos(180 - H) + (REx)r5 \sen (180 - H)$ $+ (RDy)r5 \cos(180 - H) + (RDx)r5 \cos(180 - H) = 0$

Se obtiene un sistema de 15 ecuaciones con 15 incógnitas (reacciones). Transformamos este sistema de ecuaciones a una matriz para resolver las incógnitas resolviendo el problema:

$$[\mathbf{A}][\mathbf{R}] = [\mathbf{b}] \quad [23]$$

Donde $[\mathbf{A}]$ es la matriz de coeficientes, $[\mathbf{R}]$ es el vector de incógnitas (reacciones), y $[\mathbf{b}]$ es el vector de equilibrio que representa todos los términos de los coeficientes que no se multiplican directamente con ninguna de las incógnitas en el sistema. El problema se resuelve matemáticamente como:

$$[\mathbf{R}] = [\mathbf{A}]^{-1}[\mathbf{b}] \quad [24]$$

donde $[\mathbf{A}]^{-1}$ es la matriz inversa de la matriz $[\mathbf{A}]$. Dado que es una matriz (15 X 15), utilizando herramientas computacionales, el cálculo tiene un menor grado de complejidad. En el Software Matlab se pudo realizar este cálculo para obtener las reacciones:

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} R_{Ax} \\ R_{Ay} \\ R_{Bx} \\ R_{By} \\ R_{Cx} \\ R_{Cy} \\ R_{Dx} \\ R_{Dy} \\ R_{Gx} \\ R_{Gy} \\ R_{Ex} \\ R_{Ey} \\ R_{Hx} \\ R_{Hy} \end{bmatrix} \quad [25]$$

A continuación, se presenta la matriz resuelta. Para obtener las reacciones obtenidas en cada link, se utilizó los ángulos máximos y se conoce cada una de las medidas de los links de la estructura que conforma el mecanismo. Con Matlab se realiza la operación, como se observa a continuación:

$$\begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0372 & 0.0334 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0.0206 & 0.0563 & -0.0516 & 0.0516 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0.0524 & 0.1826 & 0.0215 & 0.0750 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0302 & 0.0827 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0763 & 0.0977 & 0.0289 & 0.0370 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{bmatrix} \quad [26]$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix}
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 0.2500 \\
 0
 \end{bmatrix} \quad [27]$$

Se obtiene como resultado la matriz de reacciones tanto en el eje x como en el eje y, como se presenta a continuación en la ecuación [28]

$$R = \begin{bmatrix} 1.1077 \\ 0.6686 \\ 0.0473 \\ -0.2464 \\ -0.4222 \\ -0.1722 \\ 1.1549 \\ 0.4222 \\ -1.1549 \\ -0.4222 \\ 0.3749 \\ 0.4186 \\ -0.3749 \\ -0.4186 \\ -0.1627 \end{bmatrix} \quad [28]$$

3.10 Análisis de fuerza en el eslabón DE.

En esta sección se realiza el análisis del eslabón DE el cual es el más crítico puesto que es donde existe mayor fuerza. Para poder determinar el esfuerzo normal, deformación plástica y deformación inelástica como se observa a continuación. En la Tabla 10 se presentan las fuerzas del eslabón en sus dos puntos D, E y la fuerza de las coordenadas x, y.

Tabla 10: Fuerza del eslabón X, Y.

	Fuerza X [N]	Fuerza Y [N]
D	1,1549	0,4222
E	-1,1549	- 0,4222

En el gráfico 58 se observa la dirección de las fuerzas en los puntos D y E, para el análisis de esfuerzo. El eslabón DE tiene forma cilíndrica con agujeros que sirven para introducir las plumas.

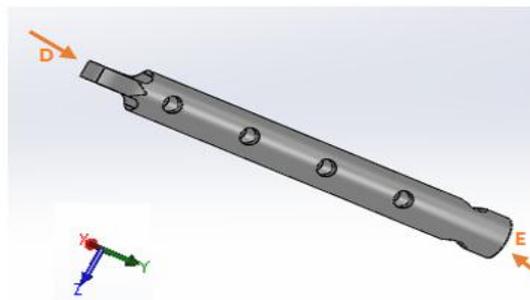


Gráfico 59: Eslabón DE

Se observa que las fuerzas del punto D y E son similares pero su dirección es diferente. Esto se debe a la posición de este y la similitud de ángulos, como se determinó en el análisis de posición. Se obtiene la fuerza máxima del eslabón con la ecuación que se presenta:

$$F_{max} = \sqrt{RDx^2 + RDy^2}$$

se utiliza los valores de la Tabla 10 para RDx y RDy.

$$F_{max} = \sqrt{(1.1549)^2 + (0.4222)^2}$$

dando como resultado:

$$F_{max} = 1,2297 \text{ [N]}.$$

se determinó el ángulo máximo del eslabón, mediante la función trigonométrica de la tangente.

$$\tan \phi = \frac{RDy}{RDx}$$

se despeja ϕ , y se obtiene la ecuación que se presenta a continuación.

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{RDy}{RDx} \right)$$

se rempazan los valores de RDy y RDx

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{0,4222[N]}{1,1549[N]} \right)$$

dando como resultado:

$$\phi_{DE} = 20.08^\circ$$

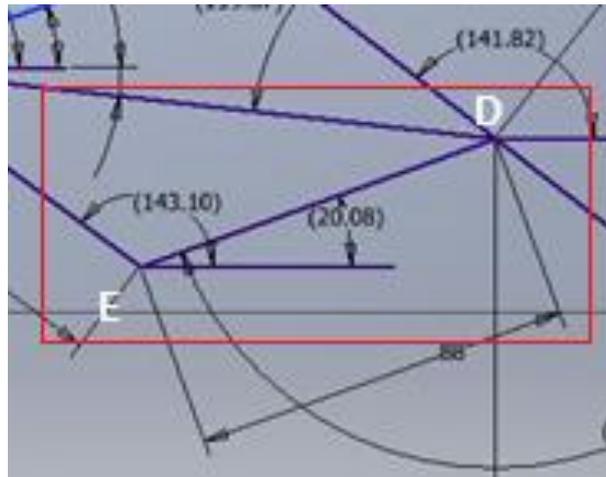


Gráfico 61: Eslabón DE

Se realiza el diagrama de momento y cortante para poder determinar el momento del eslabón DE y poder determinar el factor de seguridad.

Para realizar el cálculo del esfuerzo de flexión del eslabón DE, con una longitud de 0,088 [m] de largo, se obtiene el momento, la inercia que ejerce la barra, al ser una barra circular se debe tomar en cuenta el radio interior y exterior ya que el tubo es hueco.

Se utiliza la ecuación [6]

$$\sigma_{bending} = \frac{Mc}{I}$$

donde Mc, el momento e I es la inercia del cuerpo, en este caso un cilindro.

$$\sigma_{bending} = \frac{(-0,03715) \left[\frac{N}{m} \right] (0,03299 [m])}{\frac{\pi}{4} * [(0,0025)^4 [m] - (0,00125)^4 [m]]}$$

se obtiene como resultado:

$$\sigma_{bending} = 1,2916E6 [Pa].$$

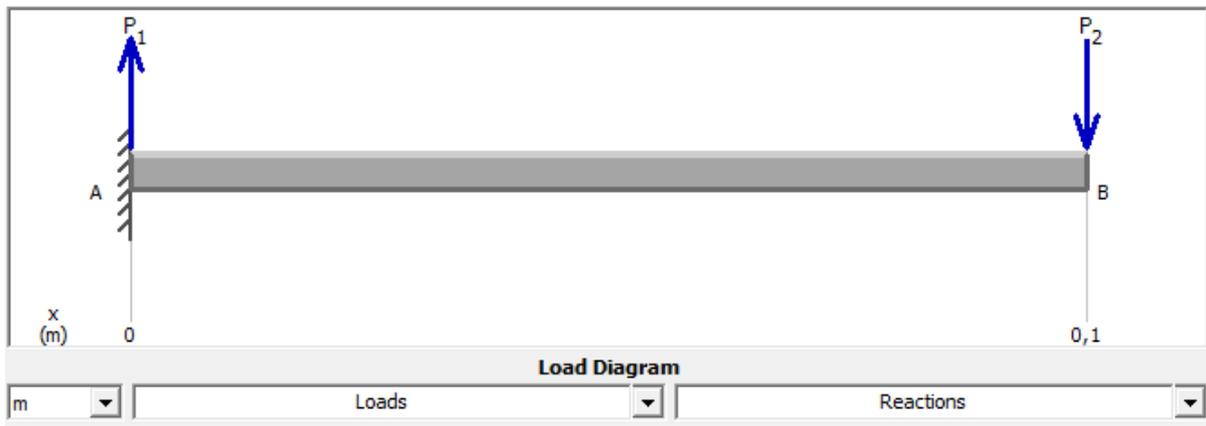


Gráfico 62: Análisis de Flexión

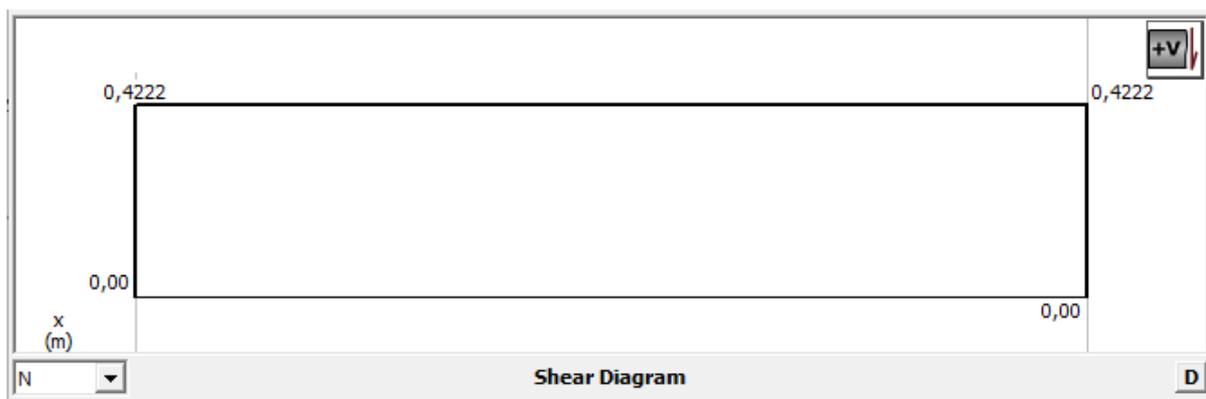


Gráfico 63: Diagrama de Cortante

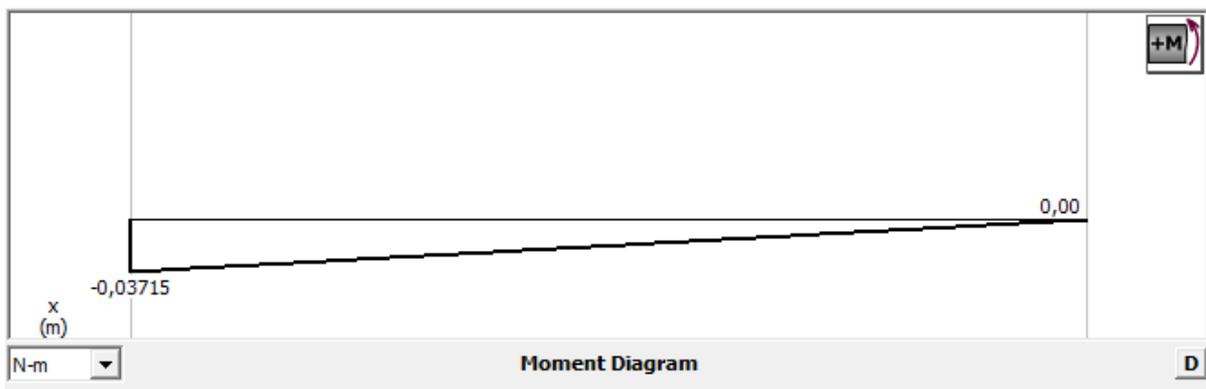


Gráfico 64: Diagrama de Momento

Se utiliza la ecuación [7] para obtener el factor de seguridad elástico. Se utilizan las propiedades del material descritas en la Tabla 1.

$$n = \frac{\sigma_{yield (PVC)}}{\sigma_{bending}}$$

se reemplaza el valor de $\sigma_{yield (PVC)}$ que es el límite elástico, y el valor del esfuerzo máximo obtenido anteriormente de $1,2916E5$ [Pa]

$$n = \frac{4,14E7 \left[\frac{N}{m^2} \right]}{1,2916E6 \text{ [Pa]}}$$

dando como resultado un factor de seguridad de:

$$n = 32.05$$

Se obtiene un factor de seguridad alto de 32.05 debido a las propiedades mecánicas que posee el material elegido que es PVC.

3.11 Análisis de esfuerzo de flexión del ala.

Para realizar el análisis de esfuerzos de flexión del ala, se asume al ala como una viga y el peso se encuentra distribuido uniformemente en toda el ala como se observa en el gráfico 64, por lo que se realizó el análisis desde la vista superior del mecanismo. Este se observa como una viga empotrada. Se realiza la sumatoria de momentos y fuerzas para obtener el esfuerzo de flexión y los factores de seguridad.

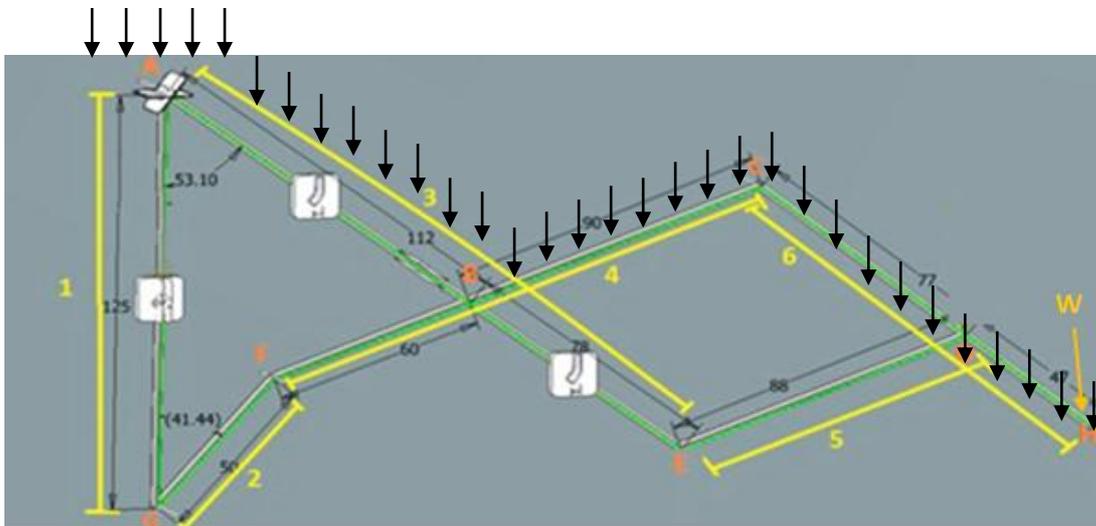


Gráfico 65: Distribución del peso

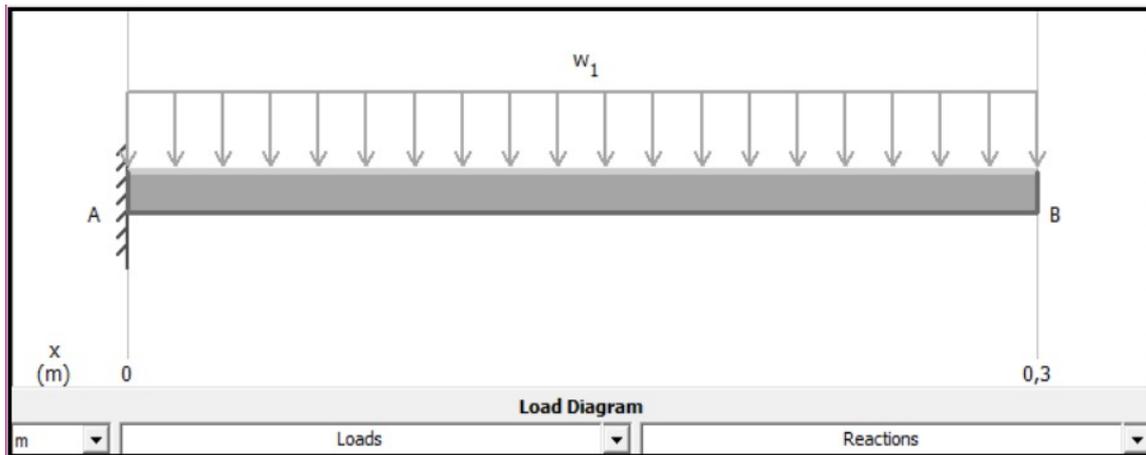


Gráfico 66: Análisis de Flexión

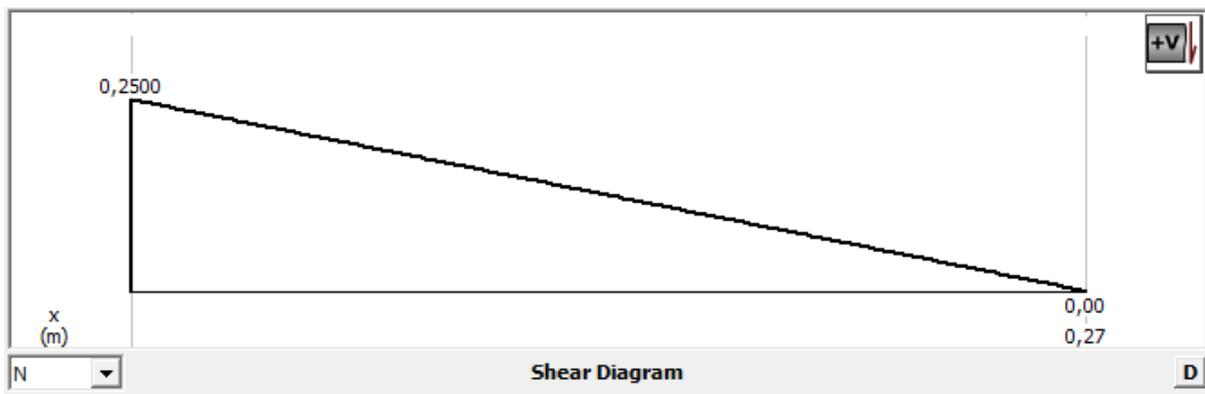


Gráfico 67: Diagrama de Cortante

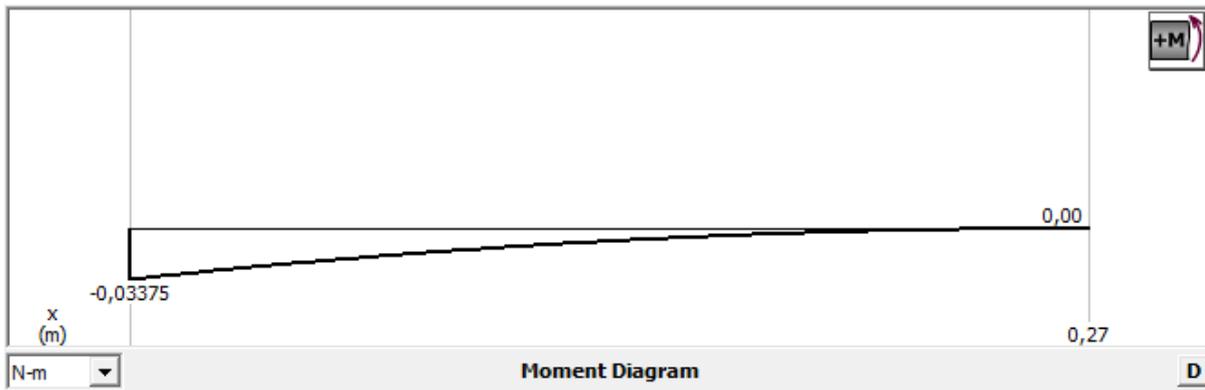


Gráfico 68: Diagrama de Momento

Mediante las ecuaciones [14], de sumatorias de fuerza y momento de la vista superior del mecanismo.

$$+\uparrow \sum Fy = 0$$

La sumatoria en el eje y, es el peso por la distancia del ala.

$$RAy = WL$$

donde W es el peso en [N/m], por lo cual se divide al peso en Newtons obtenido anteriormente para la longitud total del ala que es 0,27[m].

$$RAy = (0.92593) \left[\frac{N}{m} \right] * (0,27)[m]$$

dando como resultado:

$$RAy = 0.25 [N].$$

En la sumatoria de momento en el punto A se obtiene:

$$\sum MA = 0$$

se obtiene una ecuación de la suma de la fuerza el peso W por la longitud y esta multiplicada por la mitad de la longitud.

$$MA - WL * \frac{L}{2} = 0$$

se multiplican las longitudes L dando la ecuación que se presenta a continuación:

$$MA = \frac{WL^2}{2} = 0$$

$$MA = \frac{(0,9259 [N/m]) * (0,27 [m])^2}{2}$$

dando como resultado un momento de:

$$MA = 0.03375 [N].$$

Se puede observar en el gráfico 67 que el momento máximo obtenido en la gráfica es el mismo que el obtenido analíticamente de 0,03375 [N].

Para realizar el esfuerzo de flexión del ala desde la vista superior se asume que es una biga empotrada, con una longitud de 0,27 [m] de largo y un peso de 0,92593[N/m]. Se obtiene el momento, la inercia que ejerce la barra, al ser una barra circular se debe tomar en cuenta el radio interior y exterior ya que el tubo es hueco.

Se utiliza la ecuación [6]

$$\sigma_{bending} = \frac{MC}{I}$$

donde Mc, el momento e I es la inercia del cuerpo, en este caso un cilindro.

$$\sigma_{bending} = \frac{Mc}{\frac{\pi}{4} * [(R_{externo})^4 - (R_{interno})^4]}$$

donde el momento se da por la fuerza del peso W es 0,92593[N/m], L es la longitud de 0,27[m], radio exterior es de 0,0025 [m] y el radio interior de 0,00125[N], dando un esfuerzo de torsión de:

$$\sigma_{bending} = 1.9356E6[Pa].$$

Se realiza el cálculo de factor de seguridad respecto al esfuerzo yield del material, en este caso PVC, respecto al esfuerzo de torsión. Con este análisis se pretende obtener un factor de seguridad alto.

$$n = \frac{\sigma_{yield (PVC)}}{\sigma_{bending}}$$

Se remplazan las variables del esfuerzo de rendimiento del material de 4.14E7 [N/m], y el esfuerzo de torsión encontrado anteriormente

$$n = \frac{4,14E7[\frac{N}{m}]}{1.93E6[Pa]}.$$

Se obtiene un factor de seguridad de:

$$n = 69,2$$

3.12 Simulación Mecanismo FEA.

A continuación, se observa el análisis de elementos finitos, realizada en el programa SolidWorks 2018 para obtener los esfuerzos y el factor de seguridad. El mecanismo está en su posición máxima. Se aplicó la fuerza del peso del mecanismo W 0.25 [N]. En el gráfico 69 se realiza el mallado sólido o tetraédrico en toda la estructura, se malla como nodos y elementos. Se definen condiciones de frontera donde se restringe el movimiento en las partes fijas que son el punto A y G.

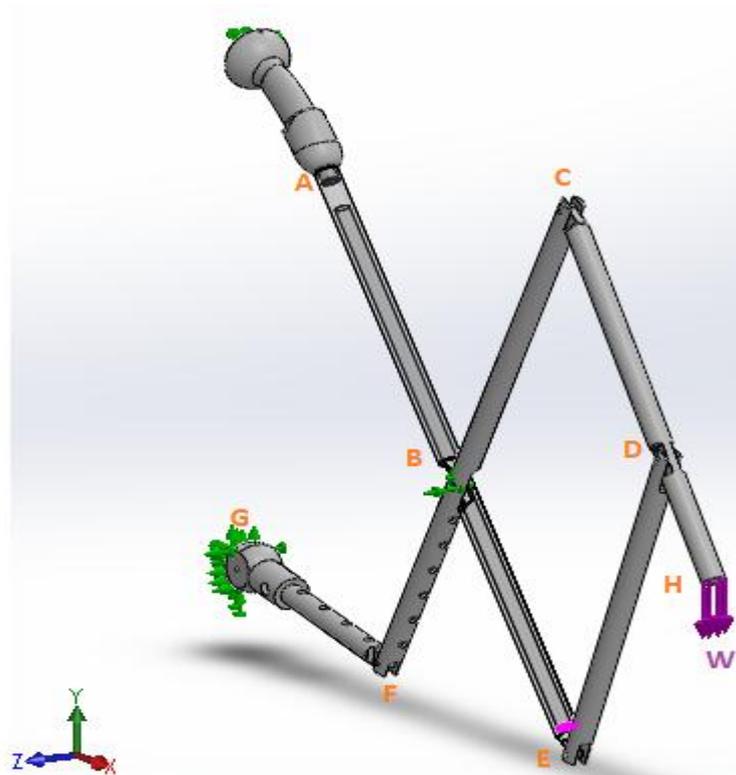


Gráfico 69: Elementos Finitos.

Se realiza el mallado de la estructura, como se presenta a continuación en el gráfico 69. Se realizó un mallado tetraédrico.

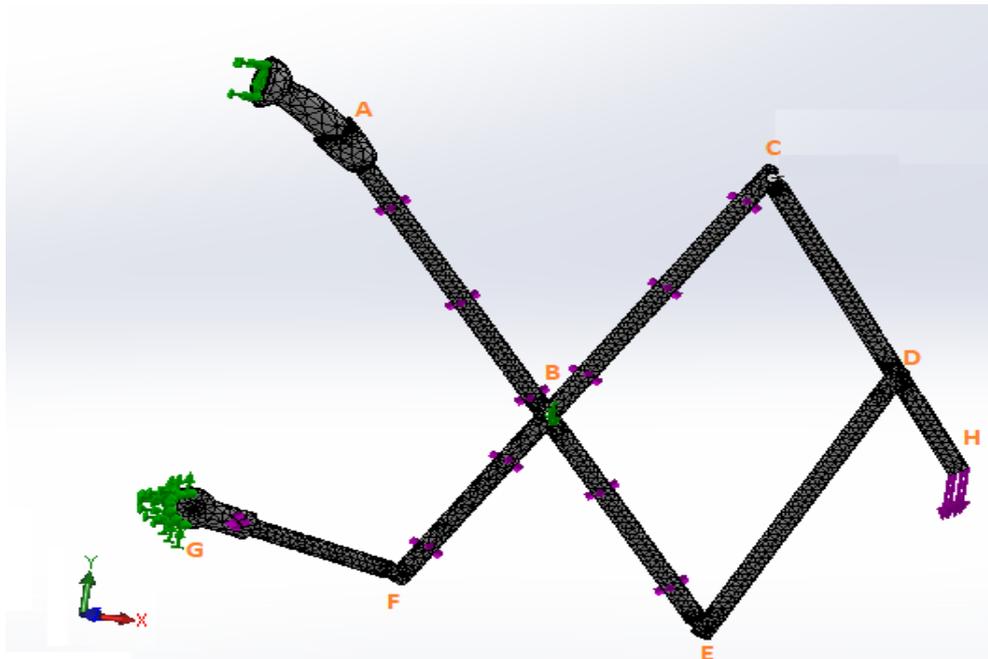


Gráfico 70: Mallado del mecanismo

En el gráfico 70 se observa el esfuerzo de Von Mises en la estructura, con el fin de observar los puntos más críticos en el ala, como se observa esto sucede en la unión del eslabón. Se obtiene un valor máximo de 10.55[MPa] teniendo un límite plástico del material de 414,00 [MPa].

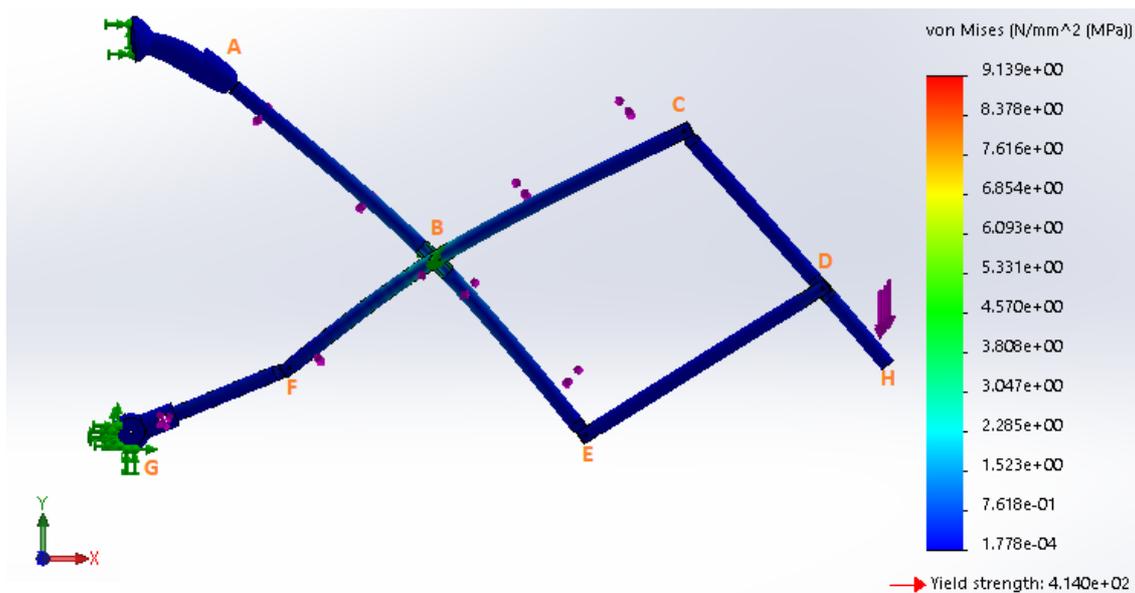


Gráfico 71: Esfuerzo de Von Mises del mecanismo

En el gráfico 71, se observa el factor de seguridad obtenido en el análisis de elementos finitos, para la estructura en el punto más crítico. Se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 45 en el cálculo de elementos finitos.

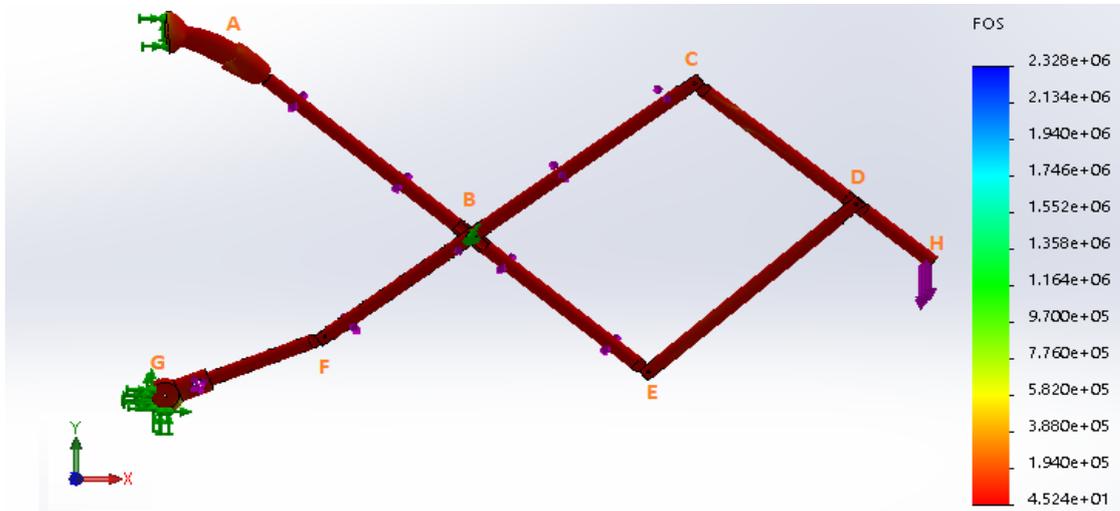


Gráfico 72: Factor de seguridad

En el gráfico 72 se presenta el desplazamiento que realiza el mecanismo al aplicar la fuerza del peso, se observa un desplazamiento aproximado de 2[mm].

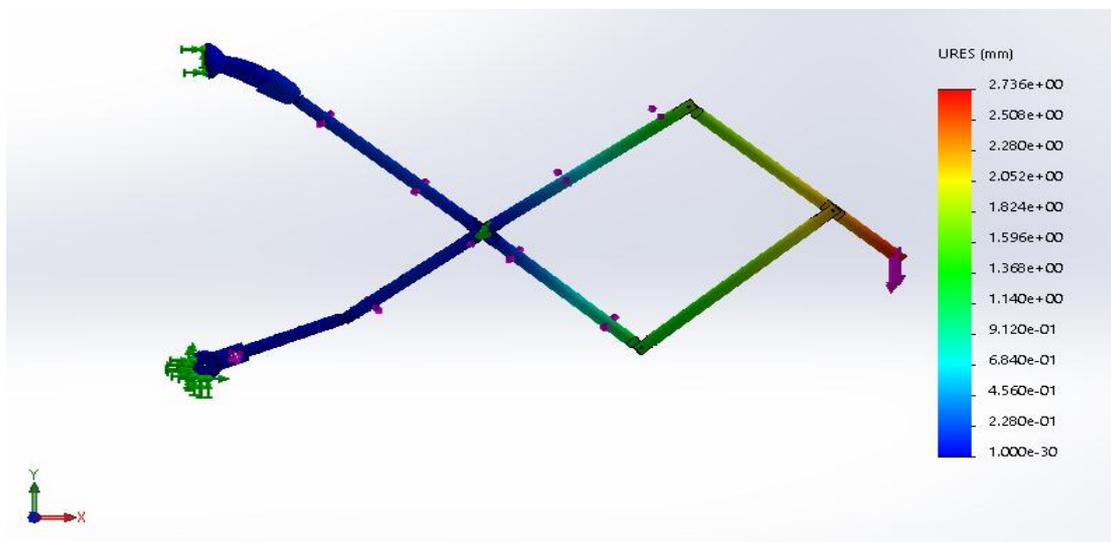


Gráfico 73: Anclaje del ala parte superior e inferior

3.13 Simulación CFD

Con el fin de corroborar los resultados obtenidos de forma analítica, se desarrolló una simulación de Fluidos Dinámicos Computarizados, utilizando el software Solid Works 2018.

Para esto, primero se graficó el modelo en SolidWorks, un software CAD. Se tomó como referencia al modelo aerodinámico de una lechuza mencionado anteriormente en el capítulo 2 en la sección 2.3.9. En el gráfico 73 se observa el perfil creado para la estructura del mecanismo de la lechuza. En esta simulación se realiza el estudio de dos situaciones críticas la de vuelo máximo y de frenado

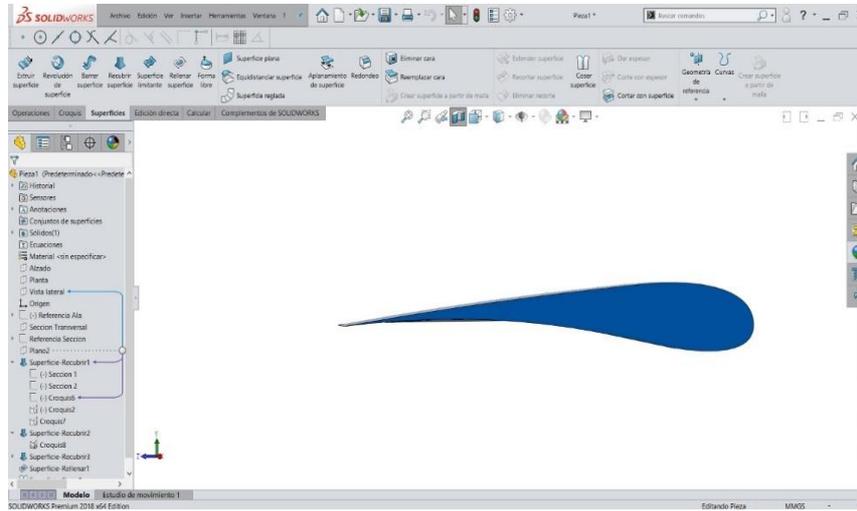


Gráfico 74: Perfil de ala, corte transversal

Una vez obtenido el perfil se procede a crear un dominio por donde se simula el paso del aire y se establece las condiciones para cada una de las situaciones mencionadas anteriormente de velocidad y frenado. El dominio tiene dimensiones en los ejes x, y, z, como se observa el gráfico 74. La malla que se utiliza es de 96 celdas, en las simulaciones se utiliza la técnica de volúmenes finitos.

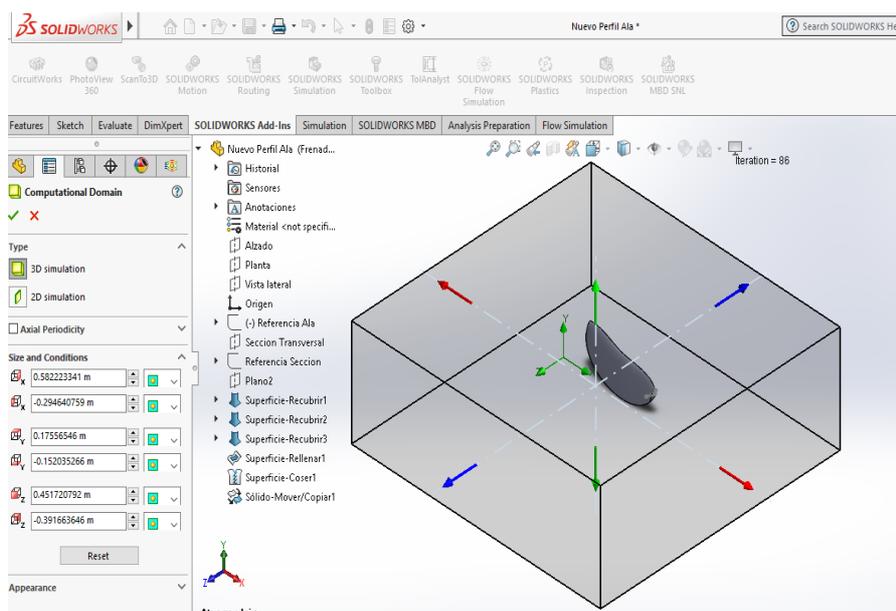


Gráfico 75: Dominio para perfil de ala

En el gráfico 75, se observa la aplicación de la ecuación tanto del coeficiente de lift como de drag, en el CFD Flow Simulation, donde se pone los datos para cada caso. Con la simulación se obtiene el coeficiente de lift y drag, aplicando las ecuaciones [18]y [19]: se aplica en el programa de SolidWorks.

Tabla 11: Resultados coeficiente de lift y drag con variación.

CFD RESULTADOS VUELO ÁNGULO 0°				
Variables	Unidades	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Velocidad	[m/s]	22	15	7
Fuerza de Drag	[N]	0.270	0.128	0.030
Fuerza de Lift	[N]	0.523	0.241	0.052
Cd	[N]	0.872	0.193	0.010
Cl	[N]	0.093	0.092	0.091

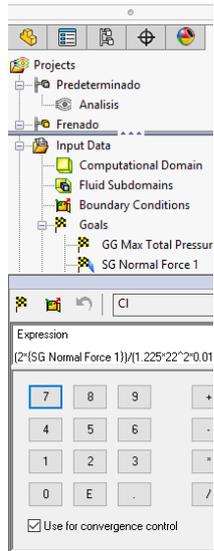


Gráfico 76: Aplicación de ecuación en el programa

Para el primer caso a ser estudiado, se toma en cuenta el comportamiento del cuando está en vuelo. Se plantean 3 casos con velocidades distintas: velocidad máxima 22 [m/s], velocidad media 15[m/s] y velocidad mínima 7[m/s], con un ángulo de 0° como se observa en el gráfico 76 dentro del dominio creado anteriormente.

Para obtener el coeficiente de lift, se utiliza en la ecuación [18], donde L es la fuerza de sustentación que se encuentra en dirección perpendicular a la velocidad de corriente incidente. En el programa se debe señalar la fuerza que actúa para esta variable, es decir : L la fuerza lift en el eje y, ρ la densidad del aire 1.225 [kg/m³], V la velocidad de vuelo del ave que se establecen anteriormente, y S la superficie como se observa en el gráfico 76.

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 * S} \quad [18]$$

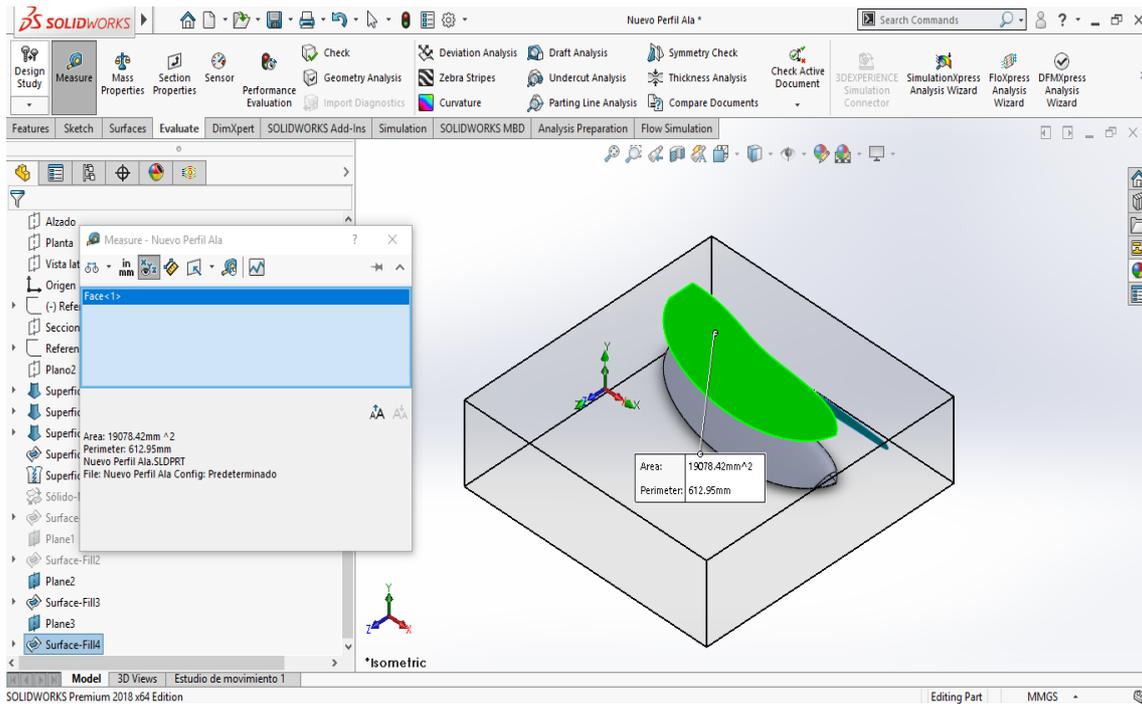


Gráfico 77: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CL

Para obtener el coeficiente de Drag se utiliza la ecuación [19], donde D es la fuerza de drag correspondiente a la fuerza en Z en el programa, y se utiliza las mismas variables de V velocidad de 22[m/s], 15[m/s], 7[m/s], ρ la densidad del aire 1.225 [kg/m³], y la S superficie del ala como se observa en el gráfico 77

$$C_D = \frac{2D}{\rho V^2 * S} \quad [19]$$

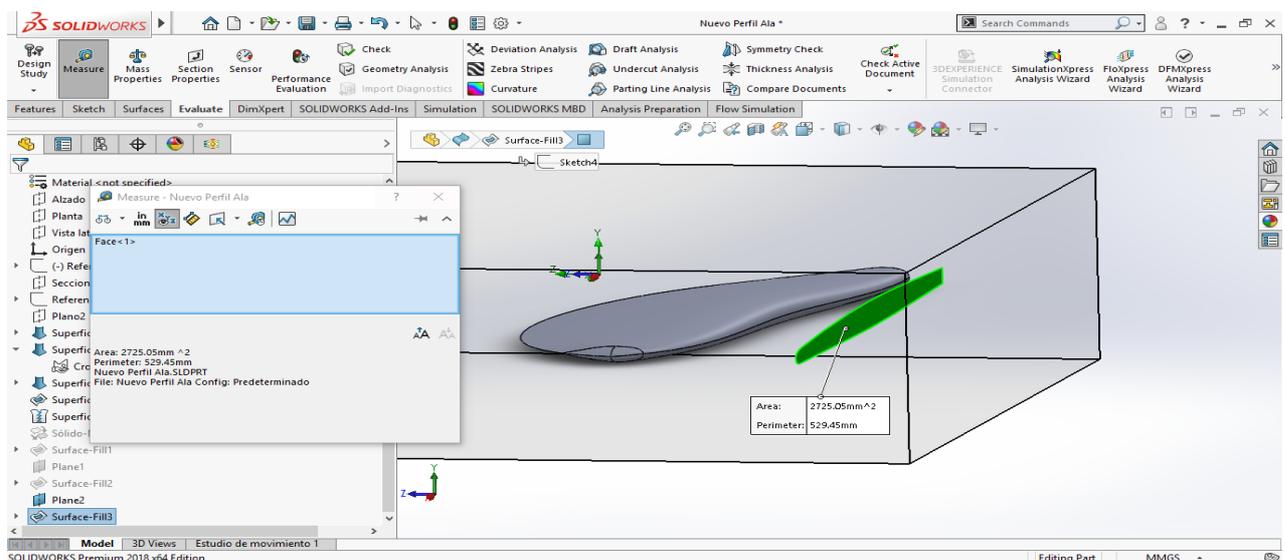


Gráfico 78: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CD en un ángulo de 0°

Los cálculos obtenidos mediante el uso de las ecuaciones del coeficiente de lift y drag, se muestran a continuación en el gráfico 78. Se realizó un estudio de las mismas ecuaciones, pero con velocidades diferentes debido al proceso de adaptación que tendría el ave desde una velocidad de 7[m/s], 15 [m/s], y 22 [m/s].

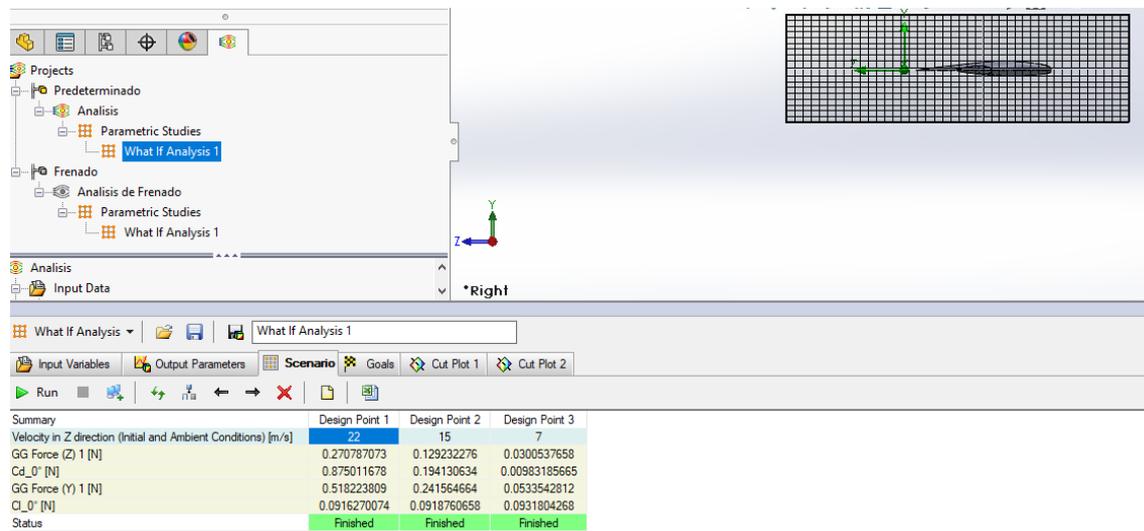


Gráfico 79: Simulación CFD, coeficientes aerodinámicos, perfil a 0°

El segundo caso a estudiar es el de frenado del ave, en el cual los parámetros se mantienen constantes con excepción del ángulo de inclinación que ahora cambia a 60°. Con la aplicación de las ecuaciones [18] y [19], correspondientes al coeficiente de lift y drag y el uso del programa Flow Simulation, se puede obtener el resultado de dichos coeficientes como se presenta a continuación:

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 * S} \quad [18]$$

donde L es la fuerza de lift, la cual se debe seleccionar en el programa como la fuerza que se encuentra perpendicular a la velocidad del perfil en estudio; en este caso es la fuerza en el eje y, ρ es la densidad del aire de 12.5 [kg/m³], V es la velocidad de vuelo de 7 [m/s], 15[m/s] del ave de 22[m/s] y la superficie del ala como se observa en el gráfico 79.

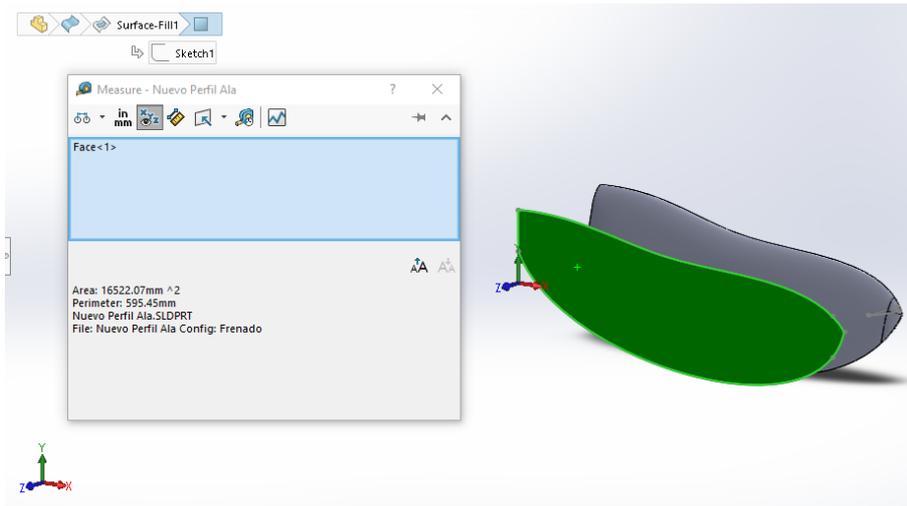


Gráfico 80: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CL ángulo 60°

Para obtener el coeficiente de Drag se utiliza la ecuación [19], en el programa de SolidWorks se adhiere la ecuación, con las variables mencionadas anteriormente de velocidad máxima y el ángulo 60°.

$$C_D = \frac{2D}{\rho V^2 * S} \quad [19]$$

donde D es la fuerza de drag, ρ es la densidad del aire, y la superficie que actúa en esta ecuación se observa en el gráfico 80

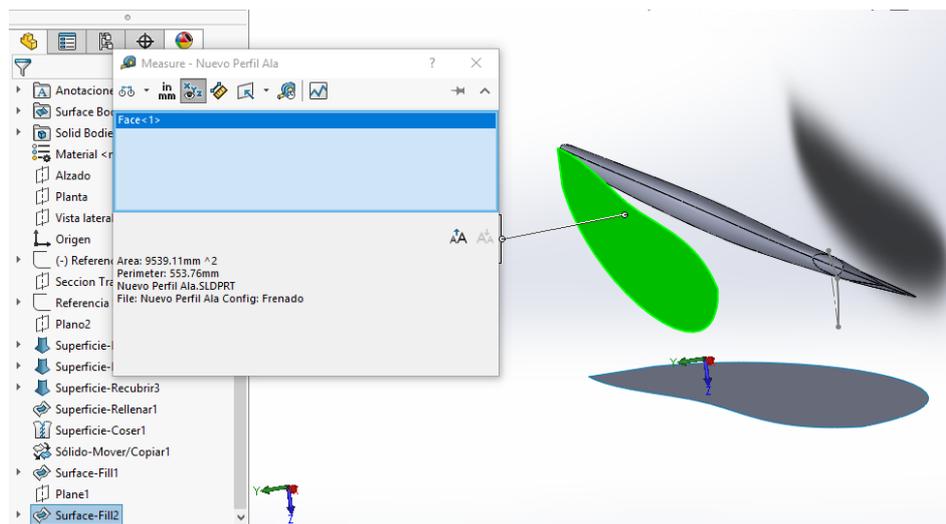


Gráfico 81: CFD, proyección de la superficie utilizada para el CD ángulo 60°

En el gráfico 81 se observan los cálculos obtenidos mediante el uso de las ecuaciones del coeficiente de lift y drag. Para el caso de frenado, es decir cuando el ala tiene una inclinación

de 60° se muestran a continuación el gráfico 64. Se realizó un estudio de las mismas ecuaciones, pero con velocidades diferentes debido al proceso de adaptación que esta tendría desde una velocidad de 7[m/s], 15 [m/s], y 22 [m/s].

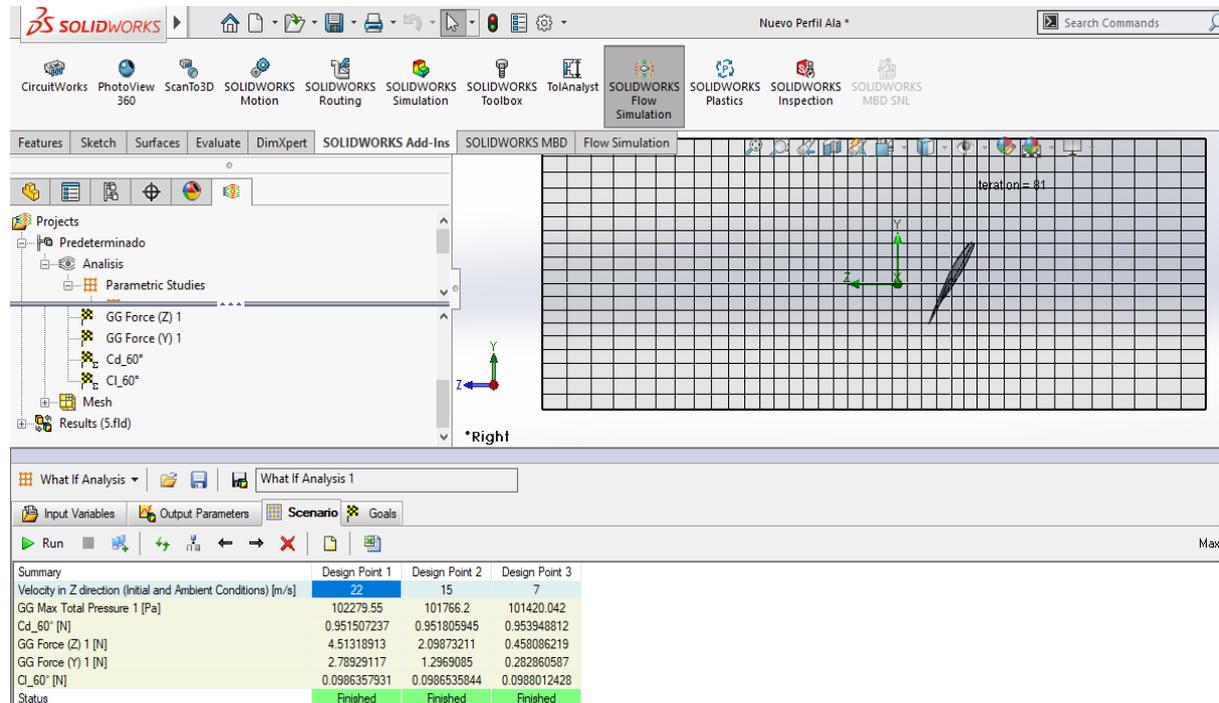


Gráfico 82: Simulación CFD, coeficientes aerodinámicos, perfil a 60°

3.14 Simulación de Elementos finitos aplicando el peso y fuerzas aerodinámicas.

En esta sección se presenta el análisis de elementos finitos con el peso del mecanismo y alas, y las fuerzas aerodinámicas que actúan en los perfiles de vuelo 0° y frenado de 60° . Mediante el uso de elementos finitos se puede determinar el esfuerzo máximo que realizaría la prótesis con el anclaje y ver si este se romperá o tendrá algún tipo de fractura como se observa a continuación en el gráfico 82, donde F_D , es la fuerza de drag es de 0.27, y esta se divide en los puntos donde existe mayor presión como se observó anteriormente en el análisis de CFD.

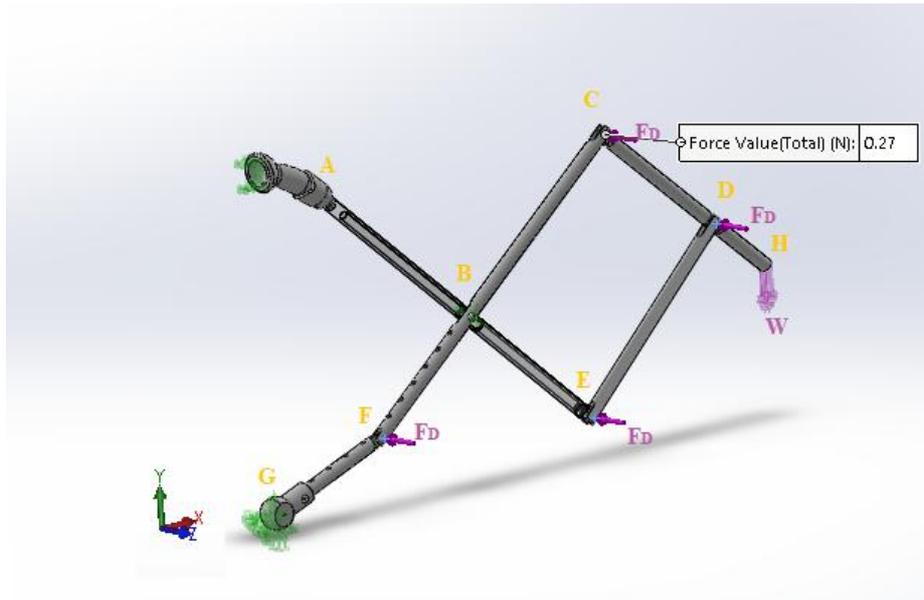


Gráfico 83: Elementos finitos, vuelo 0°

Como se observa en el gráfico 83, el mecanismo tiene un esfuerzo de Von Mises de 11.37 [MPa]. Se observa que donde existe mayor esfuerzo es en la junta B.

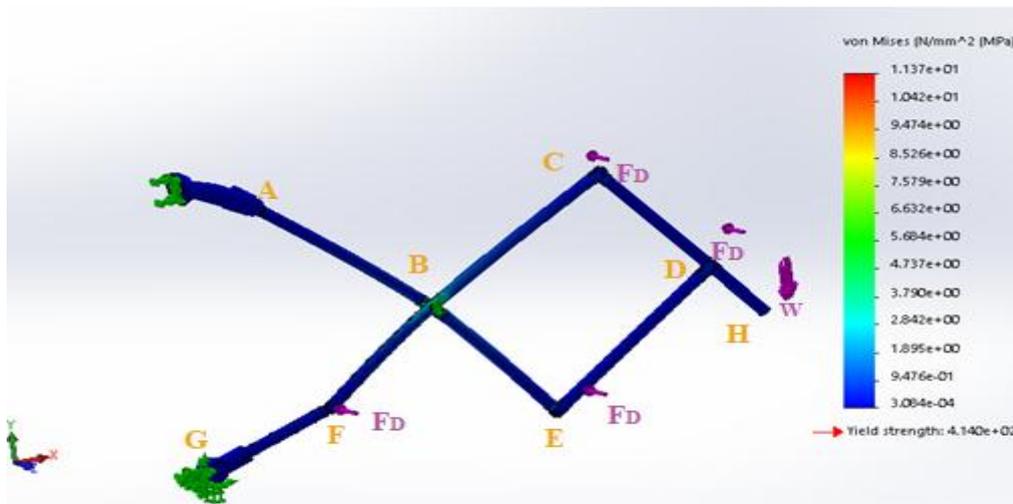


Gráfico 84: Von Mises, vuelo 0°

En el gráfico 84 se presenta el factor de seguridad obtenido al plantear el análisis de elementos finitos en la estructura aplicando el peso y la fuerza de Drag distribuido, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 36.42.

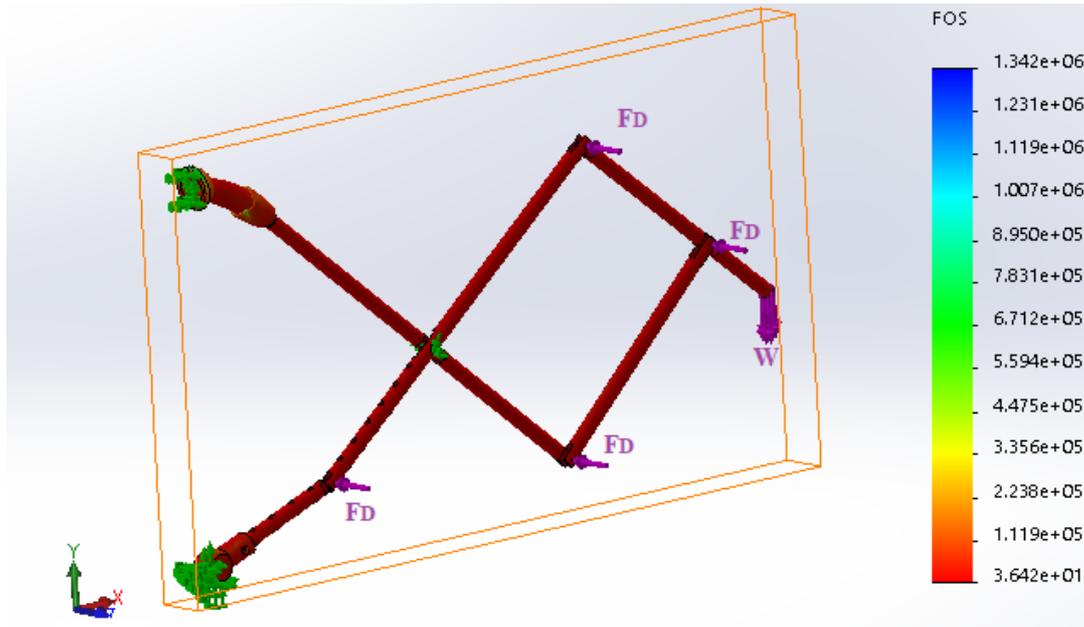


Gráfico 85: Factor mínimo de seguridad, vuelo 0°

En el gráfico 85, se observa el desplazamiento del mecanismo al aplicar estas fuerzas de 3.2[mm], cuando este se encuentra en vuelo con un ángulo de 0°.

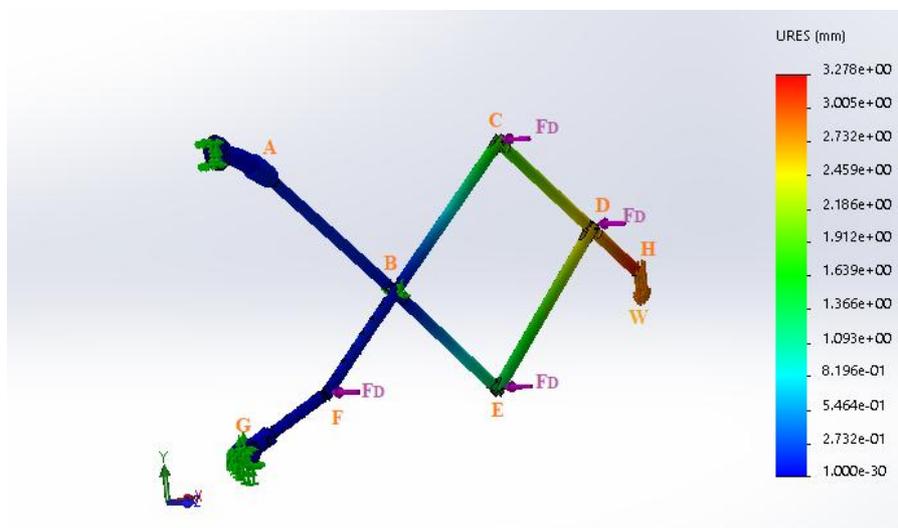


Gráfico 86: Desplazamiento, vuelo 0°

Para el caso de frenado también se utilizó elementos finitos para determinar el esfuerzo máximo que realizaría la prótesis con el anclaje y ver si este se romperá o tendrá algún tipo de fractura como se observa a continuación en el gráfico 86 donde F_D , es la fuerza de drag es

de 0.95. Esta se divide en los puntos donde existe mayor presión como se observó anteriormente en el análisis de CFD.

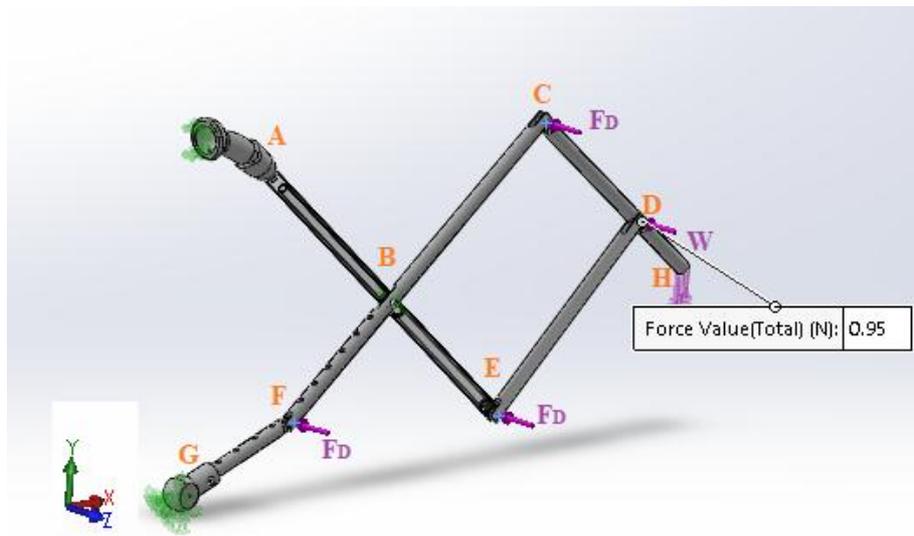


Gráfico 87: Elementos finitos, vuelo 60°

Se observa en el gráfico 87 que el mecanismo tiene un esfuerzo de Von Mises de 23.08 [MPa], y que en la junta B es donde existe mayor esfuerzo.

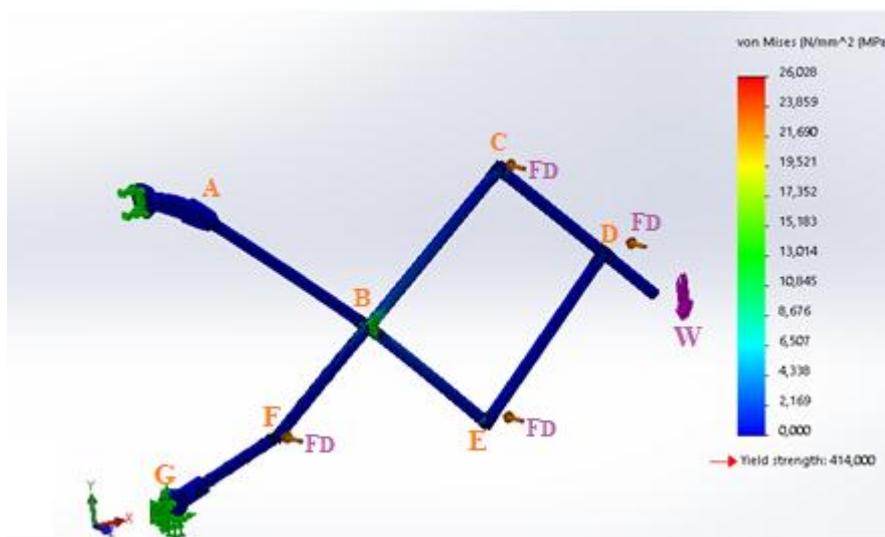


Gráfico 88: Von Mises, vuelo 0°

En el gráfico 88 se presenta el factor de seguridad obtenido al plantear el análisis de elementos finitos en la estructura. Aplicando el peso y la fuerza de Drag distribuido, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 15.91

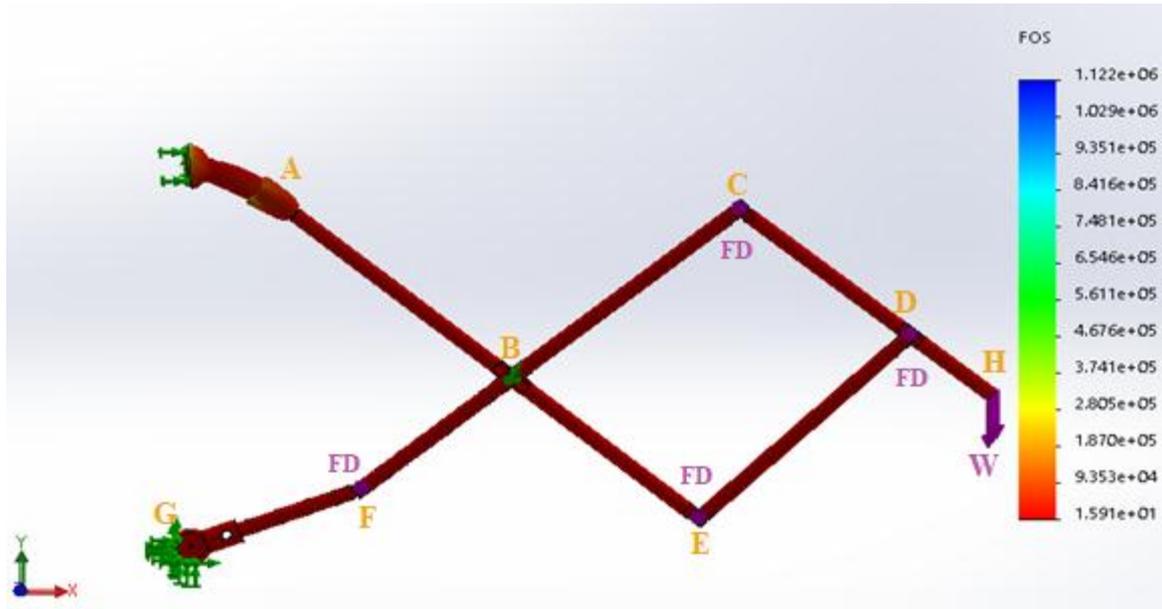


Gráfico 89: Factor mínimo de seguridad, vuelo 0°

En el gráfico 89, se observa el desplazamiento del mecanismo al aplicar estas fuerzas de 7.2[mm]. Cuando este se encuentra en vuelo con un ángulo de 0°, existe un mayor desplazamiento en el punto H, en el caso crítico de la apertura del ala.

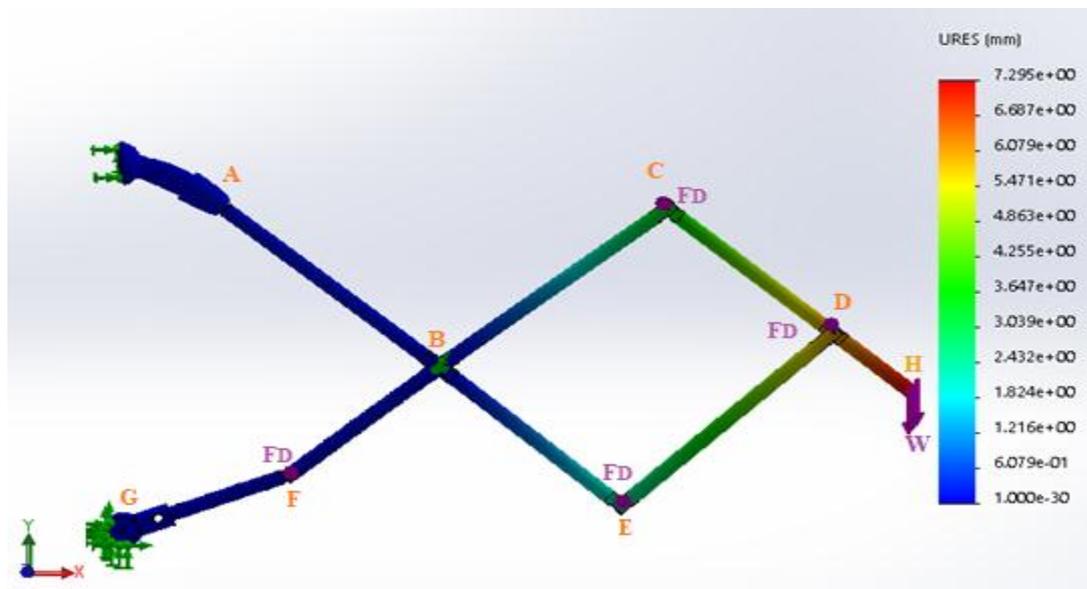


Gráfico 90: Desplazamiento, vuelo 0°

4. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

En este capítulo se detallan los métodos y materiales utilizados para la construcción y el anclaje de la prótesis de ala de una lechuza. Una vez establecido los parámetros de construcción tanto de la prótesis como del anclaje, se procede con los planos para realizar el proceso de manufactura.

Materiales:

- PVC
- Alambre de acero de 1.5[mm] de diámetro
- Plumas de pavo
- Figura de madera de una lechuza.
- Taladro
- Soldadura líquida
- Brocas de esmeril
- Elástico
- Cinta

Proceso de construcción

En base a los planos obtenidos del diseño de la prótesis y del anclaje, se realizó el primer prototipo de balsa. Aquí se obtienen detalles de mejora en la construcción para posteriormente realizarla en PVC. Como se observa en el gráfico 91, los planos utilizados para la construcción se encuentran en la sección de anexos del documento junto con el presupuesto proyectado para la construcción de la prótesis.

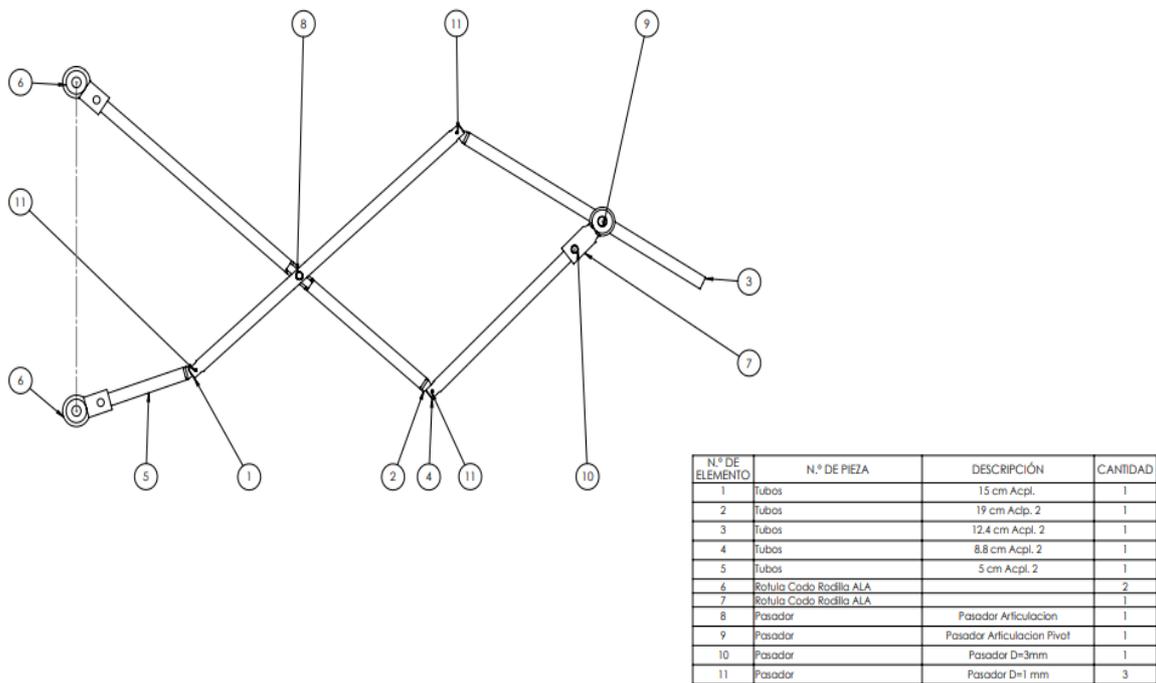


Gráfico 91: Lista de partes de la prótesis

Para realizar los eslabones y las uniones de la prótesis, se procedió a tomar las medidas y los pesos de los pequeños bloques de PVC que se emplean como materia prima. Posteriormente se realizó el molde de las piezas con ayuda de un taladro con un set de brocas de esmeril como se muestra en el gráfico 91.



Gráfico 92: Brocas de esmeril

Una vez moldeadas las piezas, se vuelve a tomar el peso que tienen, ya que es necesario que la prótesis pese 0.25 [kg]. Después se realizan los huecos por donde se harán las uniones como se observa en el gráfico 92. Estas son hechas de alambre ya que se quiere mantener el peso ideal mencionado anteriormente. Posteriormente se realizará el ensamble final de la estructura.



Gráfico 93: Ensamble de la estructura de la prótesis.

Como se menciona en el capítulo 2, el peso de las plumas corresponde a un 52% del peso ideal de la lechuza por lo cual se debe tomar en cuenta tanto el peso como la posición de cada una de ellas para obtener el perfil aerodinámico del ave. Se debe tomar en cuenta que la prótesis tendrá las plumas principales y secundarias que son las más importantes. Para el recubrimiento se utiliza plumón como se observa en el gráfico 93.



Gráfico 94: Plumas primarias, secundarias y plumón.

Para realizar el acople de las plumas al prototipo, se realizaron agujeros por la parte inferior de la estructura donde se establecen las plumas primarias y secundarias. Para fijar el plumón en el ala se utilizó pegante llamado brujita como se observa en el gráfico 94.



Gráfico 95: Anclaje de plumas

Para realizar el anclaje de la prótesis con el hueso, se debe tomar en cuenta el diámetro que este posee y realizar el acople a la medida, de tal manera que este pueda adherirse. El acople de la parte inferior con el mecanismo, se observa en el gráfico 95.

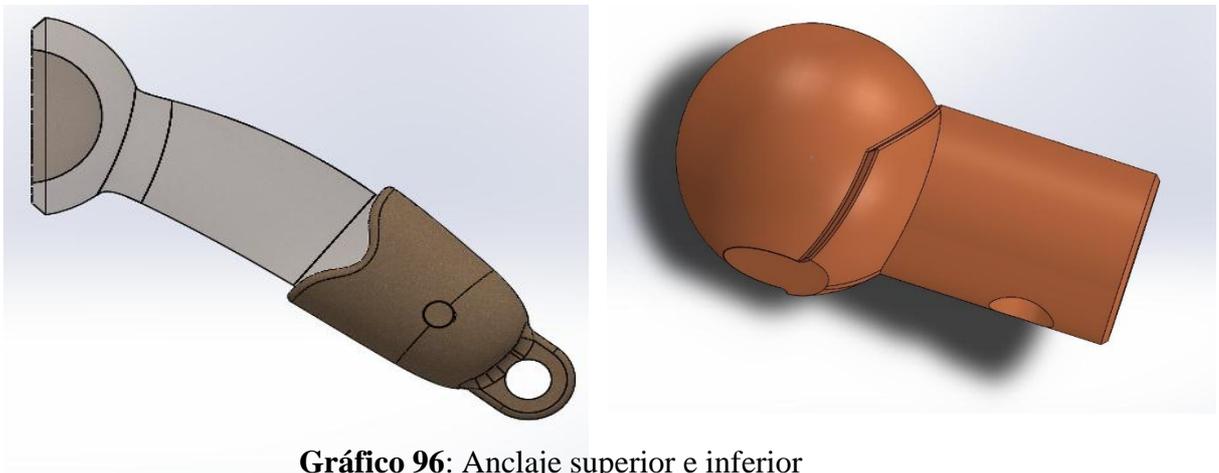


Gráfico 96: Anclaje superior e inferior

Para el proceso de manufactura que se realizó con la prótesis, se tomó en cuenta las características especiales que poseen las plumas como se menciona en el capítulo 2, sección 2.1, en el cual se trata la funcionalidad del vuelo de las aves durante su recorrido descendente. Las paletas internas se presionan hacia los racks rígidos y las paletas externas de las plumas superpuestas, creando un perfil aerodinámico cerrado. Durante la carrera

ascendente, las plumas se separan, permitiendo que el aire fluya entre rémiges a través del ala. Las aves pueden controlar el movimiento de sus plumas al abrir y cerrar el ala, poseen una inclinación aproximada de 25° a 30° como separación entre éstas.



Gráfico 97: Construcción del mecanismo con alas

Como se observa en el gráfico 96, al utilizar las plumas, el mecanismo genera inconvenientes al momento de abrirse y cerrarse. Para un próximo estudio se podría realizar un mecanismo específico para las plumas, con el fin de acoplar este al mecanismo principal del ala.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de los cálculos del análisis de posición, fuerzas, ángulos máximos y mínimos, estudio de la cinemática del movimiento del mecanismo, elementos finitos, esfuerzos máximos normales, torsión, factor de seguridad, el análisis estático del ala desde la vista superior y del eslabón que posee mayor fuerza y el estudio del perfil del ala en CFD.

5.1 Fuerzas resultantes del mecanismo

Las reacciones obtenidas son las fuerzas aplicadas tanto en el eje x como en el eje y. En la gráfica 97 se observan las fuerzas resultantes aplicadas en cada punto del mecanismo. Se aplicó este análisis para el punto más crítico, es decir, cuando el mecanismo está abierto, ya que se quiere determinar el esfuerzo que genera las cargas aplicadas en cada uno de las juntas. Se obtuvo un factor de seguridad de 32, factor que resulta ser alto debido a la resistencia y propiedades mecánicas que posee el material utilizado que es el PVC, esto quiere decir que la prótesis es resistente a la fractura.

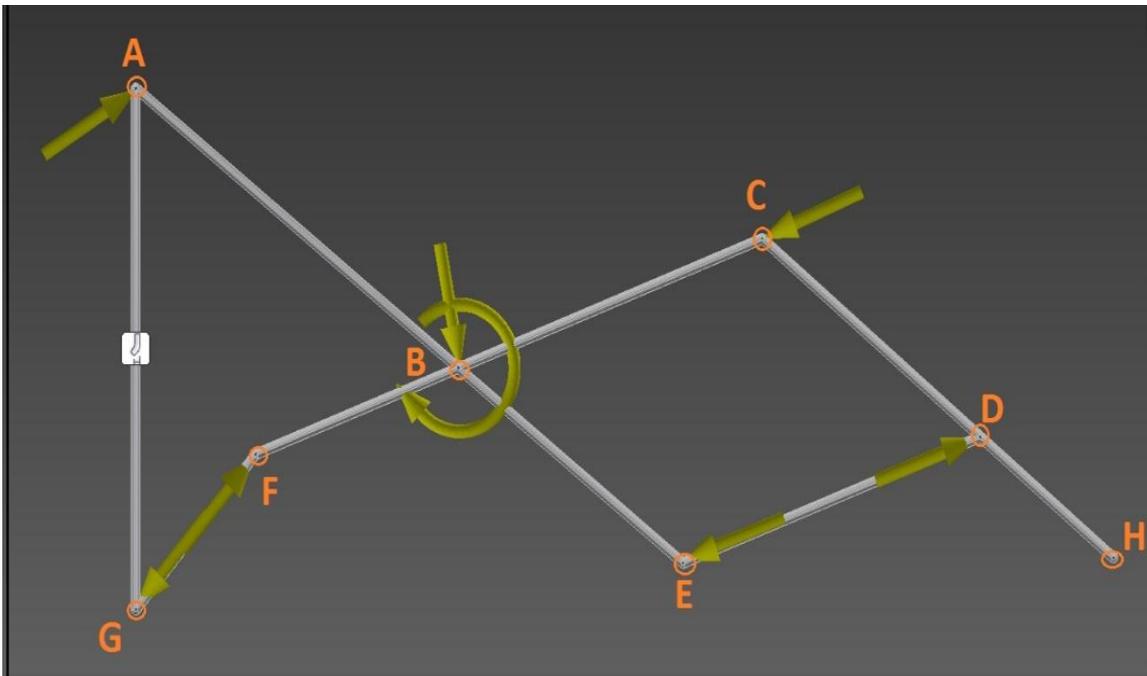


Gráfico 98: Fuerzas aplicadas en cada punto

En el gráfico 98 se observa la distribución de fuerza que existe en cada una de las uniones con la posición respecto al análisis de fuerzas del mecanismo que se realiza anteriormente de la apertura del ala.

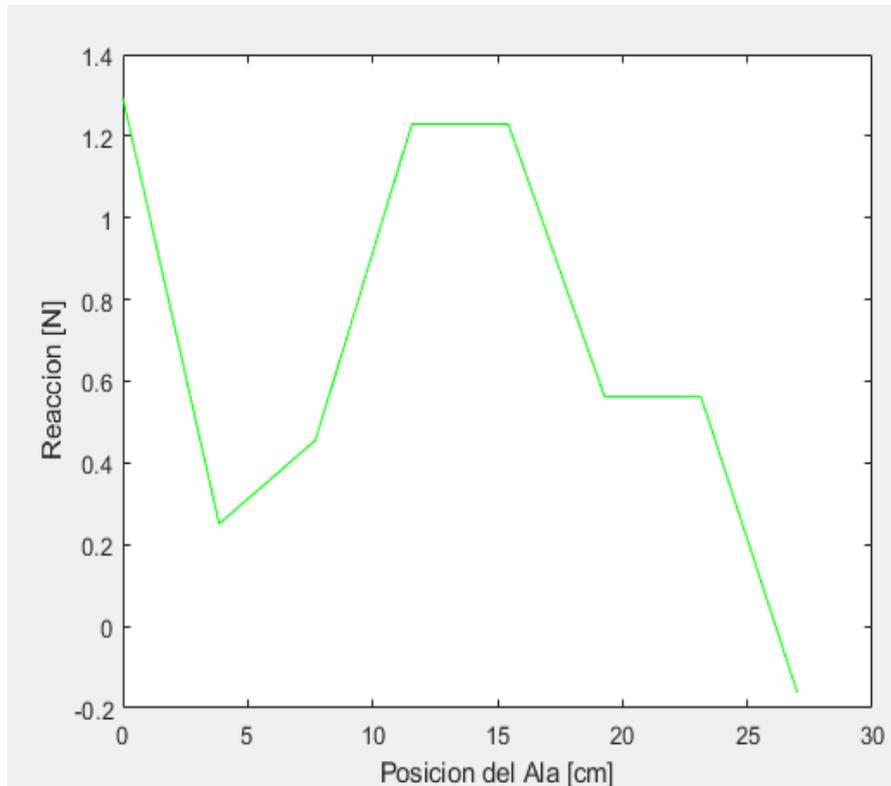


Gráfico 99: Distribución de fuerzas en el ala, ángulos máximos.

Con las ecuaciones obtenidas en el análisis de fuerzas del mecanismo se puede conseguir los ángulos y la posición mínima del ala con respecto a las reacciones generadas del mecanismo como se observa en el gráfico 98.

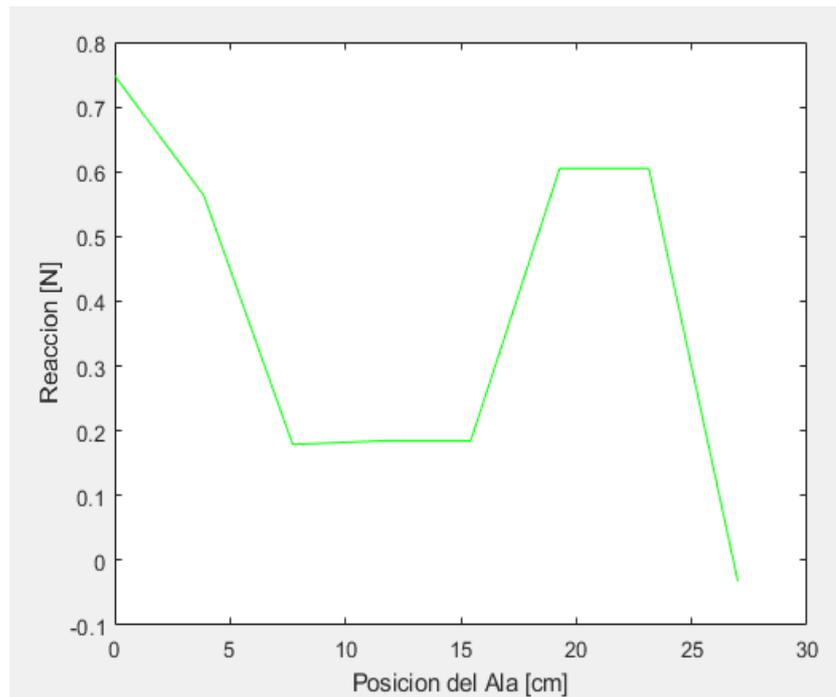


Gráfico 100: Distribución de fuerzas en el ala, ángulos mínimos.

5.2 Resultados de elementos finitos.

En el estudio de elementos finitos con estructura CAD de la prótesis, se realizó un mallado de dos sólidos a lo largo de toda la estructura. Se pusieron restricciones en las partes fijas del mecanismo y en las juntas, es necesario que exista movimiento entre los eslabones y la unión ya que el mecanismo posee un grado de libertad que es la apertura y cierre del ala, como se observa a continuación en el gráfico 100. Mediante la comparación de FEA y los cálculos realizados a mano se puede observar que existen errores mínimos.

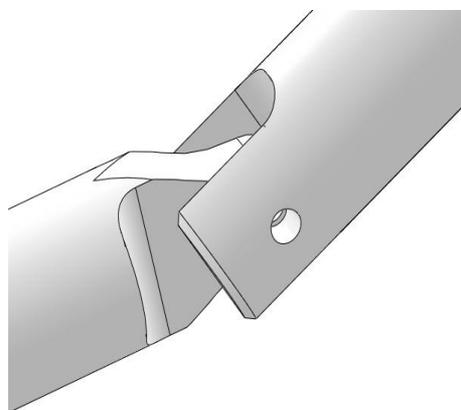


Gráfico 101: Unión de Codo

5.3 Resultados de CFD.

En el gráfico 101 se puede observar el perfil obtenido en 3D del ala de la lechuza, en base al estudio mencionado en el capítulo 2 en la sección 2.3.9 en el cual realizamos el estudio de CFD para los casos más críticos en el vuelo de una lechuza que son la velocidad máxima y el frenado. Esta prueba se realizó porque el animal no se encontraba en las condiciones médicas adecuadas para la adaptación de la lechuza con la prótesis.

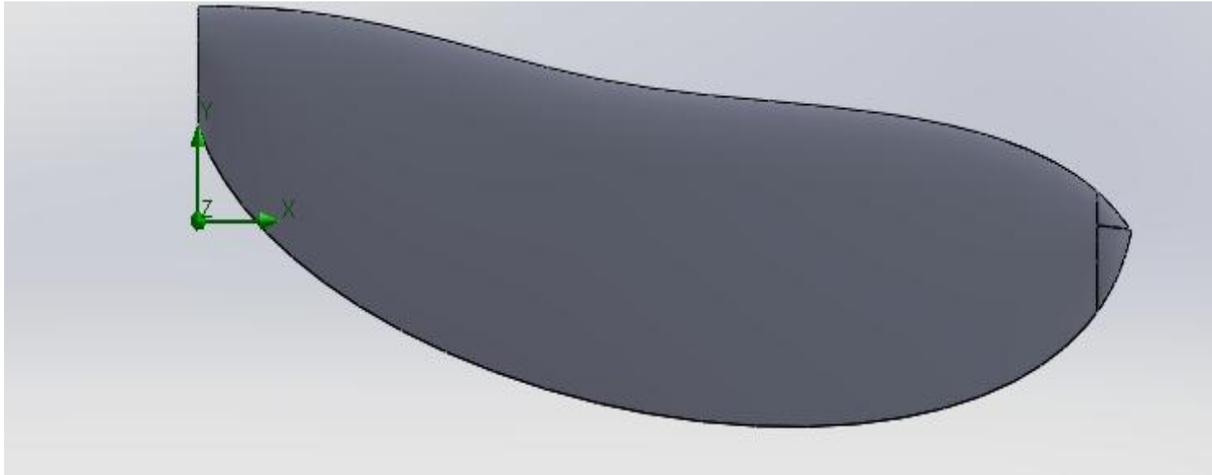


Gráfico 102: Perfil de ala 3D

Se establecieron dos análisis para la velocidad máxima y el frenado del ave con los parámetros establecidos en el capítulo de diseño. En la Tabla 11 se presentan los valores obtenidos de los coeficientes de lift y drag y las fuerzas para cada uno de los casos estudiados de ángulo de 0° velocidad máxima.

Tabla 12: Resultados coeficiente de lift y drag con variación de velocidades.

CFD RESULTADOS VUELO ÁNGULO 0°				
Variables	Unidades	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Velocidad	[m/s]	22	15	7
Fuerza de Drag	[N]	0.270	0.128	0.030
Fuerza de Lift	[N]	0.523	0.241	0.052
Cd	[N]	0.872	0.193	0.010
Cl	[N]	0.093	0.092	0.091

En la Tabla 11 se pueden observar los resultados de CFD de la velocidad máxima del ave a 0° con distintas velocidades para determinar los coeficientes desde una velocidad mínima de 7 [m/s], una intermedia de 15 [m/s] y una velocidad máxima de 22 [m/s] ya que estas podrían ser las velocidades a las que podría volar la lechuza con la prótesis. Las fuerzas de drag, lift y sus respectivos coeficientes tienen una variación de incremento de un 52,9 % en los casos 1, 2 y 3; esto se debe al ángulo en el que se encuentra el perfil y como actúa el viento y las fuerzas aerodinámicas. A continuación, se observan los gráficos 102, 103 y 104 de la distribución de velocidad de cada uno de los casos:

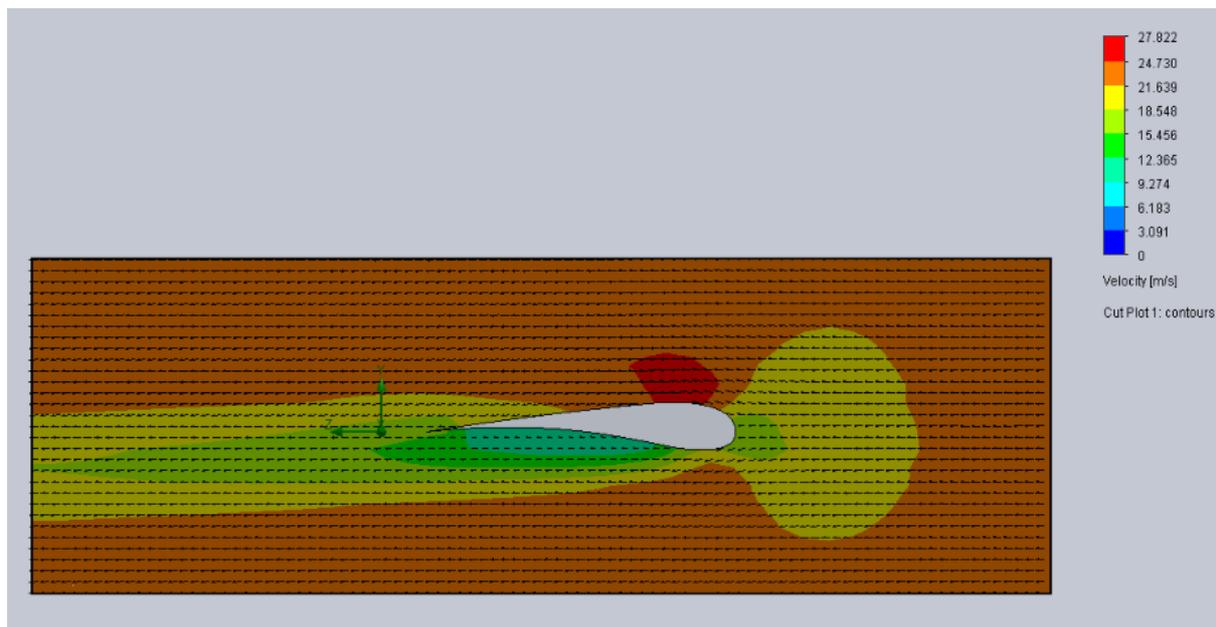


Gráfico 103: Caso 1 CFD 0° con una velocidad de 22[m/s]

En el gráfico 102 se observa el CFD de la velocidad máxima del vuelo de una lechuza de 22[m/s], donde se puede ver que hay un aumento de velocidad entre 25 [m/s] a 27.8[m/s] en la parte superior del ala y en la parte de la cola una disminución de velocidad entre 18.54 [m/s] y 9[m/s]. En el frente del ala la velocidad baja aproximadamente entre 18[m/s] y 12[m/s].

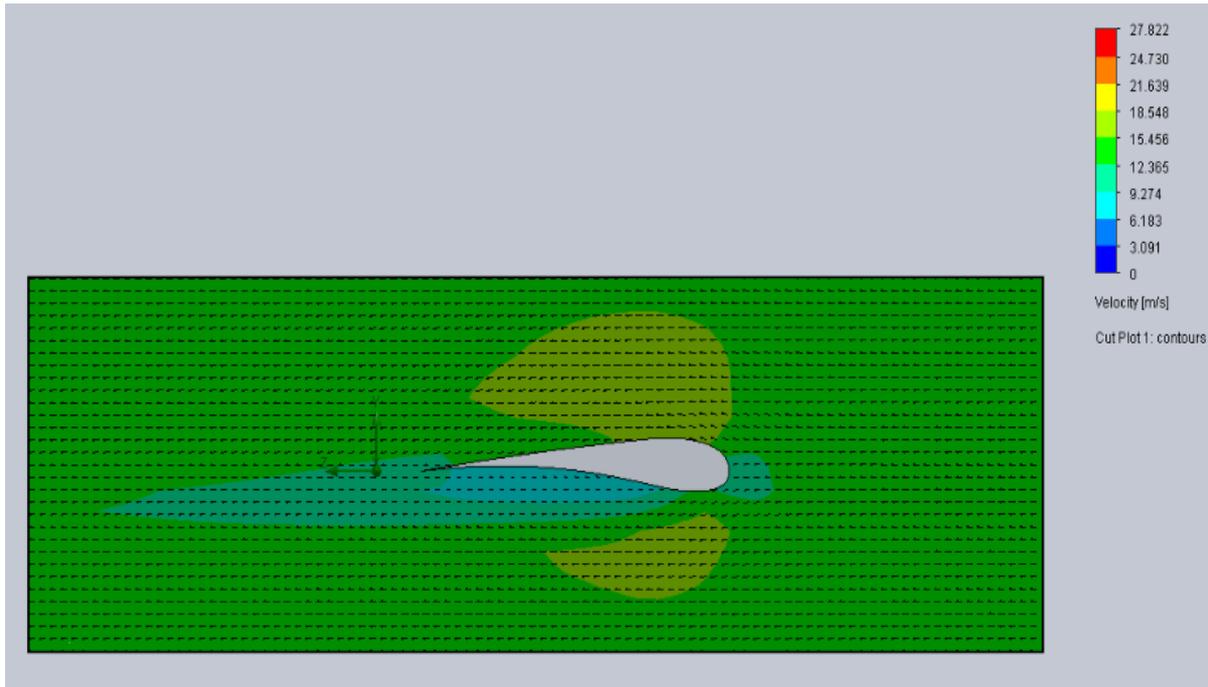


Gráfico 104: Caso 2 CFD 0° con una velocidad de 15[m/s]

En el gráfico 103 se observa que en el caso 2 existe un incremento de velocidad en la parte superior inferior del ala de un 33% aproximadamente y en medio de esta hay una disminución de velocidad de 9[m/s].

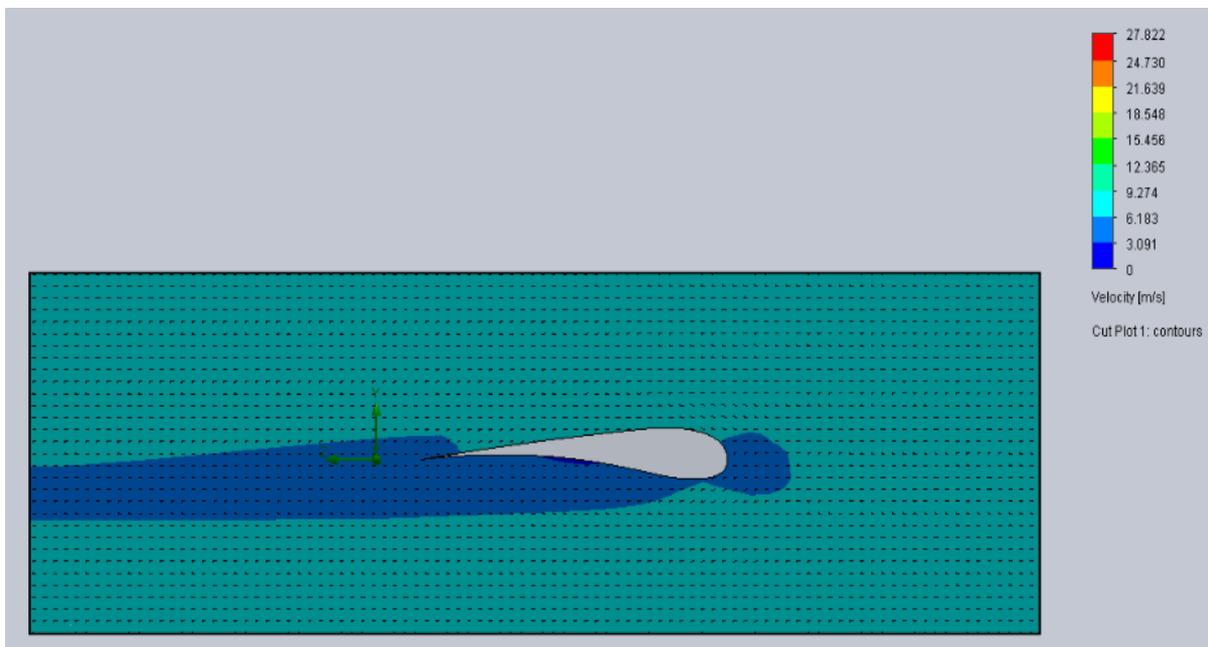


Gráfico 105: Caso 3 CFD 0° con una velocidad de 7 [m/s]

En el gráfico 104 se puede observar que el ave no puede volar a una velocidad de 7[m/s], por lo cual esta se mantiene en tierra.

A continuación, se presenta la Tabla 12 con un resumen de los resultados obtenidos en el estudio de CFD en el frenado de vuelo a 60° , utilizando tres tipos de velocidades.

Tabla 13: Resultados coeficiente de lift y drag con variación de velocidades

CFD RESULTADOS VUELO ÁNGULO 60°				
Variab les	Unidades	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Velocidad	[m/s]	22	15	7
Presión Max.	[Pa]	102279.5	101766.2	101420.0
Fuerza de Drag	[N]	0.9515	0.9518	0.9539
Fuerza de Lift	[N]	4.51	2.09	0.45
Cd	[N]	2.78	1.29	0.28
Cl	[N]	0.09863	0.0986	0.0988

En la Tabla 12 se puede observar los resultados de CFD del frenado del ave a 60° , con distintas velocidades, ya que se quiere determinar los coeficientes desde una velocidad mínima de 7[m/s], una intermedia de 15 [m/s] y una velocidad máxima de 22 [m/s]. Se puede determinar que la presión máxima en los tres casos varía 0.5% entre las velocidades de 22[m/s], 0.34% entre 15 [m/s] y 7[m/s] y entre las velocidades de 22[m/s] y 7[m/s] una variación de 0.8%. La fuerza de drag tiene una ligera variación en los tres casos. La fuerza de lift tiene una variación significativa, esto se debe a la velocidad de cada uno de los casos. Esto se da debido a que esta fuerza se encuentra perpendicular a la velocidad del perfil y al ángulo de 60° . El coeficiente de drag depende de la velocidad, éste varía en un 53% entre los tres casos.

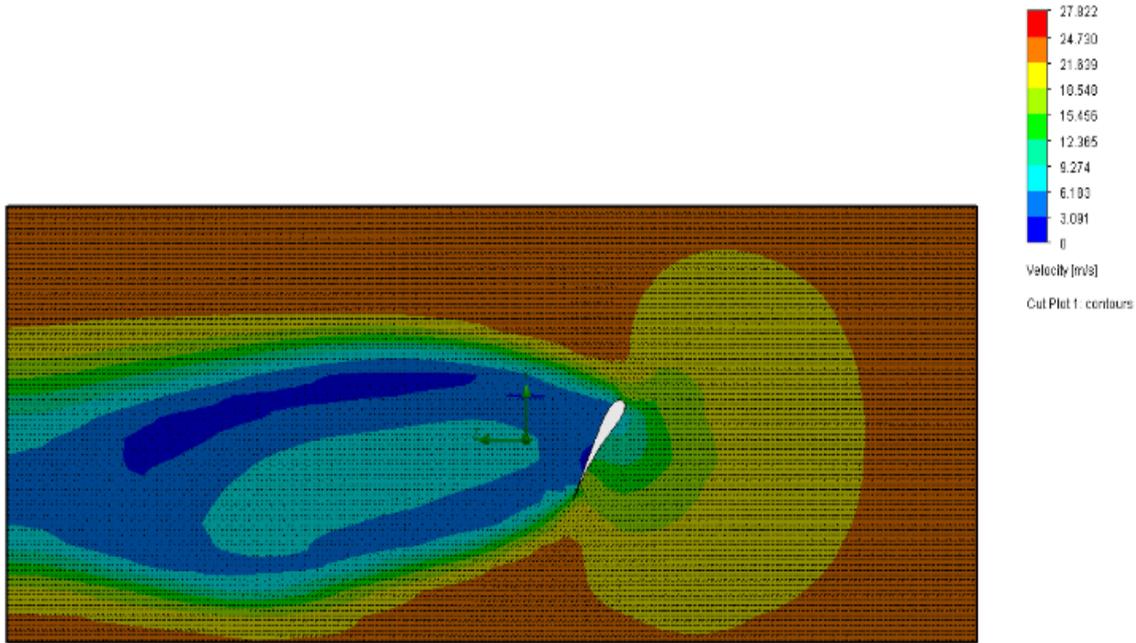


Gráfico 106: Caso 1 CFD 60° con una velocidad de 22[m/s]

En el gráfico 105 del CFD, se aprecia que al momento de frenado con un ángulo de 60° y a velocidad máxima de 22[m/s], éste empieza a bajar entre 21.82[m/s] a 6,10[m/s]. En la parte trasera del ala tiene una disminución de velocidad mayor al comparar con lo que sucede al frente del ala. Esto se debe al cambio de velocidad que existe al momento de frenado.

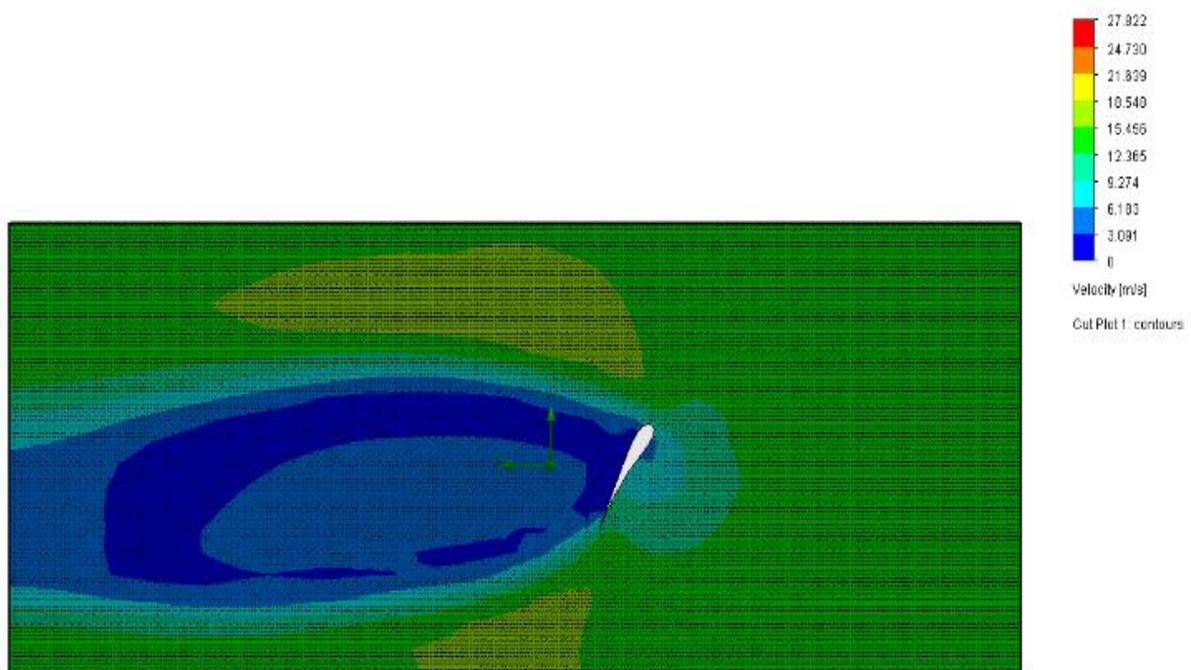


Gráfico 107: Caso 1 CFD 60° con una velocidad de 15[m/s]

En el gráfico 106 se puede determinar que en base a los colores la velocidad de frenado se encuentra en un rango de 10.54 [m/s] y de 3.09 a 0 [m/s]. Como se puede observar en la parte delantera del perfil, la velocidad empieza a disminuir debido al cambio de dirección, y la parte trasera del ala disminuye hasta llegar a cero.

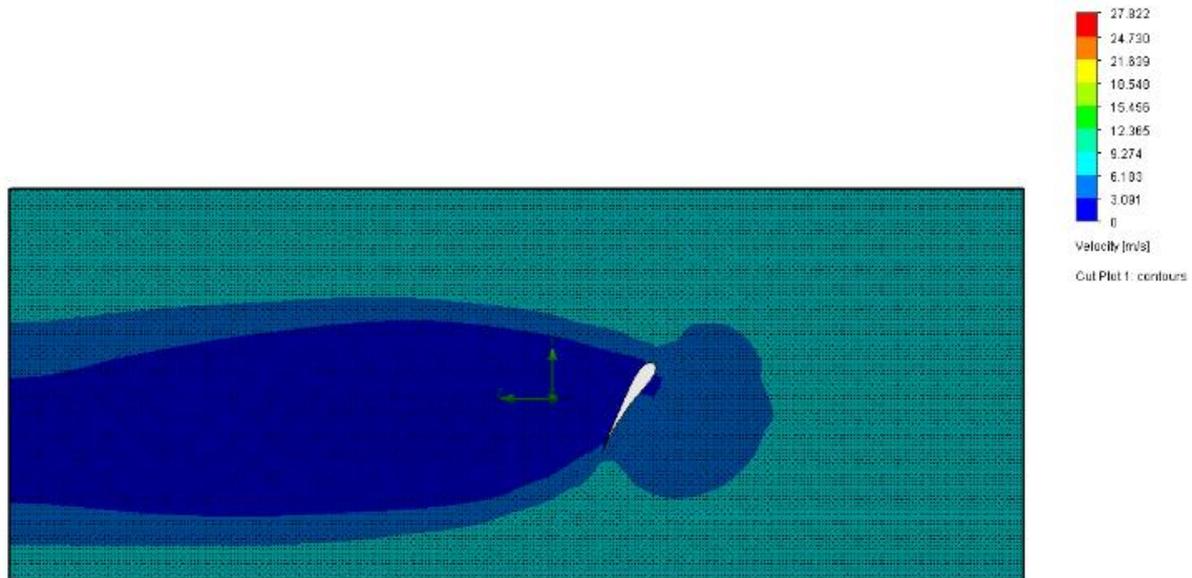


Gráfico 108: Caso 1 CFD 60° con una velocidad de 7[m/s]

En el gráfico 107 se observa como la velocidad disminuye al momento del contacto del perfil con el aire en la parte delantera, y como la velocidad va disminuyendo en la parte trasera del perfil hasta llegar a cero. Por ende, se puede decir que a una velocidad de 7[m/s], el ave tiene un frenado completo.

5.4 Apertura, cierre y aleteo del mecanismo.

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos en la simulación de elementos finitos aplicando el peso y la distribución de fuerzas de drag con una velocidad máxima de 22 [m/s], en los 3 escenarios estudiados:

Tabla 14: Resultados obtenidos

Escenarios	Esfuerzo de Von Mises (Máximo)	Factor de seguridad mínimo
Caso Estático	9.82 [MPa]	45
Vuelo 0°	11.37 [MPa]	36
Frenado 60°	26 [MPa]	16

En los escenarios presentados se logra una comparación en el cual: en el caso estático el esfuerzo que se realiza en la prótesis es de 9.28[MPa], se aplicó el peso del mecanismo de 0.25[N] y el factor de seguridad es alto de 45; en el escenario de vuelo a 0°, se aplicó la fuerza de drag de 0.95[N], distribuida en puntos donde existe mayor presión dado por el estudio de CFD y el mismo peso del mecanismo 0.25[N], obteniendo un esfuerzo mayor que el caso estático de 11.37 y un factor de seguridad menor de 36; en el último caso de frenado a 60°, se aplicó una fuerza de drag de 0.27[N], dividida para los puntos de mayor presión y el peso de 0.25[N]. En el gráfico 108 se observa al mecanismo con el perfil de ala en una posición extendida del gráfico en 3D.

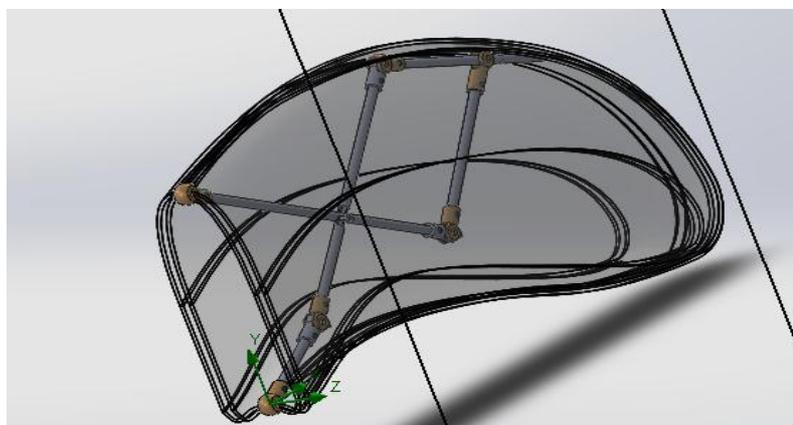


Gráfico 109: Perfil de ala y mecanismo de ala

En el gráfico 109 se observa la apertura y el cierre del mecanismo en la simulación del movimiento y el aleteo que posee el mismo con el acople. Se utilizó la herramienta de control de relación de posición. En la apertura existen dos referencias de posición de la pieza.

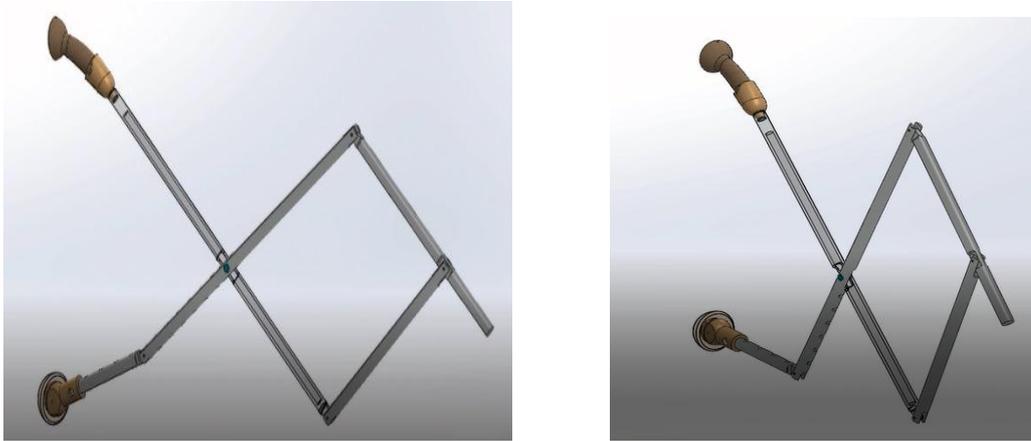


Gráfico 110: Apertura y cierre del mecanismo con acople.

En el gráfico 110 se observa el mecanismo de aleteo del ala, para esto se realizó un control de posiciones en el cual se crearon dos planos, uno en la parte horizontal y otro en la parte vertical inferior para que este pueda dar movilidad al aleteo. Se realizó el movimiento de los componentes detectando las condiciones angulares del movimiento.



Gráfico 111: Aleteo del mecanismo con acople

En el presente trabajo se realizaron varias modificaciones para los acoples de la parte superior e inferior de la prótesis. Estos cambios ocurrieron en el proceso de manufactura. En los gráficos 111 y 112 se presentan los cambios que se han dado en el diseño del mecanismo con el fin de realizar los movimientos necesarios para el aleteo, apertura y cierre.

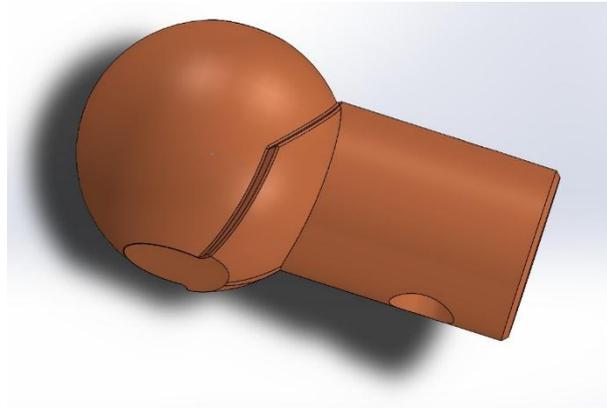


Gráfico 112: Acople con topes

En el gráfico 112 se presenta al acople con modificaciones, basado en el acople con topes. Se realiza esta mejora con el fin de obtener un acople simple y de una sola pieza. Este modelo está basado en los juguetes de acción, y el acople de plumas se basa en la anatomía de un ave.



Gráfico 113: Acoples con la lechuza

En el gráfico 113 se observa la construcción final del mecanismo con el acople de la prótesis y la adaptación de las plumas principales, secundarias y el plumón de recubrimiento con el peso establecido en los cálculos de $0.25[N]$.



Gráfico 114: Construcción final

6. CONCLUSIONES

A través del presente trabajo de titulación se demuestra el uso de mecanismos y principios de anatomía aplicados en una prótesis bio-mecánica para mejorar la calidad de vida una lechuza, a través del manejo de cálculos, simulaciones y manufactura.

Al realizar el prototipo de prótesis del ala y la movilidad del mecanismo, al poseer un grado de libertad, permitió realizar un mecanismo simple que se acople con los parámetros establecidos.

Con el análisis de posición del mecanismo, se pudo determinar los ángulos máximos y mínimos que este debería tener, para evitar que la estructura del mecanismo se deforme tanto al estirarse como al contraerse y se pudo comparar con el programa SolidWorks.

Mediante la aplicación de conocimientos de Mecanismos, Diseño Mecánico, Estática, Mecánica de Materiales y Aerodinámica, se pudo calcular las cargas a las cuales está sometida la prótesis y en base a estos cálculos se pudo determinar el peso del mecanismo y el peso del plumaje que debe poseer la prótesis.

El factor de seguridad que se obtuvo en el análisis de esfuerzos respecto al material, nos da valores similares tanto en el cálculo manual como en el de elementos finitos, mismos que son altos, por lo cual se concluye que la falla del mecanismo depende más de la construcción del mismo que de los cálculos realizados.

En el estudio de CFD se presentan dos casos del perfil aerodinámico de la lechuza en los cuales se observa la presión que ejerce el ala al momento de su vuelo máximo a 0° y al frenado del ave a 60° donde existe una mayor presión.

7. RECOMENDACIONES

En el proceso de manufactura se observan los detalles necesarios para la construcción y mejora de la prótesis, ya que se pretende tener un buen apriete y juego de apertura, cierre y aleteo del mecanismo. Estas piezas se van moldeando y mejorando en este proceso.

La construcción del mecanismo se realizó manualmente ya que los diámetros de los huesos son pequeños como para realizar una impresión 3D.

En este proceso se debería crear un mecanismo para las plumas, ya que poseen movimientos al abrirse y cerrarse el ala y para que no exista ningún roce entre plumas. Para trabajos futuros, se pretende crear un mecanismo tipo abanico, el cual permita esta apertura y cierre sin crear fricciones o molestias en el uso de la prótesis.

El presente trabajo de titulación puede servir como base para estudios futuros para la implementación de prótesis bio-mecánicas, con una mejora del tipo de material, dando mayores grados de libertad al mecanismo para que este pueda rotar.

Con el estudio del vuelo silencioso que poseen estos animales se puede aportar a la rama aeroespacial.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Physical Therapy Association. (7 de Febrero de 2014). *Physical Therapist's Guide to Above-Knee Amputation*. Obtenido el 20 de julio del 2018 <https://www.moveforwardpt.com/symptomsconditionsdetail.aspx?cid=7e9549ef-0bff-4b50-88f1-8a8bf4f1e496#.VohMjOAo7qB>

Bachmann, T., Klän, S., Baumgartner, W., Klaas, M., Schröder, W., & Wagner, H. (2007). Morphometric characterisation of wing feathers of the barn owl *Tyto alba pratincola* and the pigeon *Columba livia*. *Frontiers in Zoology*, 4, 1–15. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-4-23>

Beschizza, R. (07 de 02 de 2007). Obtenido de Mechanical Fingers Give Strength, Speed to Amputees. Obtenido el 20 de julio del 2018 de <https://www.wired.com/2007/07/mechanical-fingers-give-strength-speed-to-amputees/>

Chen, K., Liu, Q., Liao, G., Yang, Y., Ren, L., Yang, H., & Chen, X. (2012). The Sound Suppression Characteristics of Wing Feather of Owl (*Bubo bubo*). *Journal of Bionic Engineering*, 9(2), 192–199. [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(11\)60109-1](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(11)60109-1)

Christina, E. (2017). Esqueleto búho: características estructurales. La aparición de un búho. *Nextews*.

Christiansen, S. (2005). Then and Now. *Prosthetic leg*. Clarkston ,Utah. Obtenido de Then and Know.

Colodrero, J. R. (01 de 08 de 2009). *Aves*. Lechuza De Campanario (*Tyto Alba*). Obtenido el 28 de febrero del 2018 de https://www.fotonaturaleza.cl/details.php?image_id=1829

Corporation, S. (n.d.). Comprender la simulación de movimiento. *Cosmos*.

Flynn, L., Geeroms, J., Jimenez-fabian, R., Vanderborcht, B., Vitiello, N., & Lefeber, D. (2015). Ankle – knee prosthesis with active ankle and energy transfer : Development of the CYBERLEGS Alpha-Prosthesis ☆. *Robotics and Autonomous Systems*, 73, 4–15.

Ge, C., Ren, L., Liang, P., Zhang, C., & Zhang, Z. (2013). High-Lift Effect of Bionic Slat Based on Owl Wing. *Journal of Bionic Engineering*, 10(4), 456–463.

Gil, F. (2011). Anatomía específica de aves: Aspectos funcionales y clínicos. *Universidad Docente de Anatomía y Embriología.*, 1–17.

Gobierno de la República del Ecuador. (11 de 09 de 2017). *Ministerio de Turismo.*

Liu, D., Hua, Z., Yan, X., & Jin, Z. (2016). Design and biomechanical study of a novel adjustable hemipelvic prosthesis. *Medical Engineering and Physics*, 38(12), 1416–1425.

Kln, S., Burgmann, S., Bachmann, T., Klaas, M., Wagner, H., & Schrder, W. (2012). Surface structure and dimensional effects on the aerodynamics of an owl-based wing model. *European Journal of Mechanics, B/Fluids*, 33, 58–73.

Liu, D., Hua, Z., Yan, X., & Jin, Z. (2016). Design and biomechanical study of a novel adjustable hemipelvic prosthesis. *Medical Engineering and Physics*, 38(12), 1416–1425. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.09.017>

Marín, E. R. (2017). *Portafolio*. Obtenido de <http://eduardo-rodriguez-m8.wix.com/ilustracionesedu#!portafolio>

Navarro, A. (29 de Septiembre de 2016). *Cinemática de Sólidos*. Obtenido de <http://cinematicadesoli2blog.blogspot.com/>

Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria. Síntesis y Análisis de máquinas y mecanismos*. (R. L. Norton, Ed.) (Cuarta). Massachusetts: Mc Graw Hill. Retrieved from www.FreeLibros.me

O'Malley, B., Laborda Val, J., Gil García, J. and Catalan i Bravo, R. (2009). Anatomía y fisiología clínicadeanimalexóticos.Zaragoza(España):Servet.RedacciónMedioAmbiente e.(2015).Eldesconocidomundodelasprótesisparaanimales.*ELEspectador/MedioAmbiente* ,60,61.Obtenidode<https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/el-desconocido-mundo-de-protesis-animales-articulo-608093>

Rodriguez,R.(2006).LosAéreos.*Animals.z* Sagar, P., Teotia, P., Sahlot, A. D., & Thakur, H. C. (2017). An analysis of silent flight ofowl.*MaterialsToday:Proceedings*,4(8),85718575.<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.204>

Shigley, J. E. (2001). *Teoría de Máquinas y Mecanismos*.

Smith, S. A., & Smith, B. J. (1991). Normal Xeroradiographic and Radiographic Anatomy of the Great Horned Owl (*Bubo Virginianus*), With Special Reference To the Barn Owl (*Tyto Alba*). *Veterinary Radiology*, 32(1), 6–16.
<https://doi.org/10.1111/j.1740-8261.1991.tb00075.x>

Sobachkin, A., Dumnov, G., & Sobachkin, A. (2014). Base numérica de CFD integrada en CAD. Informe Técnico. *SolidWorks*.

SolidWorks. (2008). Understanding Motion Simulation, 16.

SolidWorks Corp. (2012). CFD en Diseños Reales. *Ingeniería Química*, 12. Retrieved from <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/299-el-papel-de-las-enzimas-en-los-detergentes>

Stokes, J. (10 de Junio de 2016). *What Do Airplane Winglets Do?* Obtenido de ANSYS: <https://www.ansys-blog.com/what-do-airplane-winglets-do/>

Shyamal, L. S. (29 de Diciembre de 2007). *Estructura occipital de un ala de pájaro*. Obtenido de https://Archivo:Birdwing_es2.svg

Trail, P. W. (2001). Wing Feathers. *National Fish and Wildlife Forensics Laboratoy*, 1–10.

Weger, M., & Wagner, H. (2017). Distribution of the characteristics of barbs and barbules on barn owl wing feathers. *Journal of Anatomy*, 230(5), 734–742.
<https://doi.org/10.1111/joa.12595>

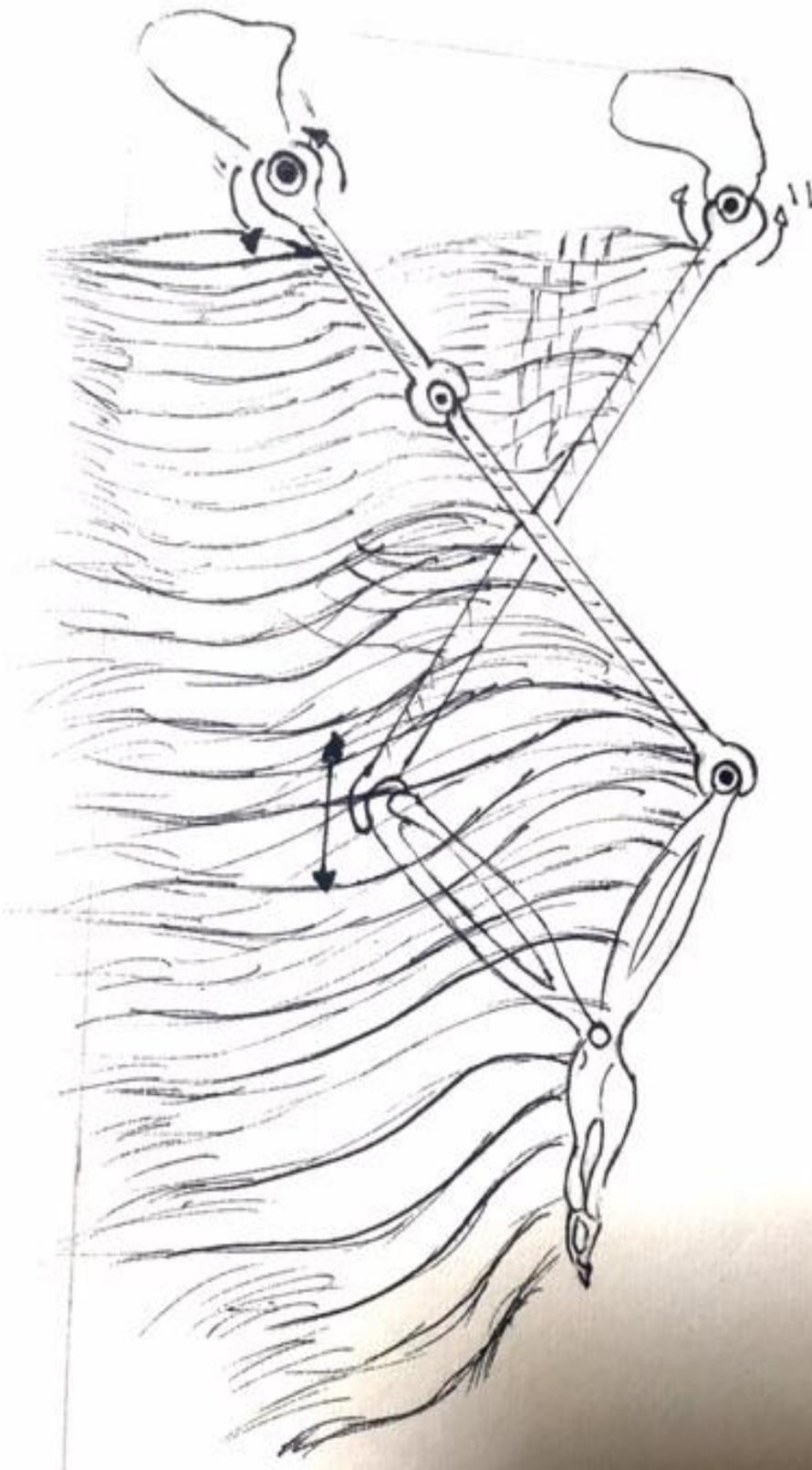
8. ANEXOS

8.1 Presupuesto de la construcción de la prótesis

En la tabla 14 se presenta el detalle de los costos de los materiales utilizados en la construcción de la prótesis para la lechuza.

Tabla 14: Costos construcción de prótesis

Costo prótesis para una lechuza			
Nombre	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Suelda líquida	4	9,5	38
Cinta	1	2	2
resorte	1	2	2
PVC , materia prima	1	30	30
Alambre (1,44mm diámetro)	1	1	1
maderas soporte	3	1,25	3,75
pintura	1	10	10
Impresión 3D	3	6	18
Pavo (plumas)	1	35	35
Figura de lechuza	1	45	45
Pegamento brujita	10	3,5	35
			219,75
Total [USD]:			





Ala Lechuza

Maximos

$$m = 3(n-1) - 2j_1 - 3j_2$$

$$= 3(6-1) - 2(7) - 0$$

$$m = 1$$

Análisis Posición:

$$R_{Ag} + R_{Bb} + R_{Fb} + R_{Gf} = 0$$

Real

$$R_{Ag} \cos \theta_{Ag} + R_{Bb} \cos \theta_{Bb} + R_{Fb} \cos \theta_{Fb} + R_{Gf} \cos \theta_{Gf} = 0$$

$$12,5 \cos(90^\circ) + 11,20 \cos \theta_{Bb} + 6 \cos \theta_{Fb} + 5 \cos(98,15^\circ) = 0$$

$$-11,20 \cos \theta_{Bb} = 3,335 + 6 \cos \theta_{Fb} \quad (1)$$

Imaginario

$$R_{Ag} \sin \theta_{Ag} + R_{Bb} \sin \theta_{Bb} + R_{Fb} \sin \theta_{Fb} + R_{Gf} \sin \theta_{Gf} = 0$$

$$12,5 \sin(90^\circ) + 11,20 \sin \theta_{Bb} + 6 \sin \theta_{Fb} + 5 \sin(98,15^\circ) = 0$$

$$12,5 + 11,20 \sin \theta_{Bb} + 6 \sin \theta_{Fb} + 3,72 = 0$$

$$-11,20 \sin \theta_{Bb} = 16,22 + 6 \sin \theta_{Fb} \quad (2)$$

se elevan al cuadrado ($x^2 + y^2$)

$$(11,20 \cos \theta_{Bb})^2 = 3,335^2 + 2(3,335)(6 \cos \theta_{Fb}) + 6^2 \cos^2 \theta_{Fb}$$

$$11,20^2 \sin^2 \theta_{Bb} = 16,22^2 + 2(16,22)(6 \sin \theta_{Fb}) + 6^2 \sin^2 \theta_{Fb}$$

$$0 = 490,91 + 160,02 \cos \theta_{Fb} + 134 \sin \theta_{Fb}$$

Resolviendo:

$$\theta_{Fb} = 230 \approx 228,15$$

$$\theta_{Bb} = 142 \approx 143,1$$

$$R_{FG} + R_{BF} + R_{CB} + R_{DC} + R_{HD} + R_{GH} = 0$$

Real

$$R_{FG} \cos \theta_{FG} + R_{BF} \cos \theta_{BF} + R_{CB} \cos \theta_{CB} + R_{DC} \cos \theta_{DC} + R_{HD} \cos \theta_{HD} + R_{GH} \cos \theta_{GH} = 0$$

$$5 \cos(48,15) + 6 \cos \theta_{BF} + 9 \cos \theta_{CB} + 7,7 \cos(142) + 4,7 \cos(142) + 27,2 \cos(\theta_{GH}) = 0$$

$$\theta_{BF} = \theta_{CB}$$

$$\theta_{DC} = \theta_{HD}$$

$$5 \cos(48,15) + 6 \cos \theta_{BF} + 9 \cos \theta_{BF} + 7,7 \cos(142) + 4,7 \cos(142) + 27,2 \cos(\theta_{GH}) = 0$$

$$3,25 + 6 \cos \theta_{BF} + 9 \cos \theta_{BF} + (-6,06) + (-3,70) + 27,2 \cos(\theta_{GH}) = 0$$

$$15 \cos \theta_{BF} + 27,2 \cos(\theta_{GH}) = +6,41$$

$$(15 \cos \theta_{BF})^2 = (6,41 + 27,2 \cos \theta_{GH})^2$$

$$225 \cos^2 \theta_{BF} = 41,08 + 718,35 \cos \theta_{GH} + 739,84 \cos^2 \theta_{GH} \quad (1)$$

Imaginário

$$R_{FG} \sin \theta_{FG} + R_{BF} \sin \theta_{BF} + R_{CB} \sin \theta_{CB} + R_{DC} \sin \theta_{DC} + R_{HD} \sin \theta_{HD} + R_{GH} \sin \theta_{GH} = 0$$

$$5 \sin(48,15) + 6 \sin \theta_{BF} + 9 \sin \theta_{CB} + 7,7 \sin(142) + 4,7 \sin(142) + 27,2 \sin(\theta_{GH}) = 0$$

$$\theta_{BF} = \theta_{CB}$$

$$\theta_{DC} = \theta_{HD}$$

$$3,72 + 6 \sin \theta_{BF} + 9 \sin \theta_{BF} + 4,74 + 2,89 + 27,2 \sin(\theta_{GH}) = 0$$

$$6 \sin \theta_{BF} + 9 \sin \theta_{BF} = -11,35 - 27,2 \sin(\theta_{GH})$$

$$(15 \sin \theta_{BF})^2 = (-11,35 - 27,2 \sin \theta_{GH})^2$$

$$225 \sin^2 \theta_{BF} = 128 + 617,94 \sin \theta_{GH} + 739,84 \sin^2 \theta_{GH} \quad (2)$$

172

$$\rightarrow 225 = 169,08 + 1335,93 \cos(\theta_{GH}) + 739,84$$

$$\theta_{GH} = 360^\circ$$

$$\theta_{BF} = \theta_{CB} = 198^\circ$$

$$\theta_{DH} = \theta_{CD}$$

$$R_{Ab} + R_{Bc} + R_{Cd} + R_{Dh} + R_{Ha} = 0$$

Real

$$R_{Ab} \cos \theta_{AB} + R_{Bc} \cos \theta_{BC} + R_{Cd} \cos \theta_{CD} + R_{Dh} \cos \theta_{DH} + R_{Ha} \cos \theta_{HA} = 0$$

$$(11,20 \cos \theta_{AB}) + (9 \cos \theta_{BC}) + (7,70 \cos 142,54) + 4,79 \cos(142,54) + 23,46 \cos(142,54) = 0$$

$$11,20 \cos \theta_{AB} + 9 \cos \theta_{BC} + (-6,1) + (-3,76) + (-23,38) = 0$$

$$(11,20 \cos \theta_{AB}) = (3,26 - 9 \cos \theta_{BC})^2$$

$$125,44 \cos^2 \theta_{AB} = 106,23 + 598,68 \cos \theta_{BC} + 81 \cos^2 \theta_{BC} \quad (1)$$

Imaginário:

$$R_{Ab} \sin \theta_{AB} + R_{Bc} \sin \theta_{BC} + R_{Cd} \sin \theta_{CD} + R_{Dh} \sin \theta_{DH} + R_{Ha} \sin \theta_{HA} = 0$$

$$11,20 \sin \theta_{AB} + 9 \sin \theta_{BC} + 7,70 \sin 142,54 + 4,79 \sin 142,54 + 23,46 \sin 142,54 = 0$$

$$11,20 \sin \theta_{AB} + 9 \sin \theta_{BC} + (4,68) + 2,88 + 17,92 = 0$$

$$(11,20 \sin \theta_{AB}) = (-25,48 - 9 \sin \theta_{BC})^2$$

$$125,44 \sin^2 \theta_{AB} = 649,23 + 458,64 \sin \theta_{BC} + 81 \cos^2 \theta_{BC}$$

1, 2

$$125,44 = 1755,46 + 1057,32 \cos \theta_{BC} + 81$$

$$\theta_{BC} = 35,2^\circ$$

$$\theta_{AB} = 7145 + 180 \approx 375$$

$$R_{Fg} + R_{Bf} + R_{Eh} + R_{De} + R_{Hd} + R_{Gh} = 0$$

Real

$$R_{Fg} \cos \theta_{Fg} + R_{Bf} \cos \theta_{Bf} + R_{Eh} \cos \theta_{Eh} + R_{De} \cos \theta_{De} + R_{Hd} \cos \theta_{Hd} + R_{Gh} \cos \theta_{Gh} = 0$$

$$5 \cos(48,15) + 6 \cos(148) + 7,80 \cos \theta_{Eb} + 8,8 \cos \theta_{De} + 4,79 \cos(142) + 27,2 \cos(142) = 0$$

$$3,55 + (-5,706) + 7,80 \cos \theta_{Eb} + 8,8 \cos \theta_{De} + (-3,73) + 27,2 = 0$$

$$(7,80 \cos \theta_{Eb}) = (-21,09 - 8,8 \cos \theta_{De})^2$$

$$60,84 \cos^2 \theta_{Eb} = 449,78 + 371,184 + 77,44 \cos^2 \theta_{De} \quad (1)$$

KAD

Imaginario

$$R_{BF} \sin \theta_{BF} + R_{BE} \sin \theta_{BE} + R_{BD} \sin \theta_{BD} + R_{BH} \sin \theta_{BH} = 0$$

$$5 \text{ sen } (48,35^\circ) + 6 \text{ sen } (198^\circ) + 3,80 \text{ sen } \theta_{BE} + 8,8 \text{ sen } \theta_{DE} + 4,74 \text{ sen } (142^\circ) + 29,2 \text{ sen } 360^\circ = 0$$

$$3,72 + (-1,85) + 3,80 \text{ sen } \theta_{BE} + 8,8 \text{ sen } \theta_{DE} + 0 = 0$$

$$(3,80 \text{ sen } \theta_{BE})^2 = (-1,86 - 8,8 \text{ sen } \theta_{DE})^2$$

$$60,80 \text{ sen}^2 \theta_{BE} = 3,48 + 32,736 \text{ sen } \theta_{DE} - 77,49 \text{ sen } \theta_{DE}$$

142

$$60,80 = 798,26 + 40391 \cos \theta_{DE} - 77,49$$

$$\theta_{DE} = -25 + 180 = 205$$

$$\theta_{EB} = -16 \approx 164$$

$$R_{BA} + R_{BC} + R_{DC} + R_{HD} + R_{AH} = 0$$

Real

$$R_{BA} \cos \theta_{BA} + R_{BC} \cos \theta_{BC} + R_{DC} \cos \theta_{DC} + R_{HD} \cos \theta_{HD} + R_{AH} \cos \theta_{AH} = 0$$

$$11,20 \cos (325^\circ) + 7,80 \cos (164^\circ) + 8,8 \cos (\theta_{DE}) + 4,7 \cos (142^\circ) + 29,96 \cos \theta_{AH} = 0$$

$$3,17 + (-7,49) + 8,8 \cos (\theta_{DE}) + (-3,30) + 29,96 \cos \theta_{AH} = 0$$

$$(8,8 \cos \theta_{DE})^2 = (2,02 - 29,96 \cos \theta_{AH})^2$$

$$77,44 \cos^2 \theta_{DE} = 4,08 + 119,018 \cos \theta_{AH} + 867,8 \cos^2 \theta_{AH}$$

Imaginario

$$R_{BA} \sin \theta_{BA} + R_{BC} \sin \theta_{BC} + R_{DC} \sin \theta_{DC} + R_{HD} \sin \theta_{HD} + R_{AH} \sin \theta_{AH} = 0$$

$$11,20 \sin (325^\circ) + 7,80 \sin (164^\circ) + 8,8 \sin (\theta_{DE}) + 4,7 \sin (142^\circ) + 29,96 \sin \theta_{AH} = 0$$

$$(-6,42) + (2,149) + 8,8 \sin (\theta_{DE}) + 2,89 + 29,96 \sin \theta_{AH} = 0$$

$$(8,8 \sin \theta_{DE})^2 = (1,381 - 29,96 \sin \theta_{AH})^2$$

$$77,44 \sin^2 \theta_{DE} = 1,9 + 81,3 \sin \theta_{AH} + 867,8 \sin^2 \theta_{AH}$$

142

$$77,44 = 5,98 + 200318 \cos \theta_{AH} + 867,8$$

$$\theta_{AH} = 38^\circ$$

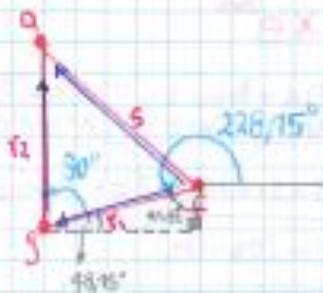
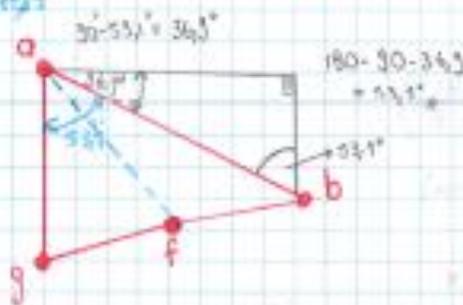
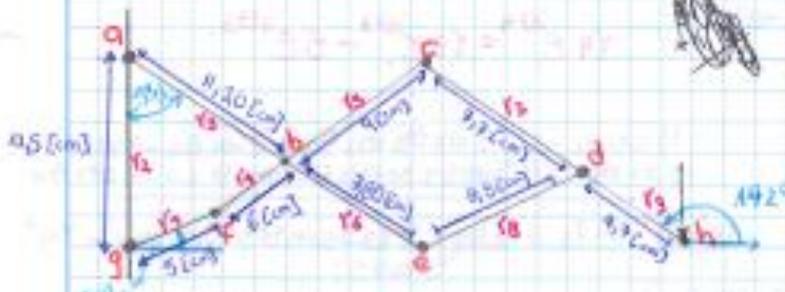
$$\theta_{DE} = -25,2 + 180 = 205,2$$

KAD

Mecanismo Ala (Lechuzca)

Ángulos Máximos

Caso 1



$$\textcircled{1} r_1 e^{j\theta_1} + r_2 e^{j\theta_2} = S e^{j\theta_5}$$

$$r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2 = S \cos \theta_5$$

$$r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2 = S \sin \theta_5$$

$$r_1^2 \cos^2 \theta_1 + 2r_1 r_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + r_2^2 \cos^2 \theta_2 = S^2 \cos^2 \theta_5$$

$$r_1^2 \sin^2 \theta_1 + 2r_1 r_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + r_2^2 \sin^2 \theta_2 = S^2 \sin^2 \theta_5$$

$$r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + 2r_1 r_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 = S^2$$

$$S = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}$$

$$S = \sqrt{(5^2) + (11.5)^2 + 2(5)(11.5) \cos(90 - 228.15)}$$

$$S = 9.38 \text{ [cm]} \approx 9.52 \text{ (valor / tamaño)}$$

$$\frac{S \sin \theta_5}{S \cos \theta_5} = \frac{r_1 \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2}{r_1 \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2}$$

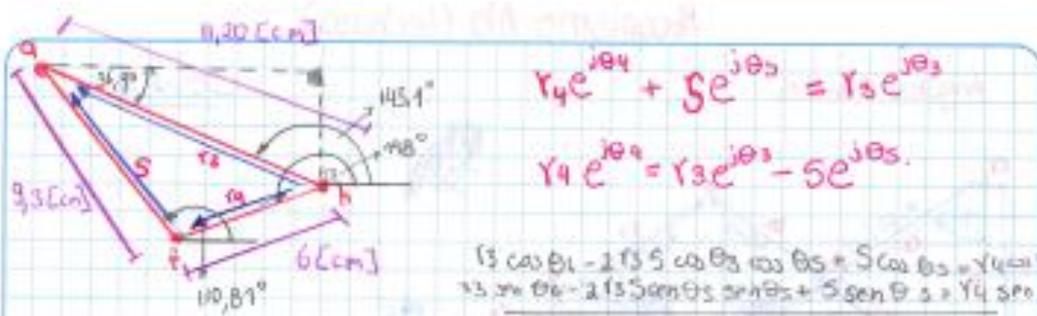
$$\theta_5 = \tan^{-1} \left(\frac{5 \sin(228.15) + 11.5 \sin(90)}{5 \cos(228.15) + 11.5 \cos(90)} \right)$$

$$\theta_5 = -69.18^\circ$$

está desfasada $\pi = 180^\circ$

$$\theta_5 = 110.81^\circ \approx 110.62 \text{ (valor / tamaño)}$$





$$r_4 e^{j\theta_4} + s e^{j\theta_3} = r_3 e^{j\theta_3}$$

$$r_4 e^{j\theta_4} = r_3 e^{j\theta_3} - s e^{j\theta_3}$$

$$r_3 \cos \theta_3 - 2 r_3 s \cos \theta_3 \cos \theta_3 + s \cos \theta_3 = r_4 \cos \theta_4$$

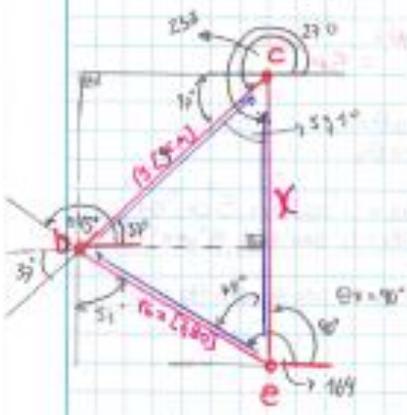
$$r_3 \sin \theta_3 - 2 r_3 s \sin \theta_3 \sin \theta_3 + s \sin \theta_3 = r_4 \sin \theta_4$$

$$r_3^2 + s^2 - 2 r_3 s \cos \theta_3 = 2 (r_3 s \sin \theta_3 \sin \theta_3) = r_4^2$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{r_3 \sin \theta_3 - s \sin \theta_3}{r_3 \cos \theta_3 - s \cos \theta_3} \right)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left(\frac{11.20 \sin(143.1^\circ) - 9.3 \sin(110.81^\circ)}{11.20 \cos(143.1^\circ) - 9.3 \cos(110.81^\circ)} \right)$$

$$\theta_4 = 199 \approx 198 \rightarrow \text{(solid)/inverted}$$



$$r_6 + r_5 = x$$

$$r_6 e^{j\theta_6} + r_5 e^{j\theta_5} = x e^{j\theta_x}$$

$$r_6 \cos \theta_6 - 2 r_6 r_5 \cos \theta_6 \cos \theta_5 + r_5 \cos \theta_5 = x^2 \cos^2 \theta_x$$

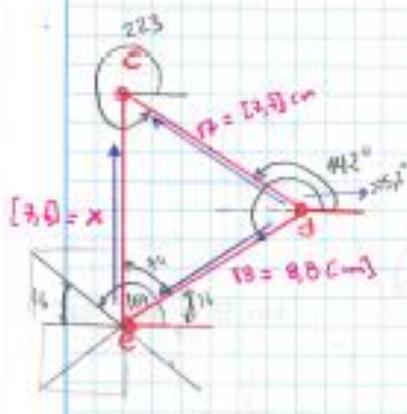
$$r_6 \sin \theta_6 - 2 r_6 r_5 \sin \theta_6 \sin \theta_5 + r_5 \sin \theta_5 = x^2 \sin^2 \theta_x$$

$$r_6 + r_5 + 2 r_6 r_5 \cos \theta_6 \cos \theta_5 - 2 r_6 r_5 \sin \theta_6 \sin \theta_5 = \sin^2 \theta_5 = x^2$$

$$x = \sqrt{r_6^2 + r_5^2 + 2 r_6 r_5 \cos(\theta_6 - \theta_5)}$$

$$x = \sqrt{(7.80)^2 + 9^2 + 2(7.80 \cdot 9) \cos(144 - 37)}$$

$$x = 7.6 \text{ [cm]}$$



$$r_8 + x = r_7 \rightarrow r_8 = r_7 - x$$

$$r_8 e^{j\theta_8} = r_7 e^{j\theta_7} - x e^{j\theta_x}$$

$$r_8^2 + x^2 - 2 r_8 x \cos \theta_8 \cos \theta_x - 2 r_8 x \sin \theta_8 \sin \theta_x = x^2$$

$$\theta_8 = \tan^{-1} \left(\frac{r_7 \sin \theta_7 - x \sin \theta_x}{r_7 \cos \theta_7 - x \cos \theta_x} \right)$$

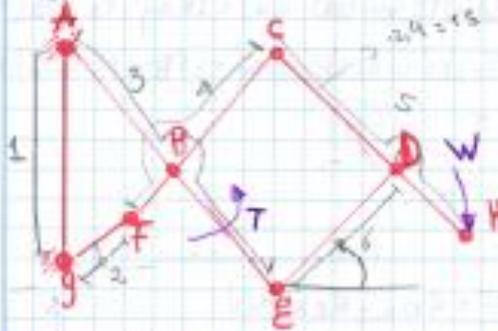
$$\theta_8 = \tan^{-1} \left(\frac{7.7 \sin(142) - 7.6 \sin(90)}{7.7 \cos(142) - 7.6 \cos(90)} \right)$$

$$\theta_8 = 25.2 + 180$$

$$\theta_8 = 205.2^\circ$$

Análisis de Fuerzas

Se asume que el peso del mecanismo actúa en el extremo derecho del link 5 y esto es equivalente a la fuerza peso de la suma de las masas de todos los links por la aceleración de la gravedad.



$$W = Mg$$

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6$$

$$g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Se quiere encontrar cuál es el T (torque) requerido para el eje de la manivela para lograr vencer el peso W del mecanismo y levantar el alo.

Se realiza el análisis estático utilizando los 3 ecuaciones de equilibrio para cada eslabón.

Ecuaciones

$$\sum F_x = 0$$

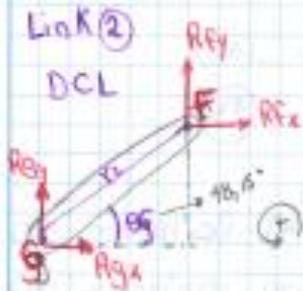
$$\sum F_y = 0$$

$$\sum M = 0$$

$$m = r \times (F)$$

Link 2

DCL

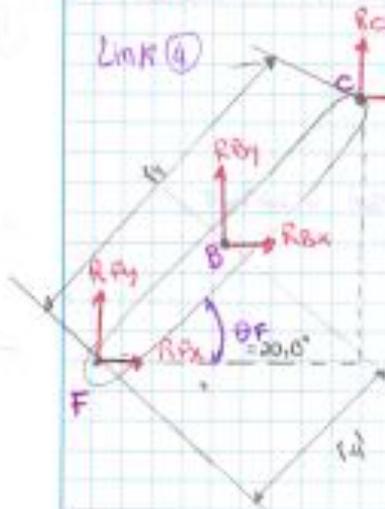


$$\sum F_x = 0 = R_{Bx} + R_{Fx} \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 = R_{By} + R_{Fy} \quad (2)$$

$$\sum M_B = 0 = (R_{Fy}) r_2 \cos \theta - (R_{Fx}) r_2 \sin \theta \quad (3)$$

Link 4



$$\sum F_x = 0 = R_{Cx} + R_{Bx} + R_{Fx} = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = 0 = R_{Cy} + R_{By} + R_{Fy} = 0 \quad (5)$$

$$\sum M_B = 0 = (R_{Cy}) r_4 \cos \theta - (R_{Cx}) r_4 \sin \theta + (R_{Fy}) r_4 \cos \theta - (R_{Fx}) r_4 \sin \theta = 0 \quad (6)$$

LINK 5

Free-body diagram of Link 5 showing forces at joints A, B, and E, and tension T. Reaction forces are R_{Ax} , R_{Ay} , R_{Bx} , R_{By} , R_{Ex} , and R_{Ey} . The link length is l_5 . Angles are θ_{E_5} and $180 - \theta_{E_5}$. A calculation shows $180 - 174 \Rightarrow 6^\circ$.

Equations for Link 5:

$$\sum F_x = 0 = R_{Ex} + R_{Bx} + R_{Ax} \quad (7)$$

$$\uparrow \sum F_y = 0 = R_{Ey} + R_{By} + R_{Ay} \quad (8)$$

$$\sum M_E = 0$$

$$0 = (R_{Ax})l_5 \sin(180 - \theta_{E_5}) + (R_{Ay})l_5 \cos(180 - \theta_{E_5}) + (R_{Bx})l_5 \sin(180 - \theta_{E_5}) + (R_{By})l_5 \cos(180 - \theta_{E_5}) + T \quad (9)$$

LINK 6

Free-body diagram of Link 6 showing forces at joints D and E. Reaction forces are R_{Dx} , R_{Dy} , R_{Ex} , and R_{Ey} . The link length is l_6 . Angle is $\theta_{E_6} \Rightarrow 29.08^\circ$. A calculation shows $(l_6) \cdot x = 11$.

Equations for Link 6:

$$\sum F_x = 0 = R_{Dx} + R_{Ex} \quad (10)$$

$$\uparrow \sum F_y = 0 = R_{Dy} + R_{Ey} \quad (11)$$

$$\sum M_D = 0 = (R_{Ey})l_6 \cos \theta_{E_6} - (R_{Dx})l_6 \sin \theta_{E_6} \quad (12)$$

LINK 5

Free-body diagram of Link 5 showing forces at joints E, D, and H, and weight W. Reaction forces are R_{Ex} , R_{Ey} , R_{Dx} , R_{Dy} , R_{Hx} , and R_{Hy} . The link length is l_5 . Angles are θ_{H_5} and $180 - \theta_{H_5}$. A calculation shows $\theta_{H_5} \Rightarrow 74.2^\circ$.

Equations for Link 5:

$$\sum F_x = 0 = R_{Hx} + R_{Dx} \quad (13)$$

$$\uparrow \sum F_y = R_{Ey} + R_{Dy} \quad (14)$$

$$\sum M_H = 0$$

$$= -(R_{Ey})l_5 \cos(180 - \theta_{H_5}) - (R_{Dx})l_5 \sin(180 - \theta_{H_5}) - (R_{Dy})l_5 \cos(180 - \theta_{H_5}) - (R_{Hx})l_5 \cos(180 - \theta_{H_5}) - W \quad (15)$$

→ Crea un sistema de matrices 15×15 y se resuelve con ayuda de MathLab.

$$A \vec{R} = \vec{B}$$

$$\vec{R} = \text{inv}(A) \cdot \vec{B}$$

Vector de Reacciones

Resumen de Ecuaciones

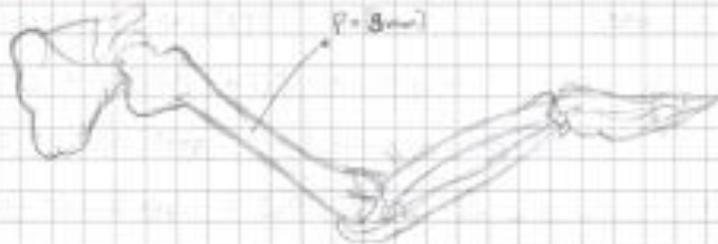
- ① $R_{Gy} + R_{Fy} = 0$
- ② $R_{Gx} + R_{Fx} = 0$
- ③ $(R_{Fy}) 12 \cos \theta_G - (R_{Fx}) 12 \sin \theta_G$
- ④ $R_{Cx} + R_{Fx} + R_{Bx} = 0$
- ⑤ $R_{Cy} + R_{Fy} + R_{By} = 0$
- ⑥ $(R_{Cy}) 14 \cos \theta_F - (R_{Cx}) 14 \sin \theta_F + (R_{By}) 14 \cos \theta_F - (R_{Bx}) 14 \sin \theta_F$
- ⑦ $R_{Ex} + R_{Bx} + R_{Ax} = 0$
- ⑧ $R_{Ey} + R_{By} + R_{Ay} = 0$
- ⑨ $(R_{Ax}) 13 \sin(180 - \theta_E) + (R_{Ay}) 13 \cos(180 - \theta_E) + (R_{Bx}) 13 \sin(180 - \theta_E) + (R_{By}) 13 \cos(180 - \theta_E) + T = 0$
- ⑩ $R_{Dx} + R_{Ex} = 0$
- ⑪ $R_{Dy} + R_{Ey} = 0$
- ⑫ $(R_{Dy}) 16 \cos \theta_E - (R_{Dx}) 16 \sin \theta_E = 0$
- ⑬ $R_{Sx} + R_{Dx} = 0$
- ⑭ $R_{Sy} + R_{Dy} = 0$
- ⑮ $(R_{Sx}) 15 \cos(180 - H) + (R_{Sy}) 15 \sin(180 - H) + (R_{Dx}) 15 \cos(180 - H) + (R_{Dy}) 15 \sin(180 - H) = 0$

$(R_{Dy}) \sin \theta_E = (R_{Dx}) \cos \theta_E$

$\vec{F} \cdot (\vec{A}) \sin \theta = A$

Diseño:

Análisis:



$$P = 23r$$

$$\frac{L}{2r} = r$$

$$\frac{800}{2r} = r$$

$$r = 17,56 \text{ [m]}$$

$$r = 0,01756 \text{ [m]}$$

$$d = 0,02512 \text{ [m]}$$

Plumas depende en aves el largo (1,5 - 2)

Datos paper sobre el peso del esqueleto de aves:

23% → órganos

52% → plumaje

9% → piel

16% → huesos

$$W_{\text{techo}} = 0,98 \text{ [kg]}$$

$$W_{\text{huesos}} = 0,98 \cdot 0,16$$

$$= 0,1568 \text{ [kg]}$$

$$\begin{aligned} \text{huesos} + \text{Plumas} &= 682 \text{ peso} \\ &= 0,98 + 0,1568 \\ &= 0,66 \text{ [kg]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= mg \\ &= \rho \cdot V \cdot g \\ &= \rho \left(\frac{\pi}{4} d^2 \right) \cdot l \cdot (9,8) \end{aligned}$$

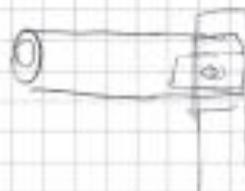
$$l = 0,782 \text{ (ala parte posterior)}$$

$$(0,66) = \rho \left(\frac{\pi}{4} (0,02512)^2 \right) (0,782) (9,8)$$

$$\rho_{\text{hueso}} = 1,79 \text{ [kg/m}^3]$$

$$W = \frac{\pi}{4} (0,02512)^2 (0,782 \text{ m}) (1,79) (9,8)$$

$$W_{\text{hueso}} = 0,2301$$

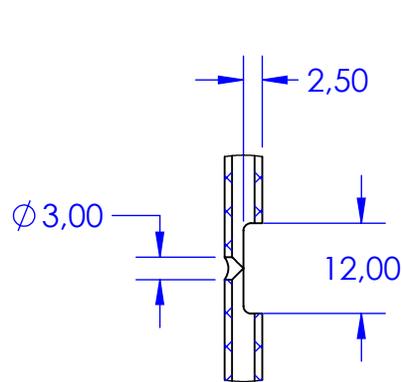


2

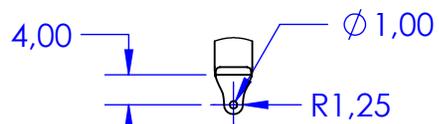
1

B

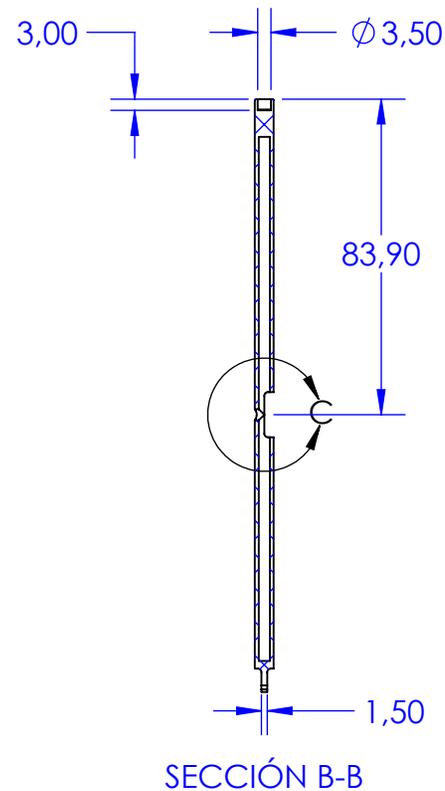
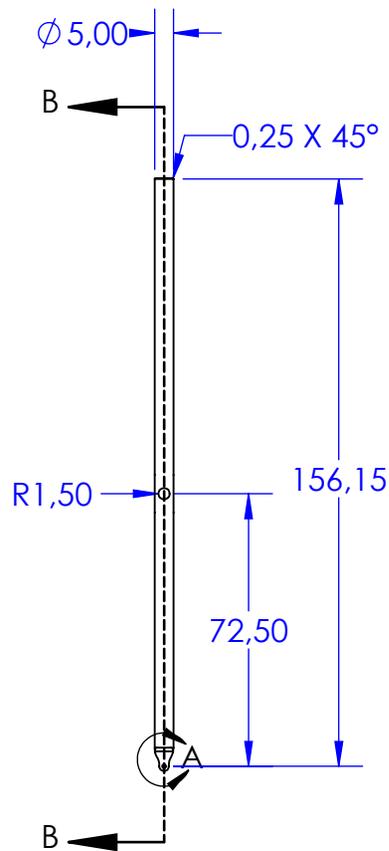
B



DETALLE C
ESCALA 1 : 1



DETALLE A
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN B-B



ESLABÓN AE

A

A

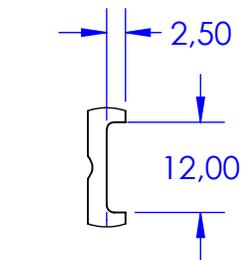
Dibujado por: Shirley Paredes	Aprobado por: Patricio Chiriboga	PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING. MECÁNICA	
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		TÍTULO: ESLABÓN AE	
			
Material:	PVC Rígido custom	TAMAÑO A4	N.º DE DIBUJO
Observaciones:			
Modificaciones:			
Número de Plano:	MC_ALA_0521		
		ESCALA: 1:2	PESO: 2.23
		HOJA 1 DE 5	

2

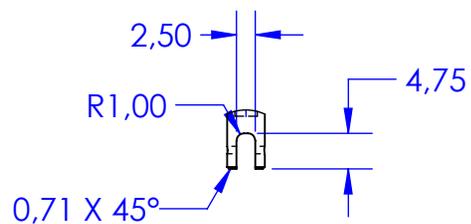
1

2

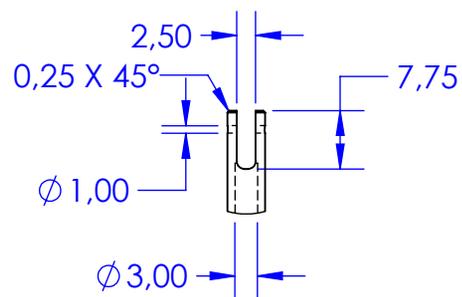
1



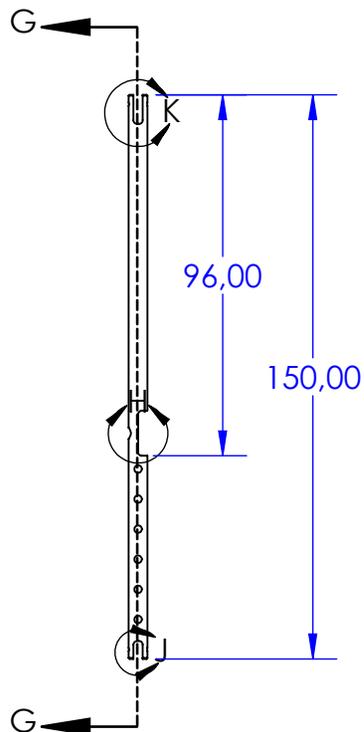
DETALLE H
ESCALA 1 : 1



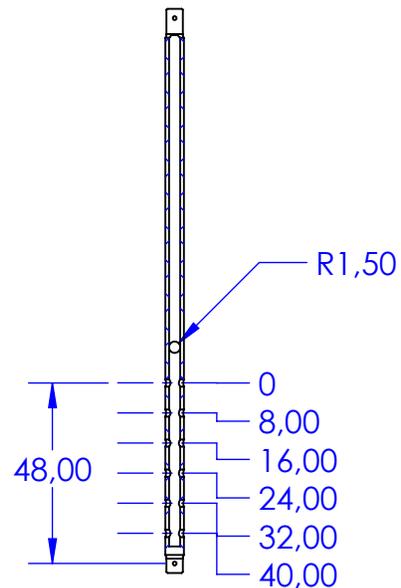
DETALLE J
ESCALA 1 : 1



DETALLE K
ESCALA 1 : 1



ESLABÓN CF



SECCIÓN G-G



Dibujado por: Shirley Paredes	Aprobado por: Patricio Chiriboga
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO	
	
Material:	PVC Rígido custom
Observaciones:	
Modificaciones:	
Número de Plano:	MC_ALA_0521

PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING.
MECÁNICA

TÍTULO:

ESLABON CF

TAMAÑO

A4

N.º DE DIBUJO

ESCALA: 1:2 PESO: 2.23

HOJA 2 DE 5

2

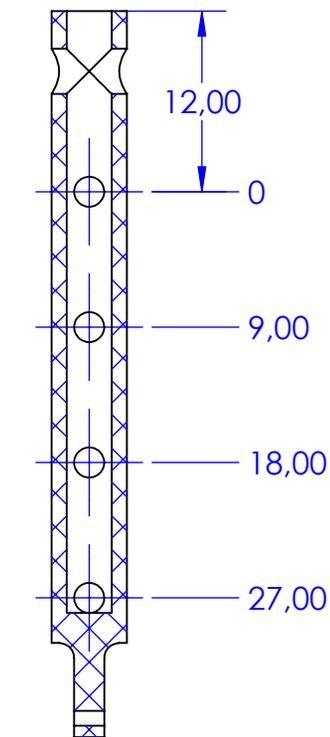
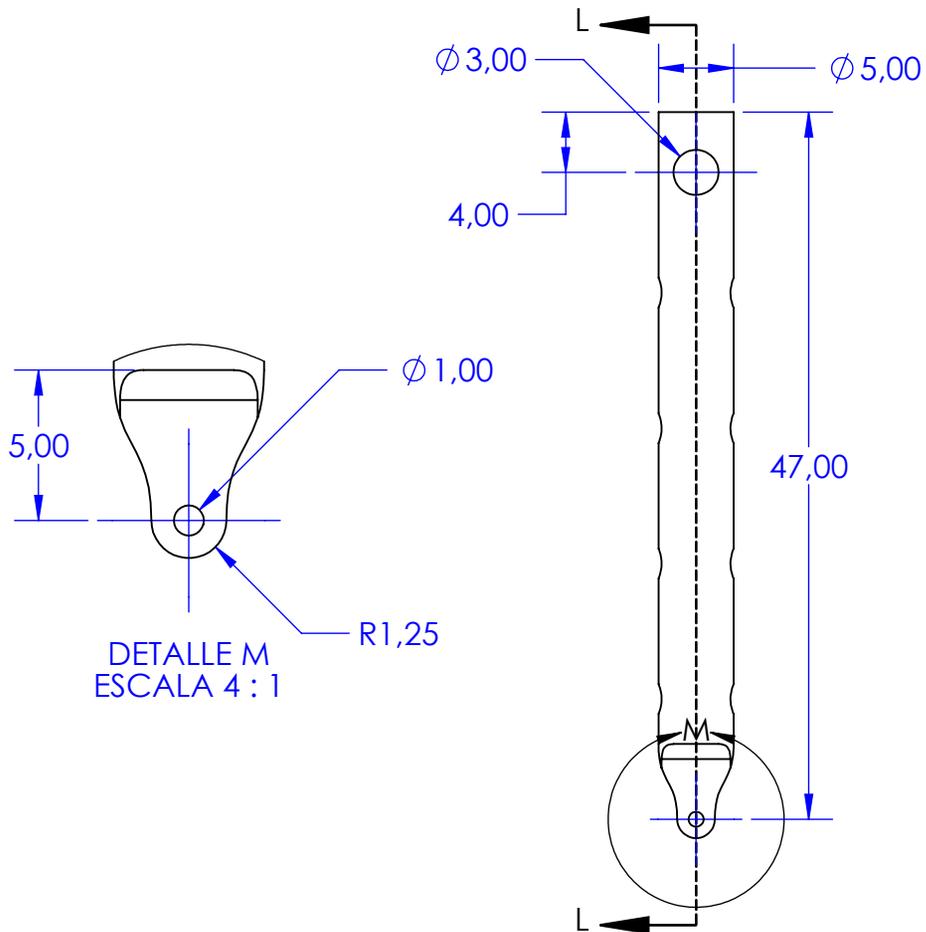
1

2

1

B

B



SECCIÓN L-L
ESCALA 2 : 1

ESLABON GF



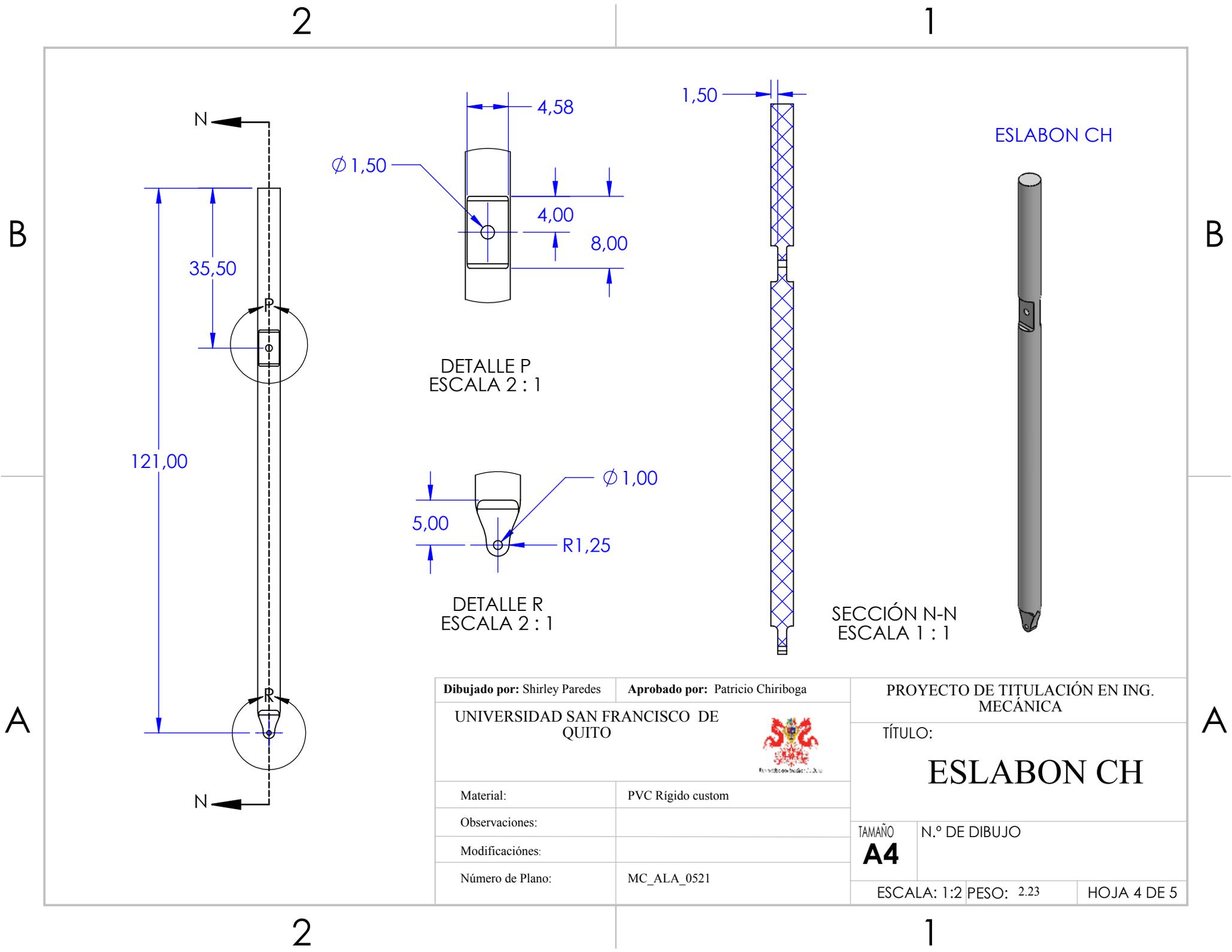
A

A

Dibujado por: Shirley Paredes		Aprobado por: Patricio Chiriboga		PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING. MECÁNICA	
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO				TÍTULO:	
Material: PVC Rígido custom		Observaciones:		ESLABON GF	
Modificaciones:		Número de Plano: MC_ALA_0521		TAMAÑO A4	N.º DE DIBUJO
				ESCALA: 1:2	PESO: 2.23
				HOJA 3 DE 5	

2

1



DETALLE P
ESCALA 2 : 1

DETALLE R
ESCALA 2 : 1

SECCIÓN N-N
ESCALA 1 : 1

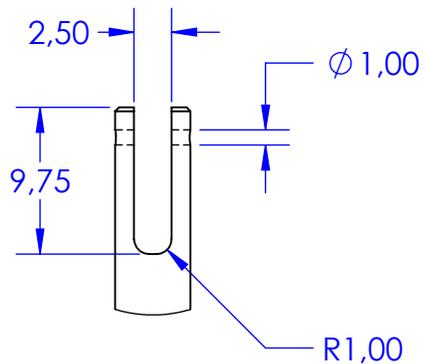
ESLABON CH

Dibujado por: Shirley Paredes	Aprobado por: Patricio Chiriboga
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO 	
Material:	PVC Rígido custom
Observaciones:	
Modificaciones:	
Número de Plano:	MC_ALA_0521

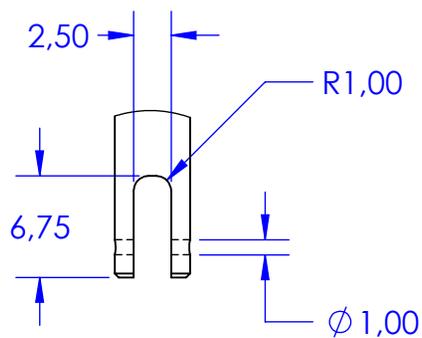
PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING. MECÁNICA TÍTULO: <h2 style="text-align: center;">ESLABON CH</h2>		
TAMAÑO A4	N.º DE DIBUJO	
ESCALA: 1:2	PESO: 2.23	HOJA 4 DE 5

2

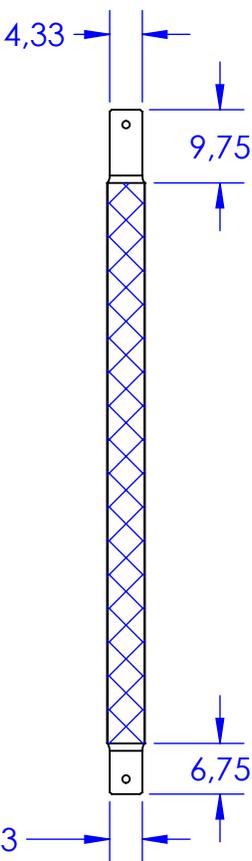
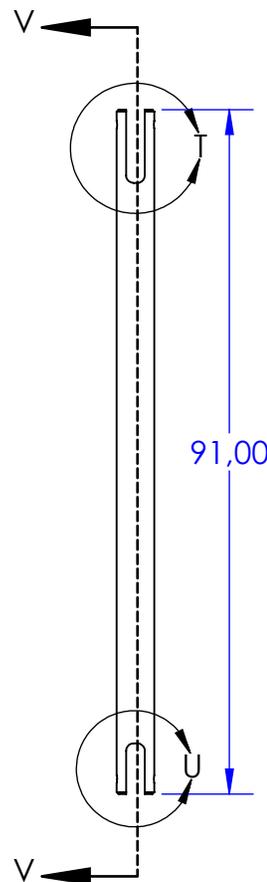
1



DETALLE T
ESCALA 2 : 1



DETALLE U
ESCALA 2 : 1



SECCIÓN V-V
ESCALA 1 : 1



ESLABON DE

Dibujado por: Shirley Paredes		Aprobado por: Patricio Chiriboga		PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING. MECÁNICA	
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO				TÍTULO:	
				ESLABON DE	
Material:	PVC Rígido custom	TAMAÑO	N.º DE DIBUJO		
Observaciones:		A4			
Modificaciones:					
Número de Plano:	MC_ALA_0521				
		ESCALA: 1:2		PESO: 2.23	HOJA 5 DE 5

2

1

B

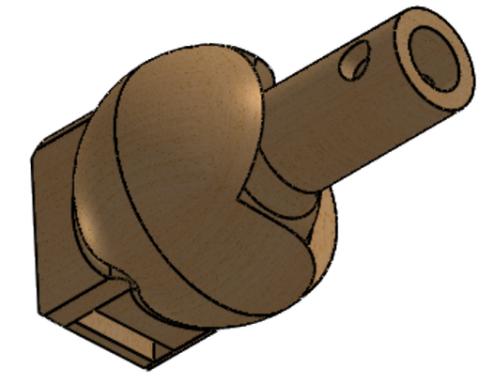
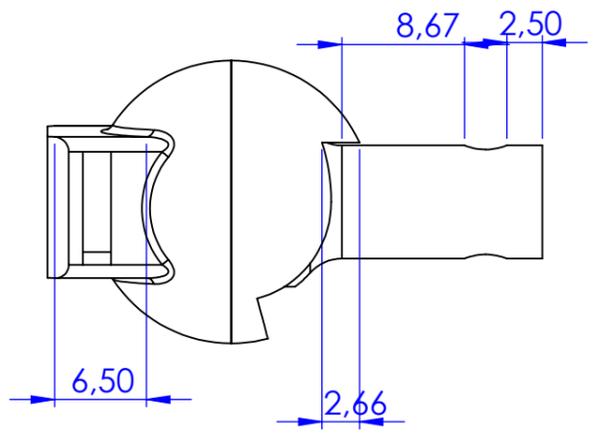
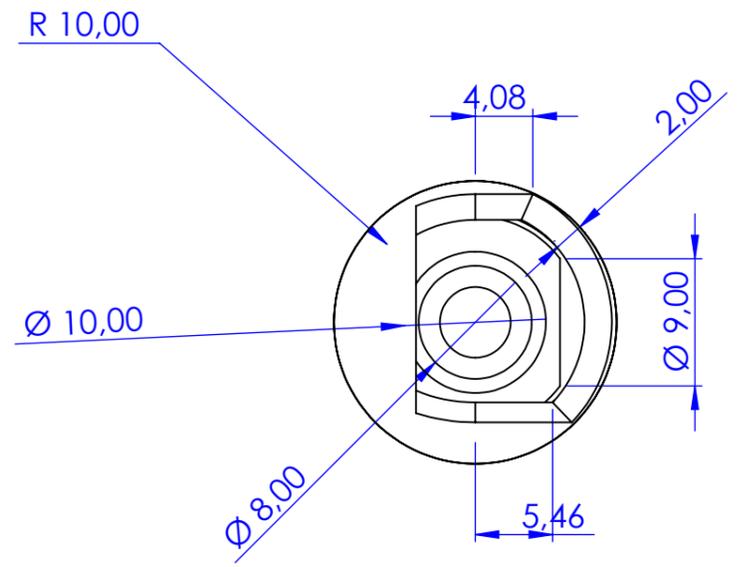
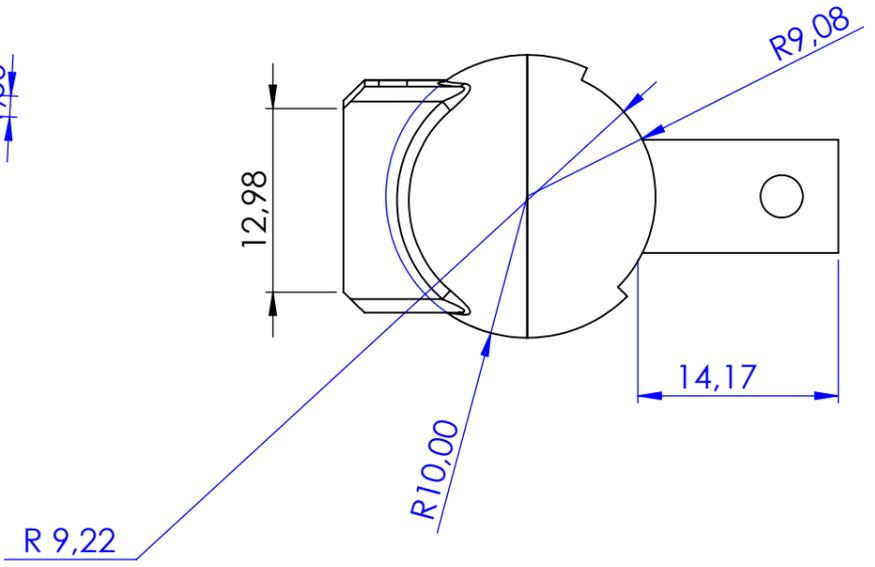
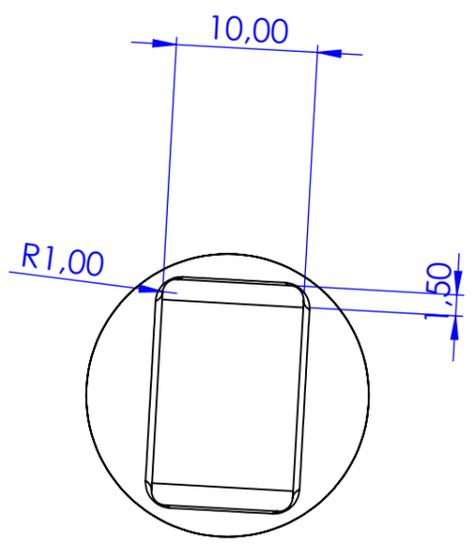
B

A

A

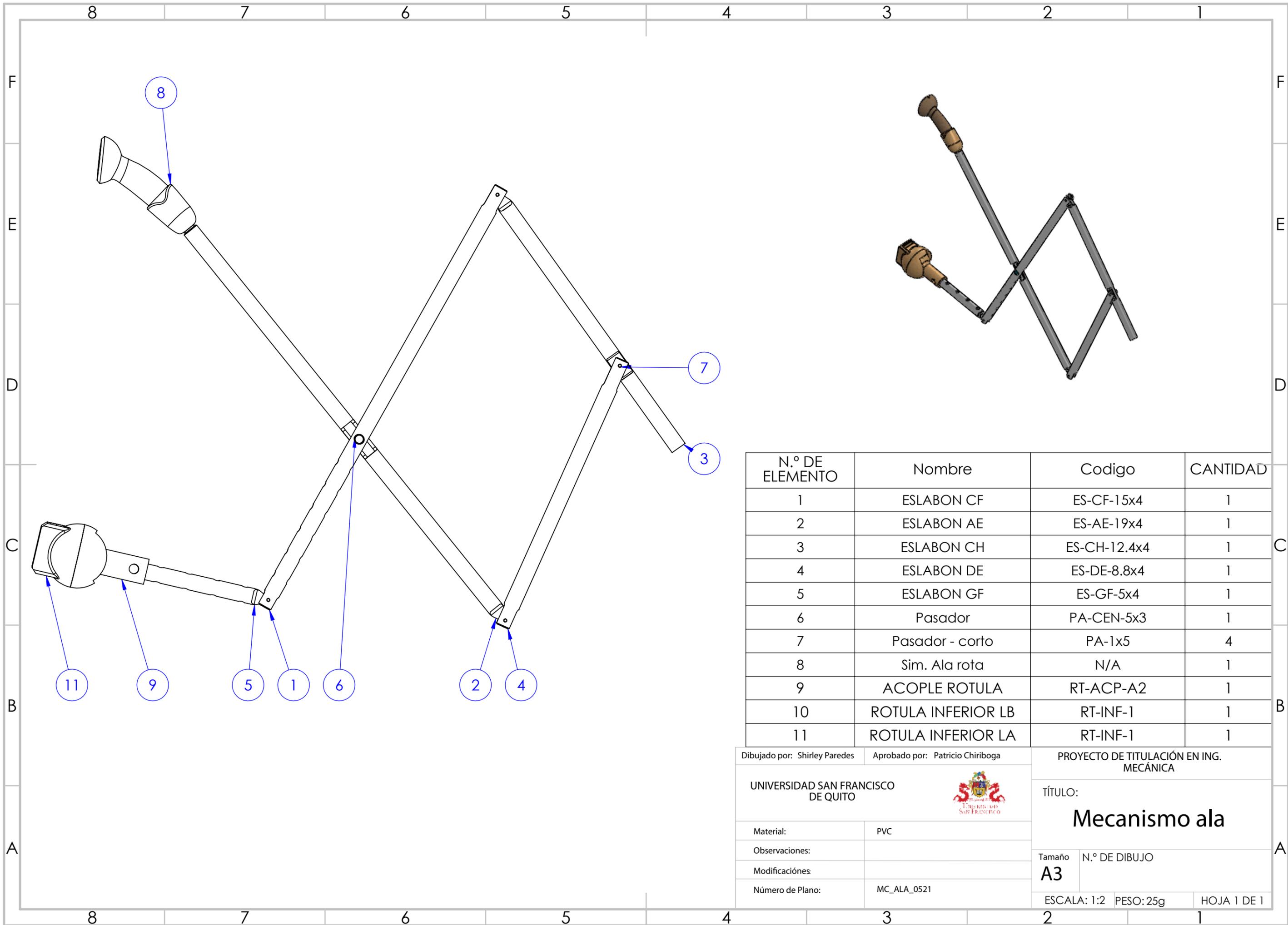
8 7 6 5 4 3 2 1

F
E
D
C
B
A



Dibujado por: Shirley Paredes	Aprobado por: Patricio Chiriboga	PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING. MECÁNICA	
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO		 TÍTULO: ACOPLE	
Material:	PLA	Tamaño	N.º DE DIBUJO
Observaciones:		A3	6
Modificaciones:		ESCALA: 2:1 PESO : 2.2 gr HOJA 1 DE 1	
Número de Plano:	MC_ALA_0522		

8 7 6 5 4 3 2 1



N.º DE ELEMENTO	Nombre	Codigo	CANTIDAD
1	ESLABON CF	ES-CF-15x4	1
2	ESLABON AE	ES-AE-19x4	1
3	ESLABON CH	ES-CH-12.4x4	1
4	ESLABON DE	ES-DE-8.8x4	1
5	ESLABON GF	ES-GF-5x4	1
6	Pasador	PA-CEN-5x3	1
7	Pasador - corto	PA-1x5	4
8	Sim. Ala rota	N/A	1
9	ACOPLE ROTULA	RT-ACP-A2	1
10	ROTULA INFERIOR LB	RT-INF-1	1
11	ROTULA INFERIOR LA	RT-INF-1	1

Dibujado por: Shirley Paredes		Aprobado por: Patricio Chiriboga		PROYECTO DE TITULACIÓN EN ING. MECÁNICA	
UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO					
Material: PVC		Tamaño: A3		N.º DE DIBUJO	
Observaciones:		ESCALA: 1:2		PESO: 25g	
Modificaciones:		Número de Plano: MC_ALA_0521		HOJA 1 DE 1	